

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS DOCTORAL

Análisis del comportamiento medioambiental de aceros y recubrimientos para su utilización en turbinas de vapor supercrítico

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Marcos Baranda Fernández

DIRIGIDA POR

Francisco Javier Pérez Trujillo
Ricardo Díaz Martín
Carlos Mayo del Río

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MEDIOAMBIENTAL DE ACEROS Y
RECUBRIMIENTOS PARA SU UTILIZACIÓN EN TURBINAS DE VAPOR
SUPERCRÍTICO

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA QUÍMICA

PRESENTADA POR

MARCOS BARANDA FERNÁNDEZ

DIRECTORES

Dr. FRANCISCO JAVIER PÉREZ TRUJILLO

Dr. RICARDO DIAZ MARTÍN

Dr. CARLOS MAYO DEL RÍO

Agradecimientos

Quiero agradecer a mis directores de tesis su constante impulso y motivación en la realización de la presente tesis doctoral. También a mi familia, por su apoyo incondicional.

ÍNDICE

0. RESUMEN	7
0.1.- ESPAÑOL.....	7
0.2.- INGLÉS.....	9
1. INTRODUCCIÓN	11
1.1.- OBJETIVO	15
1.2.- CONSIDERACIONES ENERGÉTICAS.....	17
1.2.1.- ANTECEDENTES DEL TEMA	23
1.2.1.1.- CICLOS TERMODINÁMICOS DE VAPOR	25
1.2.1.2.- IMPORTANCIA DEL CARBÓN	32
1.2.1.3.- CENTRALES TÉRMICAS DE CARBÓN	37
1.3.- CONSIDERACIONES SOBRE LOS MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS EMPLEADOS.....	40
1.3.1.- ACEROS FERRÍTICO-MARTENSÍTICOS CON 9-12% DE CROMO	41
1.3.2.- USO DE ACEROS FERRÍTICO-MARTENSÍTICOS EN CALDERAS Y TURBINAS.....	43
1.3.2.1.- CALDERA	43
1.3.2.2.- TURBINA	45
1.3.3.- FENÓMENOS DE CORROSIÓN A ELEVADA TEMPERATURA	48
1.3.3.1.- OXIDACIÓN EN AMBIENTES DE VAPOR.....	53
1.3.4.- RECUBRIMIENTOS	55
1.3.4.1.- RECUBRIMIENTOS UTILIZADOS PARA ALTA TEMPERATURA	55
1.3.4.2.- TIPOLOGÍA DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	57
1.3.4.3.- DEPOSICIÓN DE LOS RECUBRIMIENTOS.....	58
1.4.- CONSIDERACIONES MEDIOAMBIENTALES	76
2. ESTADO DEL ARTE	83
3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	93
3.1.- METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV)	95
3.2.- ÁMBITO GENERAL Y ETAPAS DE UN ACV	103
3.2.1.- DEFINICIÓN DE OBJETIVO Y ALCANCE	105
3.2.2.- ANÁLISIS DE INVENTARIO	107
3.2.3.- EVALUACIÓN DE IMPACTO DEL CICLO DE VIDA	110
3.2.4.- INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	133
3.2.5.- MÉTODOS PARA EVALUACIÓN DE UN ACV	134
3.3.- HERRAMIENTA COMPUTACIONAL UTILIZADA	153
3.3.1.- METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN SIMAPRO	155
4. MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	157
4.1.- MATERIALES PARA APLICACIONES DE ALTA TEMPERATURA EN TURBINAS DE VAPOR SUPERCRÍTICO	157
4.1.1.-ACERO FERRÍTICO P91	158
4.1.2.-ACERO FERRÍTICO P92	160

INDICE

4.1.3.-ACERO FERRÍTICO VM12	162
4.1.4.-ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 347H	164
4.1.5.-ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 321.....	167
4.2.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE LOS SUSTRATOS CONSIDERADOS	170
4.2.1.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ACERO FERRÍTICO P91.....	180
4.2.2.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ACERO FERRÍTICO P92.....	188
4.2.3.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ACERO FERRÍTICO VM12	194
4.2.4.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 347H	201
4.2.5.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AISI 321.....	208
4.3.- RECUBRIMIENTOS Y MÉTODOS DE APLICACIÓN EMPLEADOS.....	215
4.3.1.- RECUBRIMIENTO DE NiCr POR HVOF	216
4.3.2.- RECUBRIMIENTO DE CrN/NbN POR HIPIMS	220
4.3.3.- RECUBRIMIENTO DE AL (SLURRY).....	223
4.4.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) DE SUSTRATOS SELECCIONADOS, CON LOS RECUBRIMIENTOS CONSIDERADOS	228
4.4.1.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE SUSTRATOS / NiCr	231
4.4.1.1- ACERO FERRÍTICO P91 / NiCr	232
4.4.1.2- ACERO FERRÍTICO P92 / NiCr	239
4.4.2.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE SUSTRATOS / CrN/NbN	246
4.4.2.1- ACERO FERRÍTICO P92 / CrN/NbN.....	247
4.4.3.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE SUSTRATOS / SLURRY DE AL	254
4.4.3.1- ACERO FERRÍTICO P91 / SLURRY DE AL.....	255
4.4.3.2- ACERO FERRÍTICO P92 / SLURRY DE AL.....	261
4.4.3.3- ACERO FERRÍTICO VM12 / SLURRY DE AL	266
4.4.3.4- ACERO AUSTENÍTICO AISI 347H / SLURRY DE AL	271
4.4.3.5- ACERO AUSTENÍTICO AISI 321 / SLURRY DE AL.....	276
5. RESULTADOS: ANÁLISIS DE CICLOS DE VIDA COMPARATIVOS.....	282
5.1.- OBJETIVO Y ALCANCE DEL ACV	282
5.2.- RESULTADOS OBTENIDOS	285
5.2.1.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LOS ACEROS FERRÍTICOS	285
5.2.2.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LOS ACEROS AUSTENÍTICOS	291
5.2.3.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LOS ACEROS FERRÍTICOS + RECUBRIMIENTO	296
5.2.4.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LOS ACEROS AUSTENÍTICOS + RECUBRIMIENTO	302
5.2.5.- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO ENTRE ACEROS Y ACEROS CON RECUBRIMIENTO	306
5.2.5.1- ACERO FERRÍTICO P91 / ACERO FERRÍTICO P91 + NiCr	306
5.2.5.2- ACERO FERRÍTICO P91 / ACERO FERRÍTICO P91 + SLURRY AL.....	310
5.2.5.3- ACERO FERRÍTICO P92 / ACERO FERRÍTICO P92 + CrN/NbN	313
5.2.5.4- ACERO FERRÍTICO P92 / ACERO FERRÍTICO P92 + NiCr	316
5.2.5.5- ACERO FERRÍTICO P92 / ACERO FERRÍTICO P92 + SLURRY AL.....	319
5.2.5.6- ACERO FERRÍTICO VM12 / ACERO FERRÍTICO VM12 + SLURRY AL	322
5.2.5.7- ACERO AUSTENÍTICO AISI 347H / ACERO AUSTENÍTICO AISI 347H + SLURRY AL.....	325
5.2.5.8- ACERO AUSTENÍTICO AISI 321 / ACERO AUSTENÍTICO AISI 321 + SLURRY AL.....	328
5.2.6.- EFECTO DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO.	332
5.2.6.1- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE PROCESOS UTILIZADOS PARA EL RECUBRIMIENTO	332
5.2.6.2- ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA COMPARATIVO DE LOS SUSTRATOS VS PROCESOS DE RECUBRIMIENTO ..	337
5.2.6.2.1- ACERO FERRÍTICO P91 / PROCESO RECUBRIMIENTO NiCr.....	337
5.2.6.2.2- ACERO FERRÍTICO P91 / PROCESO RECUBRIMIENTO SLURRY AL	341
5.2.6.2.3- ACERO FERRÍTICO P92 / PROCESO RECUBRIMIENTO CrN/NbN	345
5.2.6.2.4- ACERO FERRÍTICO P92 / PROCESO RECUBRIMIENTO NiCr.....	349

5.2.6.2.5- ACERO FERRÍTICO P92 / PROCESO RECUBRIMIENTO SLURRY AL	353
5.2.6.2.6- ACERO FERRÍTICO VM12 / PROCESO RECUBRIMIENTO SLURRY AL.....	357
5.2.6.2.7- ACERO AUSTENÍTICO AISI 347H/PROCESO RECUBRIMIENTO SLURRY AL	361
5.2.6.2.8- ACERO AUSTENÍTICO AISI 321 / PROCESO RECUBRIMIENTO SLURRY AL	365
5.2.7.- ANÁLISIS ECONÓMICO.	371
6. CONCLUSIONES.....	373
6.1.- CONCLUSIONES GENERALES.	373
6.2.- CONCLUSIONES PRINCIPALES.....	378
7. BIBLIOGRAFÍA.....	380
8. ANEXOS	401
8.1.- NORMAS ISO RELATIVAS A ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	401
8.2.- LISTADO DE TABLAS	405
8.3.- LISTADO DE FIGURAS	409
8.4.- ABREVIATURAS Y SIGLAS	419

0. RESUMEN

0.1.- Español

Análisis del comportamiento medioambiental de aceros y recubrimientos para su utilización en turbinas de vapor supercrítico.

En la actualidad, la tendencia en las grandes plantas industriales de producción de energía eléctrica es trabajar en condiciones de operación con altas presiones y temperaturas (condiciones supercríticas y ultrasupercríticas) debido a que se maximiza el rendimiento de la conversión termoeléctrica y se minimiza los impactos ambientales y los requerimientos de combustible por unidad de energía producida. En este contexto, los aceros ferríticos y austeníticos con recubrimiento son los materiales más comúnmente empleados para la construcción de turbinas de vapor en centrales eléctricas alimentadas con carbón que operan en dichas condiciones supercríticas y ultrasupercríticas de presión y temperatura debido a su resistencia a la corrosión y oxidación. Sin embargo, las implicaciones ambientales asociadas al sistema acero-recubrimiento no han sido investigadas en profundidad para elegir la mejor opción en términos de sostenibilidad. En base a esto, la presente tesis ha seleccionado para su estudio tres tipos de aceros ferríticos, dos tipos de aceros austeníticos, así como tres recubrimientos con su correspondiente técnica de deposición, normalmente utilizados en estos entornos de operación. Los materiales designados son los aceros ferríticos P91, P92 y VM12, los aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321, mientras que los recubrimientos protectores seleccionados son Ni50Cr aplicado mediante proyección térmica de alta velocidad (HVOF), CrN/NbN aplicado mediante pulverización catódica de magnetrón de alta potencia (HiPIMS) y slurry de aluminio aplicado mediante pintado y tratamiento térmico de difusión.

Tomando estos datos como punto de partida, se han realizado evaluaciones comparativas mediante la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV) de las configuraciones sustrato-recubrimiento así como un análisis económico, con el objetivo de contribuir a una mejor comprensión de los daños ambientales. También se pretende resaltar la importancia de considerar la evaluación técnica y ambiental en la selección de los materiales, a la vez que se tiene en cuenta es aspecto económico. Se ha utilizado el software Simapro 9.0, la base de datos Ecoinvent 3 y el método Recipe, siendo todos ellos los más habituales a la hora de llevar a cabo este tipo de estudios de impacto ambiental.

Los resultados obtenidos para el ACV de los sustratos desnudos demostraron que los aceros P92 y AISI 321 se comportaban medioambientalmente mejor que el resto en la categoría de impacto de recursos minerales. Por otro lado, cuando se analizaron los resultados de los ACV de los sustratos recubiertos y de las técnicas de deposición, se observó que el recubrimiento de slurry Al generaba menores impactos que el resto. Asimismo, se comprobó que el consumo eléctrico asociado a la deposición del recubrimiento de CrN/NbN mediante HiPIMS tenía el comportamiento ambiental más desfavorable, afectando en gran medida a la categoría de impacto de toxicidad humana carcinogénica y al área de daño relativo a la salud humana.

Las conclusiones derivadas del estudio fueron que el acero ferrítico P92 y el acero austenítico AISI 321, ambos recubiertos con slurry de aluminio, tuvieron el mejor desempeño ambiental y por tanto se recomienda su uso. Por otro lado, el recubrimiento CrN/NbN mostró los mayores impactos en todas las categorías estudiadas, no siendo aconsejable su utilización. El análisis económico refrenda los resultados anteriores, al coincidir los sistemas de menor coste con los de mejor comportamiento ambiental, de manera que los requisitos técnicos, ambientales y de coste se encuentran alineados.

0.2.- Inglés

Analysis of the environmental behaviour of steels and coatings for their use in supercritical steam turbines.

Currently, the trend in large industrial plants for the production of electrical energy is to work in operating conditions with high pressures and temperatures (supercritical and ultrasupercritical conditions) because the performance of thermoelectric conversion is maximized and environmental impacts are minimized, as well as the fuel requirements per unit of energy produced. In this context, coated ferritic and austenitic steels are the most commonly used materials for the construction of steam turbines in coal-fired power plants operating in such supercritical and ultrasupercritical pressure and temperature conditions due to their corrosion resistance and oxidation. However, the environmental implications associated with the steel-coating system have not been investigated in depth to choose the best option in terms of sustainability. Based on this, this thesis has selected for study three types of ferritic steels, two types of austenitic steels, as well as three coatings with their corresponding deposition technique, normally used in these operating environments. The designated materials are P91, P92 and VM12 ferritic steels, AISI 347H and AISI 321 austenitic steels, while the selected protective coatings are Ni50Cr applied by High-Velocity Oxi Fuel Spray (HVOF), CrN/NbN applied by High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS) and aluminum slurry applied by painting and diffusion heat treatment.

Taking these data as a starting point, comparative evaluations have been carried out using the life cycle analysis (LCA) methodology of the substrate-coating configurations as well as an economic analysis, with the aim of contributing to a better understanding of environmental damage. It is also intended to highlight the importance of considering the technical and environmental evaluation in the selection of materials, while taking into account the economic aspect. The Simapro 9.0 software, the Ecoinvent 3 database and the Recipe method have been used, all of which are the most common when carrying out this type of environmental impact studies. The results obtained for the LCA of bare substrates demonstrated that P92 and AISI 321 steels performed better environmentally than the rest in the mineral resource impact category. On the other hand, when the results of the LCA of the coated substrates and the deposition techniques were analyzed, it was observed that the slurry Al coating generated lower impacts than the rest.

Likewise, it was found that the electrical consumption associated with the deposition of the CrN/NbN coating using HiPIMS had the most unfavorable environmental behaviour, greatly affecting the impact category referred to carcinogenic human toxicity and the damage area referred to human health.

The conclusions derived from the study were that ferritic steel P92 and austenitic steel AISI 321, both coated with aluminum slurry, had the best environmental performance and therefore their use is recommended. On the other hand, the CrN/NbN coating showed the greatest impacts in all the categories studied, making its use not advisable. The economic analysis confirms the previous results, as the lowest cost systems coincide with those with the best environmental performance, so that the technical, environmental and cost requirements are aligned.

1. INTRODUCCIÓN

Es indudable la importancia que tiene actualmente la energía en el contexto global, en el que ejerce una gran influencia sobre los aspectos económicos, sociales y medioambientales. No sólo soporta la actividad industrial y económica, sino que contribuye a satisfacer las necesidades básicas de la población y sirve de apoyo al desarrollo social. También genera beneficios para el medio ambiente, como por ejemplo la disminución de contaminación debido a la eficiencia energética de los procesos y la reducción de la deforestación causada por la utilización de energías renovables.

Sin embargo, existen contrapartidas derivadas del aumento del consumo energético como el agotamiento de recursos y el incremento de los niveles de contaminación. Es aquí donde entran en juego distintos mecanismos de desarrollo sostenible que tienen como finalidad el compensar estas afectaciones.

Todo ello hace que la energía constituya un elemento estratégico de primer nivel, siendo su disponibilidad una cuestión de importancia primordial para los gobiernos de todos los países. En este sentido, se debe seleccionar la combinación de combustibles óptima en cada caso, teniendo en cuenta el abastecimiento energético, la situación económica y el desarrollo sostenible. Esto puede ocasionar implicaciones en el panorama geopolítico global. Véanse por ejemplo las consecuencias derivadas de la guerra entre Ucrania y Rusia, iniciada en febrero de 2022, y que han supuesto el corte del suministro de gas para calefacción fundamentalmente en el entorno europeo, lo cual ha provocado un gran incremento de los precios de la electricidad y del gasóleo, afectando de manera drástica a la economía y generando situaciones de “pobreza” energética.

Continuando con lo anteriormente expuesto hay que mencionar que la generación, el transporte y la distribución de energía conllevan costes medioambientales, además de los económicos. Es por ello por lo que, además del nivel de desarrollo e industrialización de un país, su disponibilidad de recursos o la demanda energética que requiere (que puede verse afectada por el periodo del día o del año en curso, las condiciones meteorológicas del entorno, las regulaciones energéticas existentes o el grado de infraestructura disponible), deberán tenerse en cuenta consideraciones desde el punto de vista ambiental a la hora de seleccionar los combustibles y la tecnología de producción.

Para el caso particular de las centrales térmicas de generación de energía eléctrica a partir de carbón, una de las tipologías más comunes en todo el planeta, el objetivo fundamental que se pretende alcanzar desde hace ya varias décadas es el incremento de la eficiencia térmica. Los motivos para ello son varios, describiéndose los mismos a continuación, así como el contexto en el que se encuadran.

Una eficiencia alta mejorará el aspecto económico (ya que implica disminuir la cuantía de combustible usado), y además también recortará el porcentaje de emisiones causadas a partir de los gases de efecto invernadero por unidad de energía generada, colaborando de esta forma a rebajar la afectación en el medio ambiente.

Las investigaciones para conseguir un aumento en la eficiencia han estado siempre presentes en la industria. Se puede llegar a una eficiencia del 47-49% utilizando carbón y a una eficiencia superior al 60% utilizando gas natural (siempre contando con las técnicas de vanguardia de producción de energía eléctrica partiendo de recursos fósiles). Sin embargo, dada la producción de elevadas cantidades de gases contaminantes como SO₂, NO_x y CO₂, se está valorando cada vez más la búsqueda de fuentes de energía alternativas en las cuales exista una rentabilidad económica asociada a los materiales requeridos para su puesta en marcha.

Aun así, es de destacar el predominio existente dentro de la producción de energía eléctrica a escala mundial de las factorías con suministro de combustibles fósiles (más de un 65% del total), representando en este caso el carbón un 40% de todas ellas. En este contexto, los niveles medios de eficiencia alcanzada dependen de factores como el proceso tecnológico, la riqueza del combustible utilizado y la vida útil de las instalaciones. Los valores alcanzados en este sentido se sitúan en eficiencias del 33% para centrales térmicas de gas natural y carbón.

A pesar de sus evidentes desventajas con respecto a las energías renovables en el aspecto medioambiental, la demanda de combustibles fósiles para producir electricidad aumenta cada año. En 2022, China se erigió como el país del mundo con mayor consumo de carbón, unos 4.250 millones de toneladas, con la India y EE. UU. en segundo y tercer lugar, con consumos en torno a los 1.103 y 898 millones de toneladas respectivamente¹.

¹ IEA (International Energy Agency – Agencia Internacional de la Energía AIE), <https://www.iea.org/reports/coal-2022/executive-summary>, accedido en marzo 2023.

A ello contribuye el hecho de que las centrales térmicas de carbón pulverizado son relativamente simples de construir y operar, pero no presentan ventajas ambientales, incluso aunque lleven plantas de desulfuración de gases.

Las centrales térmicas que utilizan combustibles fósiles y producen vapor en el proceso operan siguiendo un ciclo termodinámico de Rankine. Se trata de un ciclo que presenta una menor eficiencia en condiciones subcríticas (del orden de un 38%), con lo que las estrategias para aumentar la eficiencia térmica pasan por incrementar la presión y temperatura del vapor de agua cuando éste accede a las turbinas de vapor. Para ello se han de dar condiciones supercríticas e incluso ultrasupercríticas, lo cual implica necesariamente una mejora en la calidad de los materiales que forman las partes de las turbinas para resistir los requerimientos extremos de presión y temperatura.

La Directiva de Emisiones Industriales (2010/75/UE) no hizo sino refrendar la necesidad de conseguir eficiencia y reducción de emisiones al asignar límites con más restricciones desde 2016 para las instalaciones ya operativas, lo cual hace necesaria la ejecución de cuantiosas mejoras extra a nivel medioambiental. Ello supone que no más tarde de diciembre del año 2023 está declarado el cierre de unas 365 centrales térmicas de carbón en España², lo que da idea de la importancia de la problemática medioambiental y la necesidad de conseguir rangos de explotación supercríticos y ultrasupercríticos donde la eficiencia es maximizada y el impacto ambiental reducido.

Esto implica que los materiales utilizados en la fabricación de componentes de las centrales de producción de electricidad que operan en esos rangos deben soportar condiciones muy desfavorables, por un lado, en lo referente a resistencia mecánica y por otro en lo referente a resistencia frente a la oxidación provocada por el vapor.

Los componentes más importantes de este tipo de centrales que se ven afectados por las condiciones extremas del vapor de agua se localizan en tuberías principales, tuberías de la caldera, además de carcasas, álabes y rotores de las turbinas de vapor. Dichos materiales deben tener propiedades mecánicas tales como la resistencia a la fluencia en caliente y a la fatiga.

² Fernández Montes Y., “La Directiva de Emisiones Industriales y las Centrales de Carbón en España”, Cuadernos de Energía, pp.156-163, 2016.

En este sentido, los aceros ferrítico-martensíticos han demostrado un buen comportamiento en temperaturas del entorno de los 650°C. En lo que respecta a la resistencia frente a la oxidación al vapor, se ha observado que se forman capas de óxidos con bajo grado de protección, lo cual hace que el uso de estos aceros está más limitado; es aquí cuando se utilizan recubrimientos, como por ejemplo el slurry de aluminio, para mejorar este tipo de propiedades.

En la presente tesis se pretenden analizar los diferentes impactos ambientales generados por las centrales de producción de energía mediante vapor de agua que operan en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas en función de los materiales empleados para sus componentes, analizando de forma detallada los recubrimientos utilizados en dichos materiales. Con ello se obtendrán conclusiones útiles acerca de los materiales y recubrimientos con mejor comportamiento en los rangos de operación, generando a la vez el impacto ambiental mínimo, lo cual representa un paso importante a la hora de justificar la selección de las configuraciones óptimas. La metodología empleada será el ACV (análisis de ciclo de vida), que constituye el método más utilizado para la determinación de los impactos ambientales correspondientes a las etapas del ciclo de vida.

El desarrollo de la tesis se basa por tanto en tres pilares fundamentales, los cuales serán comentados en apartados posteriores:

- La búsqueda de la mayor eficiencia energética posible mediante el empleo de condiciones de operación supercríticas y ultrasupercríticas en centrales térmicas de generación de energía eléctrica a partir de carbón. Dichas condiciones optimizarán el empleo de combustible y facilitarán la reducción de emisiones contaminantes.
- La selección de materiales y recubrimientos que sean aptos para las mencionadas condiciones de operación, en cuanto a resistencia mecánica y resistencia frente a la corrosión por oxidación con vapor de agua.
- El estudio de los materiales y recubrimientos anteriores desde un punto de vista medioambiental mediante la metodología del ACV con el fin de determinar cuáles provocarán los menores impactos ambientales. Esto supondrá la obtención de la configuración medioambientalmente más ventajosa.

A continuación, se detallarán los objetivos específicos que se pretenden conseguir con el desarrollo de la presente tesis.

1.1.- Objetivo

Como principal objetivo en el presente proyecto es ejecutar un análisis medioambiental comparativo en función del uso de aceros y recubrimientos/tratamientos superficiales específicos para las turbinas de vapor supercrítico. Los sustratos designados son los aceros ferríticos P91, P92, VM12 y los aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321. Los recubrimientos y tratamientos superficiales empleados consisten en recubrimientos de slurry de aluminio, recubrimientos de NiCr (depositados mediante proyección térmica – HVOF) y recubrimientos de CrN/NbN (depositados por pulverización catódica – HiPIMS, y deposición física en fase vapor-PVD). Con esta finalidad se llevará a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV), en primer lugar, de los sustratos utilizados con los equipos considerados y los recubrimientos/tratamientos superficiales empleados para dichos materiales, realizando seguidamente el ACV comparativo de cada una de las configuraciones posibles.

En la realización de los estudios ha sido empleado el programa informático SimaPro, incluyendo diferentes metodologías de análisis de ciclo de vida de cara a obtener una orientación hacia la estimación de las distintas clases de impacto. Se han utilizado las bibliotecas de datos existentes en el mencionado programa.

En consecuencia, las principales tareas desarrolladas en la presente tesis se resumen a continuación:

- Explicación del procedimiento de Análisis de Ciclo de Vida (ACV).
- Exposición de los fundamentos teóricos sobre los aceros considerados en el estudio, así como de los recubrimientos y tratamientos superficiales considerados.
- Realización del Análisis de Ciclo de Vida enfocado en procesos unitarios de los aceros, recubrimientos y tratamientos superficiales
- Estudio comparativo para los ACV asociados a cada tipo de configuración para cuantificar los impactos medioambientales asociados.

Una vez ejecutadas dichas tareas, y mediante la observación de las categorías de impacto incluidas para las metodologías empleadas para la evaluación del análisis de ciclo de vida, se estará en disposición de determinar cuáles son los procesos unitarios y los componentes de cada material causantes de un impacto específico.

Al mismo tiempo que se podrá determinar qué impacto en concreto implica unos efectos más perjudiciales para el medio ambiente.

Este análisis contribuirá para proponer una selección de materiales que se base en principios de sostenibilidad medioambiental, contribuyendo así a reforzar la importancia de la variable medioambiental entre las evaluadas a la hora de seleccionar un material para una aplicación industrial específica.

Se pretende por tanto emplear aceros y recubrimientos que dispongan de las propiedades físico-químicas y características intrínsecas necesarias para formar parte de una turbina de vapor supercrítico, dando una orientación acerca de qué configuración provoca un impacto menos nocivo a nivel medioambiental, en función de los daños que provoca a la salud humana, a los ecosistemas y en la medida en que contribuye al agotamiento de recursos.

A continuación, se pasan a comentar las consideraciones más importantes relativas a temas energéticos, a los materiales y recubrimientos empleados, y a los aspectos medioambientales involucrados.

1.2.- Consideraciones energéticas

De un modo genérico puede definirse la generación de energía eléctrica como la transformación de algún tipo de energía (cinética, química, térmica, lumínica, nuclear, solar...), en energía eléctrica. A nivel industrial, con el fin de conseguir la generación de dicha energía existen las centrales eléctricas; estas centrales son las instalaciones donde tiene lugar alguna de las transformaciones mencionadas, constituyendo el punto de partida para el suministro eléctrico.

En las centrales eléctricas se obtiene energía mediante los generadores eléctricos, igualmente denominados “alternadores”, debido a que es alterna la corriente que se produce. Entran en funcionamiento por medio de máquinas motrices, conocidas como “motores primarios”, los cuales entran en movimiento debido a las diferentes formas de energía existentes. El sistema “motor primario-generador” recibe el nombre de “grupo”. Lo que marca la distinción entre las centrales existentes radica en el combustible usado, es decir, la diferencia la marca la energía primaria (permite el movimiento de los motores primarios), la cual después de una serie de modificaciones se convertirá en energía eléctrica. A modo ilustrativo, para el caso de las centrales eólicas es utilizada la fuerza del viento (energía primaria) con el fin de generar electricidad por medio de las palas de los aerogeneradores (motor primario).

Por ello, una posible ordenación general para las plantas de generación de energía eléctrica en función de las materias primas utilizadas sería:

- **Centrales nucleares:** disponen de un reactor nuclear, donde se producen de forma controlada reacciones de fisión controlada. Al elemento que se fisiona se le denomina combustible nuclear; generalmente se usa uranio porque se trata de un elemento muy inestable, así como fácil de romper. El calor producido por el combustible nuclear es usado, mediante el empleo de ciclos termodinámicos convencionales, para provocar el desplazamiento de una serie de alternadores que convierten este trabajo de origen mecánico en energía eléctrica. Las centrales nucleares pueden constar de varios reactores. Se debe prestar atención al blindaje que rodea al reactor ya que absorbe la radiactividad que se emite en forma de radiación alfa, beta, gama o neutrones.

- **Centrales térmicas:** aprovechan el calor generado en la combustión de la materia prima, por lo general materias primas de origen fósil como gas natural, carbón, petróleo, así como sus subproductos (gasoil, gasolina, fueloil...), o biomasa. Su localización está en función de la proximidad a fuentes de combustible o a entornos productivos. Mediante el vapor de agua o el gas obtenido en el proceso de combustión se produce el movimiento de la turbina, existiendo según ello turbinas de gas y de vapor.
- **Centrales hidráulicas:** también conocidas como “centrales hidroeléctricas”. Por lo general, inicialmente el agua está acumulada (en un embalse o presa, por ejemplo) y posteriormente se encauza y dirige de forma controlada en dirección a la turbina. Esta fase hace que se produzca una energía cinética que pone en funcionamiento turbinas hidráulicas (como, por ejemplo, las turbinas de hélice, tipo Kaplan, tipo Francis, tipo Pelton...). Para esta tipología de instalaciones, la rentabilidad asociada suele ser alta si las precipitaciones de la zona son lo suficientemente propicias. Los costos preliminares suelen ser altos, si bien cuando la central está operativa el desembolso económico necesario para explotarla y mantenerla es mucho más bajo. La localización de la instalación se encuentra en función de la estructura y propiedades del suelo.
- **Centrales eólicas:** su actividad se rige a partir de la explotación del viento o las corrientes de aire. En este caso, la energía mecánica del viento se convierte en energía eléctrica mediante el movimiento de las palas de aerogeneradores, las cuales actúan sobre un equipo generador.
- **Centrales solares:** este tipo de instalaciones aprovechan el flujo luminoso y térmico que proviene del astro solar, consiguiendo su transformación en electricidad por medio de la utilización de tecnologías diversas como la solar fotovoltaica o la solar termoeléctrica. En función de la tecnología utilizada se emplearán unos u otros equipos para la captación de la energía: placas solares, células fotovoltaicas, etc...La energía solar térmica suele aprovecharse para reducir el consumo de las energías convencionales mediante apoyo en la generación de calor para agua caliente sanitaria u otros usos domésticos en los bloques de viviendas.
- **Otro tipo de centrales que utilizan energías renovables:** mareomotrices, geotérmicas, hidrotérmicas...Se trata de centrales minoritarias, dado el difícil aprovechamiento de este tipo de fuentes de energía debido a consideraciones relativas a la complejidad de construcción de las infraestructuras necesarias, así como a la no disponibilidad de un modo constante y predecible de la forma de energía en sí.

Ligados a la generación de energía eléctrica se encuentran asociados los conceptos de transporte y distribución, actividades fundamentales para poder llevarla a cualquier lugar del planeta donde exista población. Las redes de transporte y distribución permiten desplazar la energía desde el punto de generación hasta el usuario final.

En lo que se refiere a las plantas que producen electricidad utilizando como materia prima el carbón, se detalla seguidamente su forma de funcionar y los componentes principales que intervienen en cada una de las etapas³ asociadas al proceso de generación:

1. La materia prima es sometida a combustión en una caldera y el flujo calorífico que se produce se traslada al agua desmineralizada, la cual es aportada desde el exterior. El proceso de combustión requiere de un comburente, para lo cual se aporta aire al proceso, actuando el oxígeno como comburente.

2. Según va subiendo el agua a través de la red de tuberías ubicadas en la caldera, esta agua recibe energía calorífica y se convierte en vapor de agua de alta presión.

3. A continuación el vapor atraviesa una serie de conducciones, alcanzado las palas (álabes) de una turbina de vapor y haciendo que se muevan a mucha velocidad, con lo cual se produce una energía mecánica a partir de la rotación.

4. Mediante la conexión de la turbina a un generador por un eje se produce la electricidad a partir de la rotación. En las centrales eléctricas se utilizan alternadores puesto que la corriente que se genera es alterna.

5. Cuando el vapor de agua abandona la turbina es enfriado y condensado para retornar a fase líquida. Esto se produce en un condensador. Esta agua líquida pura se encuentra dentro de un circuito cerrado que acaba retornando de nuevo a la caldera. Es en este momento cuando tiene lugar el aprovechamiento del calor residual de cara a contribuir en el ahorro de energía en la nueva conversión del agua en vapor. El agua que se utiliza es la misma en esta etapa.

³ García Garrido S., Ratia Gómez P., Perea Samper J., “Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado”, Díaz de Santos, pp. 16-22, 2008.

6. Con el fin de condensar el vapor de agua a fase líquida se emplea agua de refrigeración de aporte externo (a menudo de un mar o río cercano a la planta de producción de energía); esta agua es refrigerada a través de unas torres de refrigeración, y una vez cumplida su función, es devuelta a la fuente de su suministro.

Los valores nominales de tensión de generación de la corriente eléctrica se encuentran alrededor de los 20.000 V. Después, mediante el uso de transformadores se incrementa ese voltaje hasta los 400.000 V para su transporte hacia los consumidores.

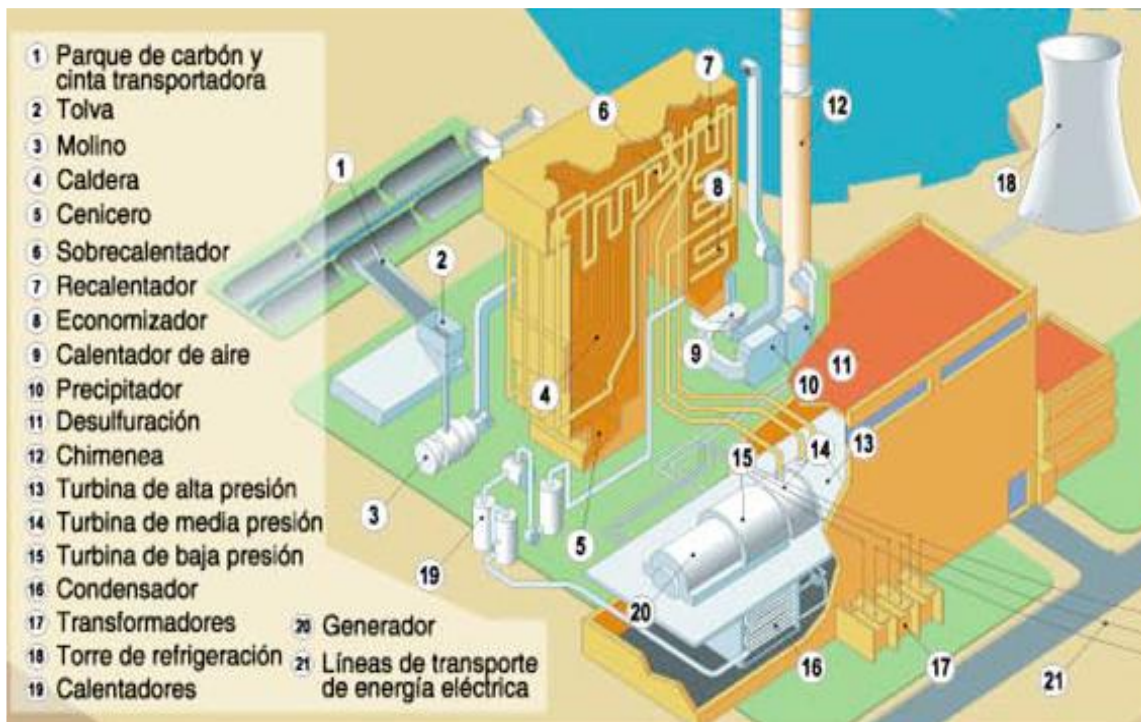


Figura 1: Componentes de una central térmica convencional de carbón.

Fuente: AELEC⁴

En lo que se refiere a las condiciones de operación (presión y temperatura) que pueden observarse en esta tipología de plantas de producción, se comenta la evolución que han sufrido las mismas a lo largo de las últimas décadas⁵, donde ha tenido lugar un continuo incremento de los valores de P y T en búsqueda de la mayor eficiencia posible, teniendo en cuenta los desarrollos de la tecnología y los materiales a emplear:

- Condiciones subcríticas: se sitúan en el entorno de los 560°C y 17 MPa. Corresponden al periodo anterior al año 1990.

⁴ AELEC (Asociación de Empresas de Energía Eléctrica), <https://aelec.es/>, accedido en marzo 2023

⁵ Valdés M., “*Futuro de los ciclos termodinámicos: Estrategias para un suministro sostenible de energía eléctrica*”, Departamento Ingeniería Energética y Fluidomecánica, ETS Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.

- Condiciones supercríticas: se sitúan en el entorno de los 600°C y 30 MPa. Estas condiciones permiten aumentar el rendimiento hasta aproximadamente el 45% y reducir las emisiones de CO₂ de un 10% a un 15%. A partir de la década de 1990 empiezan a verse avances para alcanzar este tipo de condiciones.

- Condiciones ultrasupercríticas: se sitúan en el entorno de los 700/720°C y 37,5 MPa, lo que permitiría alcanzar rendimientos del orden del 55%. Se trata de la tendencia actual. En países de la OCDE, el 85% de las plantas de construcción reciente pertenecen a la tecnología supercrítica, de las que una gran parte se encuentra en Alemania y Dinamarca⁶.

Otro factor a tener muy en cuenta, como ya se ha señalado, en la viabilidad y desarrollo de centrales de generación eléctrica corresponde a las emisiones de gases como CO₂, SO₂, NO_x a la atmósfera. Este punto deberá ser tenido en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología a emplear.

En la actualidad una tecnología muy desarrollada son las centrales de ciclo combinado, en las que se produce electricidad mediante los ciclos termodinámicos de Joule y Rankine a través de turbinas de vapor y turbinas de gas. El calor que no se aprovecha en el ciclo correspondiente a la turbina de gas se utiliza como suministro del ciclo agua-vapor que provee a la turbina de vapor. Con este mecanismo, los gases de escape correspondientes al ciclo de la turbina de gas, que se encuentran a alta temperatura, ceden la energía requerida para posibilitar la actividad del ciclo de vapor. Esta tecnología permite alcanzar rendimientos más elevados y produce menos emisiones de NO_x, pero depende de la disponibilidad de grandes volúmenes de gas natural.

Otra opción estudiada en la actualidad para generar menores emisiones radica en el empleo del oxígeno en vez de aire para producir la combustión del carbón, lo que se conoce como la oxicomustión⁷. Sin embargo, las elevadas inversiones requeridas para este tipo de instalaciones, así como la gran cantidad de energía requerida para separar el nitrógeno y oxígeno del aire (que puede reducir la eficiencia global) frenan su desarrollo.

⁶ Pelegrina Tarancón J., “*Optimización del funcionamiento de los equipos auxiliares en una planta de Ciclo Combinado durante la operación del turbogrupo desacoplado de la red*”, Departamento de Ciencias e Ingeniería Náutica, Facultad de Náutica, Barcelona, Universidad Politécnica Catalunya, 2016.

⁷ Cascón Díaz L., “*Estudio de la comparativa de las tecnologías de captura de CO₂ en oxicomustión*”, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Sevilla, septiembre 2012.

Existen también centrales de producción de energía mediante vapor de agua que utilizan biomasa de combustible en vez del carbón, lo que supone el empleo de una fuente de energía renovable. Sin embargo, el coste y la disponibilidad de las energías renovables hacen que su uso esté limitado.

Con el fin de favorecer la generación de electricidad se continúan empleando combustibles fósiles a los que se les une un tratamiento final de gases de combustión para reducir las emisiones al nivel más bajo posible.

No obstante, como hemos visto, en el marco comunitario europeo se han ido sucediendo diversas normativas de carácter ambiental que han bajado cada vez más los límites de emisión autorizados para SO_2 , NO_x y partículas en instalaciones generadoras de energía eléctrica a partir de recursos fósiles.

Ello ha impulsado la aplicación de una serie de inversiones en procesos para adaptar las instalaciones, se han podido disminuir los niveles de emisión para estas centrales a cifras que rondan el 33%, 19% y 7% en relación a SO_2 , NO_x y partículas del sumatorio de cada país.

No obstante, los continuos requerimientos de reducir los niveles de emisión combinados con la necesidad de una producción eléctrica estable para garantizar la disponibilidad energética en condiciones competitivas y utilizando los recursos existentes, hacen que las centrales térmicas que utilizan carbón pulverizado en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas sigan estando presentes en el panorama energético mundial actual.

1.2.1.- Antecedentes del tema

La búsqueda de la mejora de la eficiencia energética ha sido una constante desde tiempos de la Revolución Industrial. En aquellos tiempos, la máquina de vapor diseñada por James Watt en el año 1765 supuso ya una mejora con respecto al primer prototipo efectuado por Thomas Newcomen: el hecho de que condensador y cilindro fueran independientes solucionó la disipación de flujo calorífico originada por la condensación de vapor en un cilindro de un motor Newcomen trabajando⁸. Por tanto, el motor Watt consiguió una eficiencia superior al Newcomen, con menor cuota de consumo de carbón y una cantidad de trabajo equivalente.

A partir del año 2000, se empezaron a desarrollar programas de I+D con el objeto de estudiar y mejorar técnicas de componentes con el fin de construir tanto turbinas como calderas que pudieran funcionar en condiciones de vapor supercrítico avanzado para plantas alimentadas de carbón pulverizado. Entre dichos proyectos destaca la participación de EEUU, por ejemplo, en el DOE/OCDO Advanced Materials for Ultrasupercritical Coal-Fired Boilers Project, el cual se trataba de un programa de investigación y desarrollo con un presupuesto de cincuenta millones de dólares para la búsqueda de materiales que operasen en condiciones supercríticas. El departamento de Energía de EEUU (DOE), por medio del Laboratorio Nacional de Tecnología Energética (NETL), fueron los socios fundadores del proyecto, apodado A-USC (ultrasupercrítico avanzado) boiler. Consistía en llegar a temperaturas de vapor lo más elevadas posibles, para lo que se procede a reunir a los proveedores más cualificados de turbinas y calderas. Se debe tener en cuenta que el carbón en USA por lo general tiene un contenido mayor en azufre y humedad que el que se utiliza en el continente europeo, a la hora de comparar este proyecto con otros proyectos europeos. El proyecto americano se interesa por aleaciones con mayor resistencia frente a la corrosión que aquéllas que emplean recubrimientos o tratamientos superficiales.

Las partes de las plantas donde se realizaron los estudios se dividieron en las siguientes: las tuberías de caldera, los tubos de recalentador/sobrecalentador y los paneles de la pared de agua.

⁸ Baracca A., *“El desarrollo de los conceptos energéticos en la mecánica y la termodinámica desde mediados del siglo XVII hasta mediados del siglo XIX”*, LluL: Revista de la Sociedad Española de historia de las Ciencias y de las Técnicas, vol. 25, pp. 305-308, 2002.

Los requisitos genéricos de inicio para una factoría A-USC indican que debe poseer una resistencia a fluencia con rotura para 100.000 horas y 14.500 psi o más.

Los aceros austeníticos cumplen con el requerimiento de soportar temperaturas de rango intermedio, si bien sus propiedades físicas (escasa conductividad térmica y así como gran expansión térmica) establecen limitaciones a la hora de utilizarlos. Se ha comprobado que las superaleaciones de base Ni han de utilizarse con componentes del área de mayor T y con las tensiones de mayor grado. Poseen, no obstante, mayor coste que el acero, y por tanto su utilización debe restringirse a las partes clave. Se deben tener en cuenta entonces diversos factores: características mecánicas, oxidación de la parte del vapor, corrosión de la parte de combustión, factibilidad de fabricación...

Se trabajó con los cuatro fabricantes de caldera más importantes a nivel mundial (Riley Power, Alstom Power, Babcock and Wilcox, Foster Wheeler), se desarrollaron diseños conceptuales para calderas de 750 MW y se establecieron los diagramas de equilibrio térmico. También se calcularon dimensiones para tuberías, cabezales y tubos de vapor. Con la suposición de temperaturas, se escogieron materiales para distintas secciones de la caldera. Las conclusiones fueron que una factoría con vapor a 1400° F (760° C) podría llegar a una eficiencia térmica en torno al 45 % con recalentamiento simple y sobre el 47 % para recalentamiento doble, generando un ahorro frente a plantas operando en condiciones subcríticas de 16.5 millones de dólares anuales para costes de operación, y 330 millones de dólares en una vida útil de planta de producción de energía de 20 años. Una eficiencia más elevada significa menores emisiones de CO₂ (aproximadamente un 30%), con lo que podría obtenerse un ahorro de 20 dólares por tonelada CO₂ que no se ha formado, siendo este coste menor que el de tecnologías de captación y almacenamiento de CO₂⁹.

Esta reducción de emisiones de CO₂, SO₂ y NO_x es una de las ventajas que lleva consigo el aumento de la eficiencia¹⁰, además de los aspectos económicos antes comentados, de ahí la aparición de multitud de programas de investigación para el desarrollo de materiales que soporten condiciones extremas de presión y temperatura.

⁹ Visnawathan R., Purgert R., Shingledecker J., "Evaluating materials technology for advanced ultrasupercritical coal-fired plants", Power 154(8), pp. 41.45, enero 2010.

¹⁰ Zhang D., "Ultra-Supercritical Coal Power Plants. Materials, Technologies and Optimisation", Woodhead, pp. 1-20, 2013.

Otro motivo para el desarrollo de este tipo de centrales de producción de electricidad es la abundancia que tiene el carbón en el panorama actual y en el medio-largo plazo. Se estima que existen reservas del orden de 900.000 millones de toneladas de carbón para todo el planeta (con una previsión de consumo en torno a 130 años), siendo EEUU, Rusia, Australia y China los países con mayor presencia de este combustible fósil. Asimismo, la importancia del carbón en la generación eléctrica a nivel mundial es muy destacada, con un porcentaje del alrededor del 40%. La generación de electricidad con carbón, a la que se atribuye el 72% de las emisiones con potencial de contaminar en lo que respecta al ámbito de la electricidad, repuntó en 2017 después de haber descendido en los tres años anteriores, ha indicado la Agencia Internacional de la Energía (AIE). Esta tecnología de generación eléctrica, según la AIE, puede considerarse como una técnica que no está alineada con los objetivos de cambio climático. De ahí que se deban potenciar los estudios que redunden en beneficios medioambientales asociados a este tipo de entornos.

1.2.1.1.- Ciclos termodinámicos de vapor

La generación eléctrica por medio de combustibles fósiles conlleva varios pasos que se tratarán de esquematizar a continuación. Estos pasos consisten en una sucesión de procesos de transformación para convertir la capacidad calórica del carburante en electricidad. Es durante dichas transformaciones donde tienen lugar las pérdidas de energía que conllevan la disminución de la eficiencia del proceso global. Se detalla en el presente apartado el fundamento termodinámico asociado a dichos procesos.

En las plantas termoeléctricas habituales, se quema el combustible en caldera; eso produce un flujo térmico usado con el fin de darle calor al agua; dicha agua es convertida en vapor a muy alta presión. A continuación, el vapor hace permite la rotación de la turbina, transformando la energía calorífica en energía de tipo mecánico para, seguidamente, transformarse en electricidad mediante un alternador. La energía eléctrica eleva su tensión mediante un elemento transformador para permitir su transporte minimizando pérdidas debido al efecto Joule. El vapor que abandona la turbina normalmente es enviado a un condensador con el fin de volver a transformarlo en agua y retornarlo a la caldera con el fin de comenzar otra vez el ciclo de producción de vapor.

El modo en que operan las plantas de producción de energía termoeléctrica habituales es similar con independencia del combustible usado (ya se han descrito el funcionamiento de las plantas que operan con carbón). No obstante, hay variantes en lo que se refiere a la forma de tratar al combustible antes de utilizarlo, así como a las características constructivas de los quemadores en las calderas. Es por ello por lo que en las centrales de carbón se hace un triturado con carácter previo de dicho carbón. Para el caso del fueloil, el combustible es calentado; para el caso del de gas natural, no se requiere el almacenamiento del combustible al llegar de forma directa a través de gasoductos.

La caldera y la turbina de vapor son los elementos principales de este tipo de centrales.

En la caldera tiene lugar la transferencia de calor del combustible utilizado al agua del circuito de refrigeración a alta presión, generando un vapor sobrecalentado. En este primer proceso existen pérdidas energéticas, debido a combustiones incompletas, retención de calor e inquemados, así como a pérdidas inherentes a la radiación y convección.

En el siguiente paso, se aprovecha la entalpía asociada al vapor sobrecalentado de alta presión mediante la expansión del vapor en la turbina. Se observan las propiedades asociadas a un ciclo termodinámico para agua-vapor. El ciclo del agua-vapor se considera como un ciclo cerrado porque el fluido, partiendo de un estado inicial y experimentando una sucesión de conversiones, revierte al final a su estado original.

Como fundamento teórico del paso anterior encontramos el denominado Ciclo de Carnot, en referencia a Sadi Carnot (1796-1832). Este ingeniero francés estudió minuciosamente la manera de operar de una máquina de vapor para obtener conclusiones acerca de cómo obtener la mayor potencia posible con la mayor eficiencia permitida. El Ciclo de Carnot tiene lugar en el momento que un equipo que necesita para trabajar el poder absorber una cantidad de calor Q_1 procedente de una fuente de alta temperatura, transfiere un calor Q_2 a la de baja temperatura generando un trabajo que afecta el exterior; se compone de 2 transformaciones de carácter isotérmico (temperatura constante) y dos de carácter adiabático (sin intercambio calorífico). El rendimiento es más alto que para toda máquina que trabajando de forma cíclica con fuentes de temperatura iguales. Es posible invertir el ciclo al tratarse idealmente de transformaciones reversibles.

INTRODUCCIÓN

Por tanto, la máquina extrae flujo calorífico de la fuente fría y transfiere flujo calorífico a la fuente caliente, debiendo aportar trabajo a la máquina. En el caso de que la finalidad de la máquina sea extraer calor de la fuente fría recibe el nombre de máquina frigorífica, y en caso de que sea ceder calor a la fuente caliente, bomba de calor.

Las conversiones que forman el ciclo de Carnot, que utiliza un gas considerado ideal, se muestran sobre un diagrama expuesto más adelante y son las siguientes:

- Expansión isoterma (de 1 a 2): el gas adquiere un flujo de calor Q_1 conservando T del foco caliente T_1 .
- Expansión adiabática (de 2 a 3): el gas se enfría sin perder calor hasta la T del foco frío T_2 .
- Compresión isoterma (de 3 a 4): el gas transfiere calor Q_2 a foco frío, sin cambio de T .
- Compresión adiabática (de 4 a 1): el gas se calienta hasta la T del foco caliente T_1 , completando el ciclo.

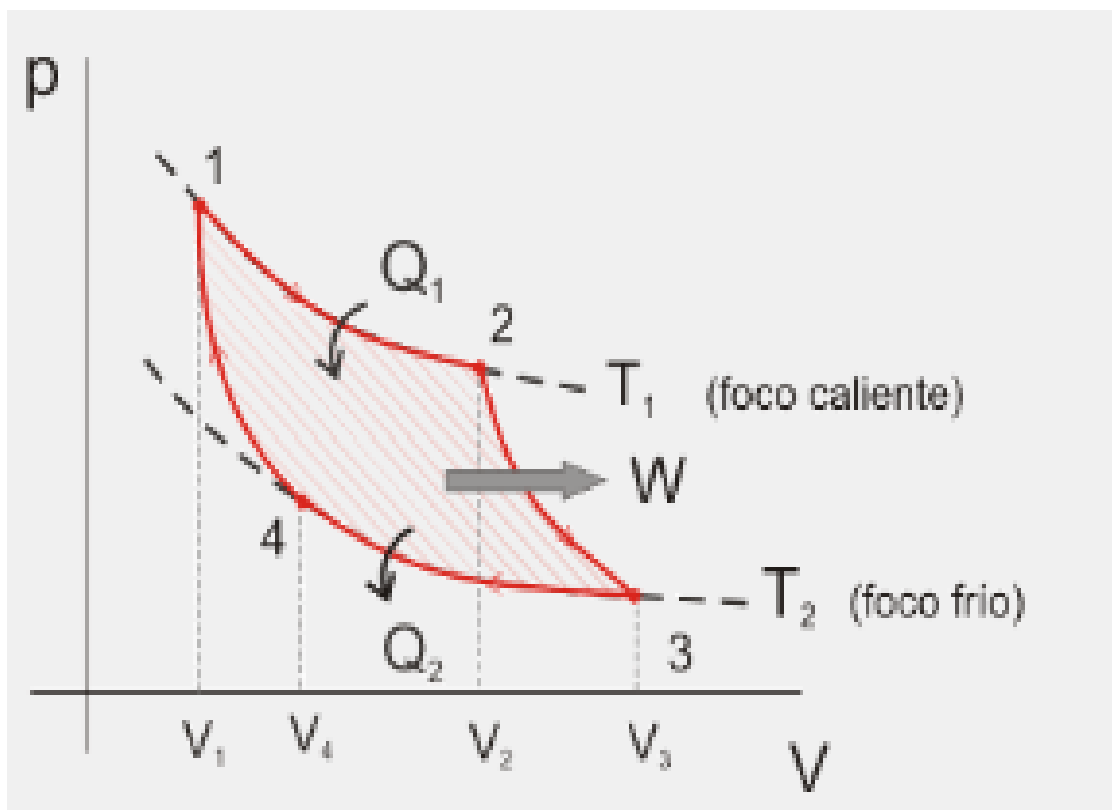


Figura 2: Diagrama P-V (presión – volumen) del ciclo de Carnot, T (temperatura) en isóneas.

Fuente: Sears F.W.¹¹

¹¹ Sears F.W., Salinger G.L., “Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística”, pp. 129-132, Reverté, 1980.

En términos de rendimiento, se ha de tener en cuenta que no es factible que el rendimiento del ciclo agua-vapor sea mayor que el rendimiento más alto que podría conseguir un ciclo de Carnot ideal, lo que hace que no sea posible que se consigan rendimientos mayores al 65% en el caso de temperaturas de vapor entorno a los 660°C.

El ciclo de Carnot, si bien puede considerarse el más ventajoso en términos termodinámicos, no es posible de cumplir, debido a lo que se expone a continuación:

- Es imposible ejecutar expansiones/compresiones isoentrópicas, puesto que siempre existe rozamiento en el sistema paredes de máquina/fluido, lo cual hace que la entropía se vea incrementada en el proceso
- Las transferencias de calor isotermas son imposibles también, puesto que desde un punto de vista práctico no pueden utilizarse fluidos que únicamente experimente cambio de fase en el ciclo (los fluidos al cambiar de fase generan subenfriamientos y sobrecalentamientos), con lo que el fluido verá disminuido su punto de fusión incluso en fase gas o aumentará dicho punto incluso cuando se encuentre en estado líquido.

En la práctica se utiliza el Ciclo de Rankine como variante del Ciclo ideal de Carnot. El Ciclo de Rankine se creó por el escocés W.J.M. Rankine (1820-1872). Su propósito era conseguir una mejora del ciclo de Carnot que permitiera obtener una optimización del trabajo realizado. El Ciclo de Rankine introduce varios procesos: por un lado, se bombean los condensados a menor presión (se mete el vapor a baja presión que abandona la turbina en un condensador para que vuelva a la fase líquida), por otro lado, se absorbe calor en la zona caliente en condiciones isobáricas en lugar de isotermas. Hay varias modificaciones que elevan la eficiencia del ciclo de Rankine: vapor sobrecalentado antes de entrar a la turbina, recalentar entre fases de turbina o agua regenerada para la provisión a caldera.

La representación más habitual de los procesos que tienen lugar en un Ciclo de Rankine se plasma en un diagrama T-S (temperatura – entropía), en el que se reflejan dos procesos isoentrópicos y dos procesos isobáricos. En este diagrama, condensador y caldera funcionan asumiendo que no hay pérdidas por carga y por consiguiente tampoco caídas de presión. Los estados del ciclo se representan del 1 al 4 del diagrama que se muestra a continuación (1-vapor con sobrecalentamiento, 2-vapor húmedo o mezcla de dos fases, 3-líquido en estado de saturación, 4-líquido subenfriado).

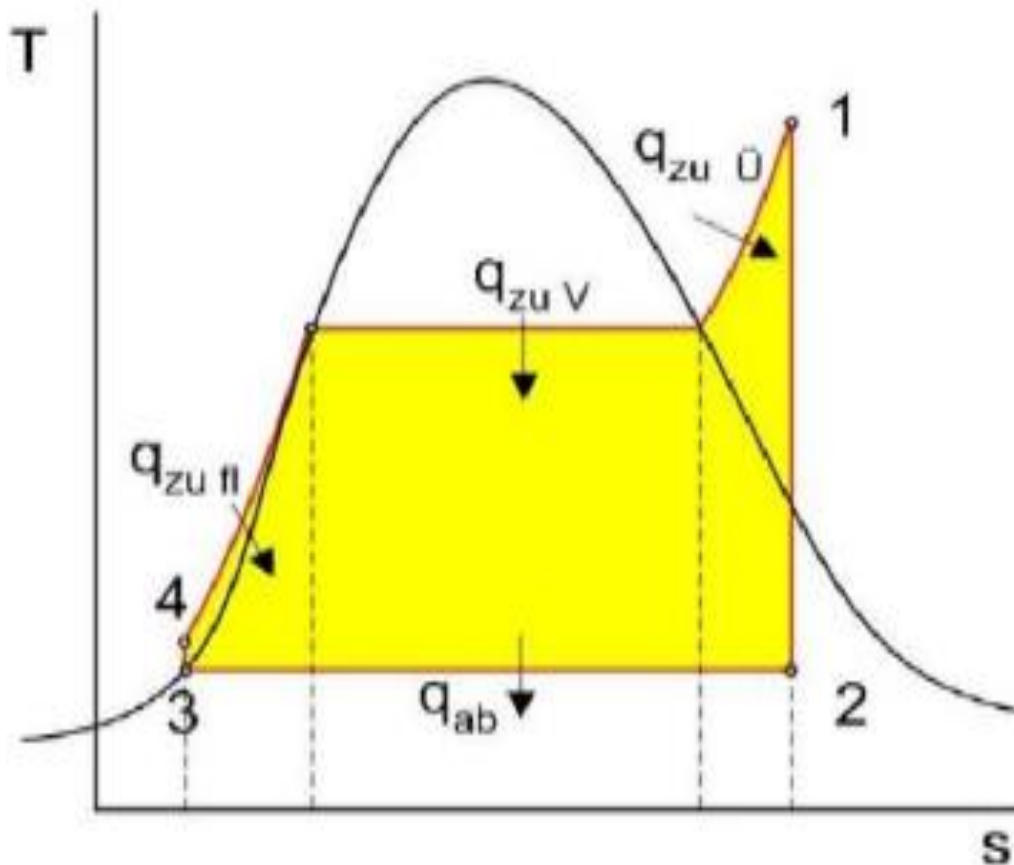


Figura 3: Diagrama T-S (temperatura – entropía) del ciclo de Rankine.
Fuente: Hougen O.A.¹²

Los procesos existentes en el caso del ciclo ideal (pueden revertirse de forma interna) se detallan seguidamente:

- Proceso 1-2: Expansión isoentrópica del fluido de trabajo en la turbina partiendo de la presión de la caldera y llegando a la presión del condensador. Se lleva a cabo en una turbina de vapor, generándose potencia localizada en el eje.
- Proceso 2-3: Se transmite calor en condiciones isobáricas desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, haciendo que el fluido de trabajo llegue al estado de líquido saturado. Se lleva a cabo en un condensador o intercambiador de calor, que en un ciclo ideal no representarían pérdidas.
- Proceso 3-4: Compresión isoentrópica del fluido de trabajo en fase líquida con una bomba, haciendo que se consuma potencia. Se eleva la presión del fluido de trabajo alcanzando el valor de presión en caldera.

¹² Hougen O.A., Watson K.M., Ragatz R.A., “Principios de los Procesos Químicos. Parte II. Termodinámica”, pp. 236, Reverté, 1982.

- Proceso 4-1: Se transmite calor dirigido al fluido de trabajo en condiciones isobáricas en la caldera. Primeramente, el fluido de trabajo es calentado adquiriendo la temperatura de saturación, después se produce el cambio de fase líquido-vapor y por último se consigue vapor sobrecalentado. Dicho vapor de alta presión es usado en la turbina de cara a producir la potencia del ciclo (en cuanto a potencia efectiva para el ciclo, en realidad se consigue restando la que consume la bomba, si bien tiende a ser despreciable en la mayoría de los casos).

Con consideraciones más realistas que las descritas anteriormente encontraríamos ciclos donde no habría procesos con isoentropía y donde sí se presentarían pérdidas de carga. Eso provocaría una disminución en la eficiencia térmica asociada al ciclo. El rendimiento isoentrópico de la turbina, en lo que se mide cuál es su posición en referencia al proceso ideal, constituye un punto clave a la hora de analizar la disminución de la eficiencia. Eso implica que las pérdidas asociadas a la bomba, condensador y caldera influyen de un modo mucho menor en la eficiencia del ciclo en comparación con lo que lo hace la turbina.

Se debe mencionar que para las plantas de producción térmica de gas es usado un ciclo similar al ciclo Rankine ideal: se trata del ciclo Brayton ideal. En este ciclo se usa un fluido de trabajo que se conserva en fase gas a lo largo del ciclo completo (esto significa que no se produce la condensación). Por otro lado, se usa un compresor en vez de utilizar una bomba.

Los equipos utilizados en plantas térmicas de gas presentan más robustez que sus homólogos de vapor y suelen utilizar habitualmente gas natural. Las dos variantes de ciclos (gas y vapor) son usados conjuntamente en las centrales de ciclo combinado, donde la energía térmica del gas natural se convierte en electricidad a través del trabajo conjunto de una turbina de gas y una de vapor. El proceso se realiza mediante la puesta en marcha de dos ciclos consecutivos: el ciclo de Brayton, que opera con la turbina de gas convencional, y el ciclo de Rankine, que corresponde con la turbina de vapor.

Con el fin de aumentar la eficiencia de un ciclo de Rankine se acrecienta el salto entálpico entre los puntos 1 y 2, que representan el trabajo que se entrega a la turbina. Los avances que son ejecutados normalmente en plantas térmicas (carbón, ciclos combinados o nucleares) se detallan seguidamente:

INTRODUCCIÓN

1) Disminución de presión en el condensador.

Con esta sistemática se reduce de forma automática la temperatura en el condensador aportando más trabajo a la turbina, así como una reducción del calor que se rechaza. El inconveniente es se incrementa la humedad del vapor, provocando que se erosionen los álabes en la turbina.

2) Acrecentar la presión en la caldera a una temperatura fija.

Al incrementar la presión lo hace también la temperatura a la cual se adiciona calor y se eleva el rendimiento de la turbina al igual que el del ciclo. El inconveniente es que se genera demasiada humedad.

3) Recalentar la temperatura a la que se entra a la turbina

Se produce el sobrecalentamiento del vapor a temperaturas elevadas con el fin de conseguir un trabajo más grande en la turbina; esto hace que la humedad disminuya. El incremento de temperatura viene condicionado por los materiales que soportan temperaturas elevadas.

4) Recalentamientos de vapor de tipo intermedio, haciendo que se expanda en pasos.

Lo que implica poseer varias etapas de turbina, alcanzando condiciones de sobrecalentamiento por medio de recalentadores y economizador. La forma escalonada en la que se produce la expansión genera los cuerpos de alta, media y baja presión de turbina.

5) Llevar a cabo extracciones de vapor en la turbina, aportando calor al agua que alimenta a la caldera, con lo que se aumenta su entalpía. No se suelen hacer más de siete extracciones, debido a que no acarrearía un aumento considerable en el rendimiento mientras que implicaría muchas dificultades desde el punto de vista técnico.

El conocimiento del fundamento teórico de todos los procesos termodinámicos que ocurren en los ciclos de vapor permite comprender la naturaleza de las pérdidas energéticas que tienen lugar en los entornos de producción, con el fin de buscar las mejores soluciones que permitan optimizar la eficiencia en cada uno de los casos.

1.2.1.2.- Importancia del carbón

La importancia de la utilización del carbón en las centrales térmicas para producir electricidad sólo puede explicarse por razones de abundancia y disponibilidad geográfica mundial. Esto ha sido así desde los comienzos de la producción de electricidad a gran escala, si bien en el horizonte se plantea una reducción en su uso, fundamentalmente en los países desarrollados debido a consideraciones medioambientales.

En la actualidad, las provisiones a nivel global de carbón son estimadas en algo más de un billón de toneladas; en concreto, en el año 2020 se estimaba que existían aproximadamente 753.000 millones de toneladas de antracita y bituminoso, así como 320.000 millones de toneladas de sub-bituminoso y lignito. La evolución de las reservas mundiales ha evolucionado al alza desde los últimos 40 años, lo cual es uno de los argumentos tradicionalmente empleados para justificar su uso, así como su mayor disponibilidad frente a otros combustibles fósiles como el petróleo y el gas natural.

Según datos del Global Electricity Review 2022 de Ember Climate¹³, en el año 2021 el carbón seguía siendo un componente importante de los suministros mundiales de combustible, representando el 36% de la generación de electricidad. Desempeña un papel crucial en industrias como el hierro y el acero. El carbón sigue estando en el centro del debate sobre la política energética y climática. Cada vez en más países, la supresión de las formas de generación eléctrica a partir de carbón se enclava en los objetivos estratégicos asociados al cambio climático, mientras que, en otros, el carbón es abundante y asequible y sigue siendo la fuente clave de electricidad. En última instancia, a pesar de que se ha prestado una atención importante de los medios a las desinversiones y alejamientos del carbón, se observa oposición a esta variación.

A finales del año 2019, la previsión asociada para la demanda mundial de carbón vaticinaba que se mantendría estable, con descensos en Estados Unidos y Europa compensados por el crecimiento en India y otros países asiáticos, aunque China, el principal actor en el mercado mundial de carbón, vería una disminución gradual de la demanda.

¹³ Global Electricity Report 2022, https://ember-climate.org/app/uploads/2022/03/SP_Report-GER22.pdf, accedido en marzo 2023.

INTRODUCCIÓN

Asimismo, en términos de la combinación energética total, se preveía que la contribución del carbón disminuiría en los próximos años, principalmente debido al crecimiento de las energías renovables y el gas natural.

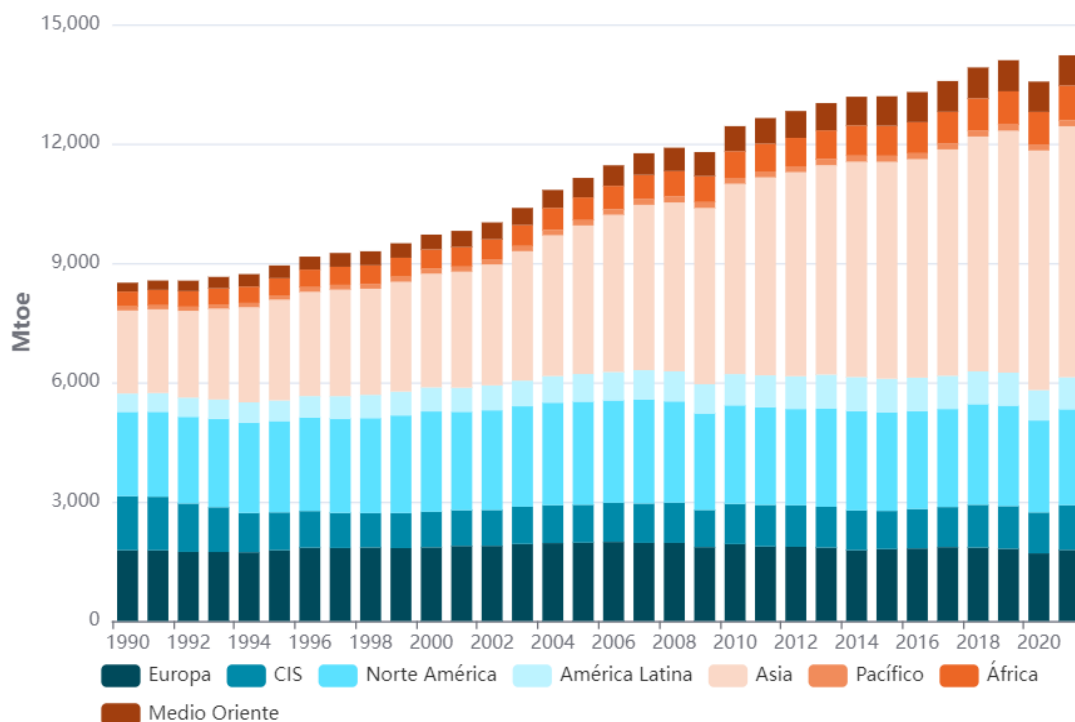


Figura 4: Evolución del consumo mundial de carbón en el periodo 1990-2021.

Fuente: <https://www.enerdata.net>, accedido en marzo 2023.

De entre los 3 combustibles fósiles utilizados comúnmente (gas natural, carbón, petróleo), corresponde al carbón la mejor tasa de reparto, lo cual explica su empleo tradicional, en particular en lo que se refiere a mejorar la industrialización en países emergentes. Además, su ratio de disponibilidad es significativamente mayor.

Según el World Energy Outlook 2019 (International Energy Agency), la demanda global del carbón asociada a un escenario energético global en expansión con políticas declaradas y establecidas al respecto implicaría que la proporción de carbón en el mix energético global disminuiría del 27% en 2018 al 21% en 2040, quedando atrás del gas natural en el proceso. El uso general de carbón en la generación de energía se preveía que disminuyera ligeramente, mientras que su uso industrial podría crecer con carácter leve.

No obstante, existen fuertes disparidades regionales en las perspectivas del carbón. En muchas economías avanzadas, la demanda de energía eléctrica por carbón se encuentra en un profundo declive estructural, acelerado por compromisos específicos de eliminación, el aumento continuo de las energías renovables, la competencia del gas natural en los Estados Unidos y los mayores precios del CO₂ en la Unión Europea. La demanda de carbón también cae en China, con mucho el mayor consumidor mundial de carbón, debido en gran parte a un fuerte impulso político para mejorar la calidad del aire. Sin embargo, en otras partes de Asia en desarrollo, los países buscan aumentar su uso de carbón para satisfacer la creciente demanda de electricidad y desarrollo industrial.

Las perspectivas para el carbón serían muy diferentes en un escenario centrado en el Desarrollo Sostenible. Con un enfoque mucho más estricto en la reducción de emisiones, el uso global de carbón disminuiría abruptamente a una tasa anual de 4.2% en el año 2040. En este año, el uso mundial de carbón sería un 60% menor que en el escenario anterior y la implicación del carbón en el mix de energía primaria caería hacia el 10%.

Una variable crucial para el futuro del carbón es la medida en que las técnicas de captación, utilización y depósito de carbono se implementan para producir energía y para la industria. Esto podría proporcionar una opción de descarbonización rentable para procesos industriales clave. Sin embargo, la cartera actual de proyectos está muy por debajo de lo que se requiere bajo el escenario de Desarrollo Sostenible para reducir las emisiones de sectores industriales clave de la economía.

Por otro lado, hay que comentar que, en lo relativo a los países miembros de la OCDE (Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos) la producción de carbón es usada fundamentalmente con el fin de generar tanto vapor como electricidad, y una reducida proporción se destina al uso en condición de combustible final (construcción, transporte) o materias primas en distintos tipos de actividad industrial (química).

Asimismo, cabe resaltar que en torno a un 85% del comercio del carbón se utiliza en el comercio interior, por el contrario, únicamente un 15% restante es usado en el comercio internacional. Para este último mercado, el 90% es llevado a cabo por vía marítima.

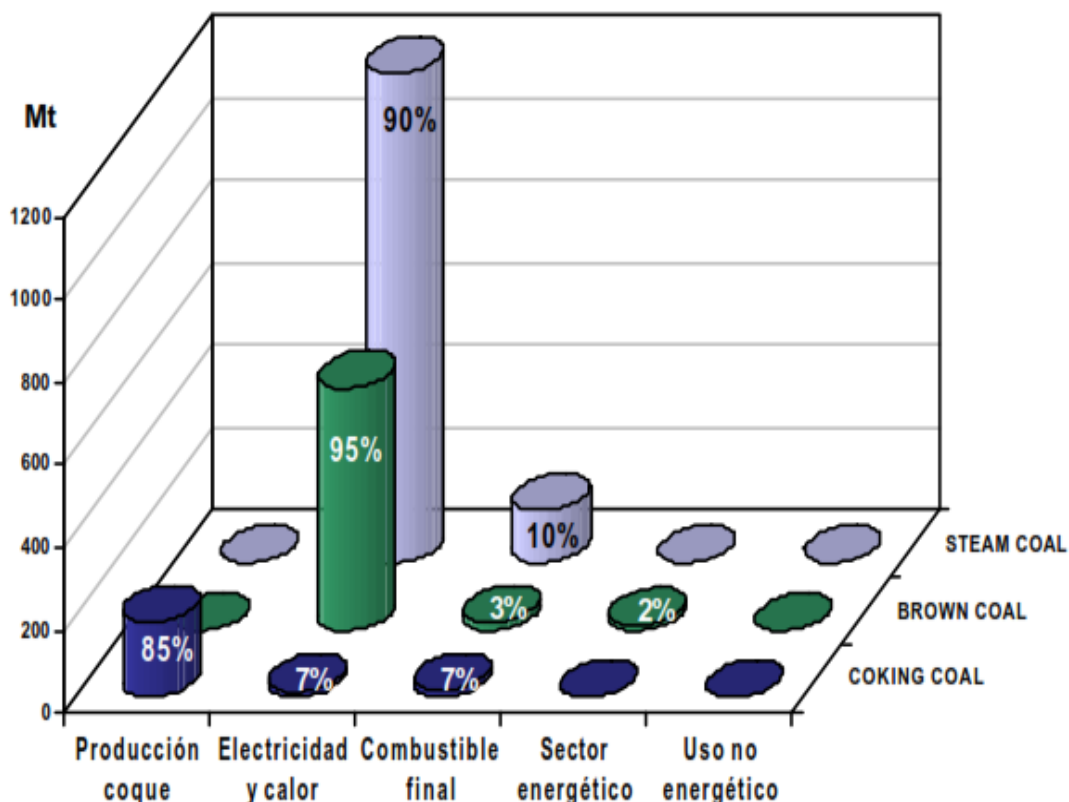


Figura 5: Consumos de carbón en función de su tipo y del sector en el que se utiliza.
 Fuente: Fernández, J.A (2003)¹⁴

El análisis de todos escenarios anteriores lleva a la conclusión de que el carbón seguirá siendo un protagonista destacado en el contexto energético global durante un futuro a medio plazo, a pesar de las iniciativas de descarbonización que se pretender llevar a cabo de acuerdo a lo requerido por los distintos acuerdos e instituciones internacionales relativos al cambio climático, como el PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) o los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible).

Por otro lado, debe mencionarse imperativamente aquí a un nuevo elemento que ha aparecido en escena: la influencia de la guerra entre Rusia y Ucrania declarada en febrero de 2022 en el contexto energético mundial. En este sentido, los países de la Unión Europea han tenido que disminuir al mínimo su dependencia de los combustibles fósiles rusos (en particular el gas), a la vez que evitaban escenarios de crisis con cortes de suministros generalizados.

¹⁴ Fernández Benítez, J.A., “Tecnologías para la Innovación en la Generación de Energía Eléctrica”, Fundación COTEC, 2003.

Asimismo, el aumento de los precios de la energía provocado por este conflicto podría llevar a situaciones de pobreza extrema 141 millones de personas más en todo el mundo¹⁵. En lo que respecta al carbón, los mercados del carbón se han visto gravemente sacudidos en 2022 por este conflicto con la interrupción de los flujos comerciales tradicionales, los precios disparados y la demanda creciendo un 1,2 %, alcanzando un máximo histórico y superando los 8.000 millones de toneladas por primera vez. A pesar de la crisis energética mundial, la perspectiva general permanece sin cambios ya que varios factores se están compensando entre sí. La invasión rusa de Ucrania ha alterado drásticamente la dinámica del comercio de carbón, los niveles de precios y los patrones de oferta y demanda. Los precios de los combustibles fósiles han aumentado sustancialmente en 2022, y el gas natural muestra el aumento más pronunciado. Esto ha provocado una ola de cambio de combustible en lugar del gas, lo que ha impulsado la demanda de opciones más competitivas en precio, incluido el carbón en algunas regiones. No obstante, los precios más altos del carbón, el fuerte despliegue de las energías renovables y la eficiencia energética, y el debilitamiento del crecimiento económico mundial están moderando el aumento de la demanda general de carbón. En China, que representa el 53 % del consumo mundial de carbón, los bloqueos prolongados y estrictos por el covid-19 han pesado mucho en la actividad económica, socavando la demanda de carbón. Al mismo tiempo, las sequías y las olas de calor en China han acelerado la quema de carbón para satisfacer un aumento en la demanda de energía para aire acondicionado. Se espera que el carbón utilizado en la generación de electricidad crezca en torno a un 2%. Por el contrario, se espera que el consumo de carbón en la industria disminuya más del 1 %, principalmente debido a la caída de la producción de hierro y acero en medio de la crisis económica¹⁶.

¹⁵ Nature Energy <https://www.nature.com/nenergy/>, accedido en marzo 2023.

¹⁶ Coal 2022, Analysis and forecast to 2025. International Energy Agency

1.2.1.3.- Centrales térmicas de carbón

Si bien ya se ha comentado de forma general la sistemática de funcionamiento de las centrales térmicas que operan con combustibles fósiles (en concreto carbón), se pasa seguidamente a describir en detalle cada uno de los flujos y sistemas involucrados. En estas centrales tiene lugar la transformación de la energía interna o química contenida en un combustible en energía térmica. Dichas centrales constan de distintos subsistemas agrupados en torno a los dos elementos principales: la caldera y la turbina. Las plantas térmicas termodinámicamente se consideran como máquinas térmicas.

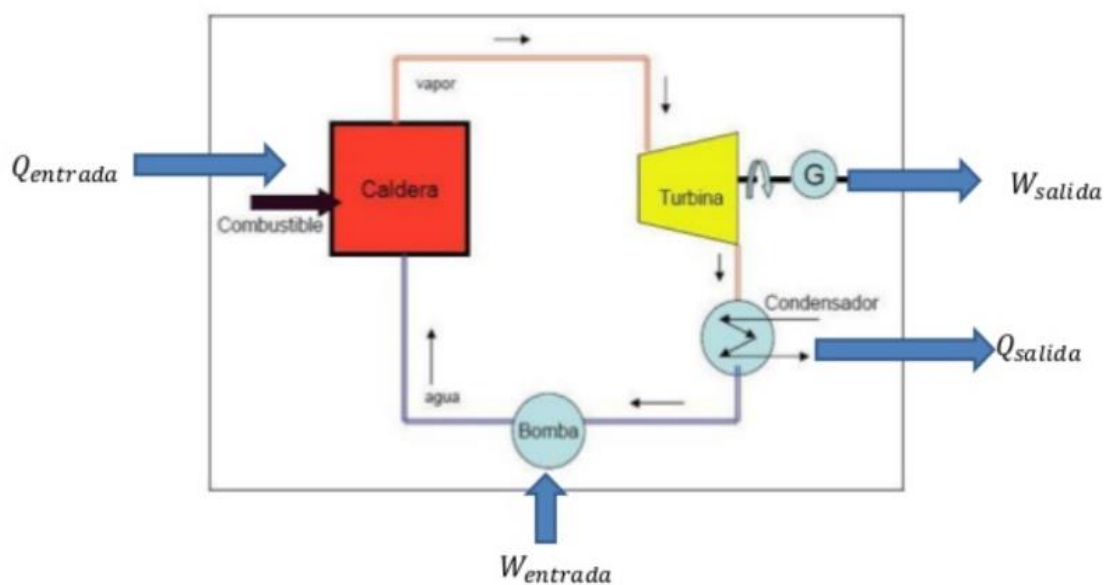


Figura 6: Diagrama simplificado de una central térmica de carbón.
Fuente: Rodríguez R. (2013)¹⁷

En torno a la caldera es donde está situada la configuración para alimentar de combustible, también la de aportación de aire, así como salida y sistema para tratar gases de escape y cenizas. Por otro lado, en torno a la turbina están subsistemas constituyentes del ciclo agua-vapor, así como subsistemas relativos al condensador. En lo que respecta a la posición del alternador, éste suele situarse próximo a la turbina, así como los sistemas eléctricos asociados. También se incluyen el resto de los sistemas auxiliares del conjunto como pueden ser el aire comprimido, agua de servicio, tratamiento de aguas, puntos de muestra y drenajes, vapor auxiliar, etc.

¹⁷ Rodríguez R., “Máquinas térmicas”, Instituto Profesional Providencia, Santiago de Chile, 2013.

El carbón se suele almacenar en un parque de intemperie, sin recibir tratamiento alguno. Cuando es requerido, el carbón es molido con el fin de incrementar el área que es sometida a combustión y aumentar la eficiencia. El combustible es quemado en un espacio que está cerrado por tabiques de mampostería con conducciones por las que circula el aire requerido para el proceso. A continuación de esto, es llevado a la caldera, junto con una mezcla de aire caliente con el fin de que se produzca la combustión (este aire es aportado por ventiladores de tiro forzado o inducido). En ocasiones, las plantas de producción usan un combustible auxiliar o de soporte (en la práctica suele ser gasóleo o fuel, si bien a veces se emplea gas natural), que necesitará un depósito para ser almacenado y un proceso para prepararlo.

Una vez calentada la caldera, en la que el agua se vaporiza, los gases residuales del proceso de combustión o humos son transferidos a un canal con el fin de ser purgados al ambiente exterior. Debido a que los gases todavía se encuentran calientes, es factible el aprovechamiento de su energía calorífica en el circuito primario de uno o más recalentadores de vapor, así como en el circuito primario de uno o más economizadores del agua que alimenta a la caldera. A continuación, gases y partículas sólidas en suspensión se dirigen a la chimenea de tiro natural o forzado, dirigiéndose desde aquí hacia el exterior, atravesando previamente precipitadores y equipamientos de desulfuración, con el objetivo de evitar que los contaminantes sean emitidos a la atmósfera. Los productos de la combustión incompleta del carbón, tales como inquemados sólidos (escorias), caen al fondo y son rescatados por la parte interior de la caldera.

La caldera se compone de un gran número de conductos, dentro de los cuales hay agua que se convierte en vapor a alta temperatura. Este vapor cuando sale de la caldera suele contener aún partículas líquidas, es transformado en vapor recalentado atravesando el circuito secundario de varios recalentadores primarios, que se encuentran en el recorrido de los gases de combustión. Partiendo de la caldera, el vapor a alta presión y temperatura es dirigido hacia la máquina de vapor o turbina, lugar en el que tiene lugar la expansión y la producción de energía mecánica. El vapor de agua mueve los álabes de las turbinas de vapor, que van unidas al rotor del generador eléctrico, lugar en el que se tiene lugar la transformación de energía mecánica en energía eléctrica.

INTRODUCCIÓN

Con el fin de limitar la energía que se pierde en el transporte, el voltaje es aumentado mediante un transformador previamente a ser enviado a las líneas de alta tensión de la red oficial. Ya que una central térmica de vapor logra mejorar su rendimiento a medida que se enfríe en mayor grado el vapor de escape, cuando sale de la turbina, este vapor es conducido a través de un condensador o dispositivo de refrigeración en el que tiene lugar la condensación y nueva transformación en agua; la condensación se lleva a cabo metiendo agua fría a presión en el condensador, atravesando serpentines para refrigerarse. Esta agua condensada y que viene de la turbina es bombeada a la caldera a través de bombas de alimentación. Para elevar la eficiencia térmica del sistema, el agua de alimentación debe ser introducido en la caldera ya caliente, por lo que circula con carácter previo por los circuitos secundarios de varios precalentadores, que reciben el calor a través de las extracciones de vapor de las turbinas, y por varios economizadores, que son calentados por los gases de escape con carácter previo a que salgan a la atmósfera exterior a través de la chimenea.

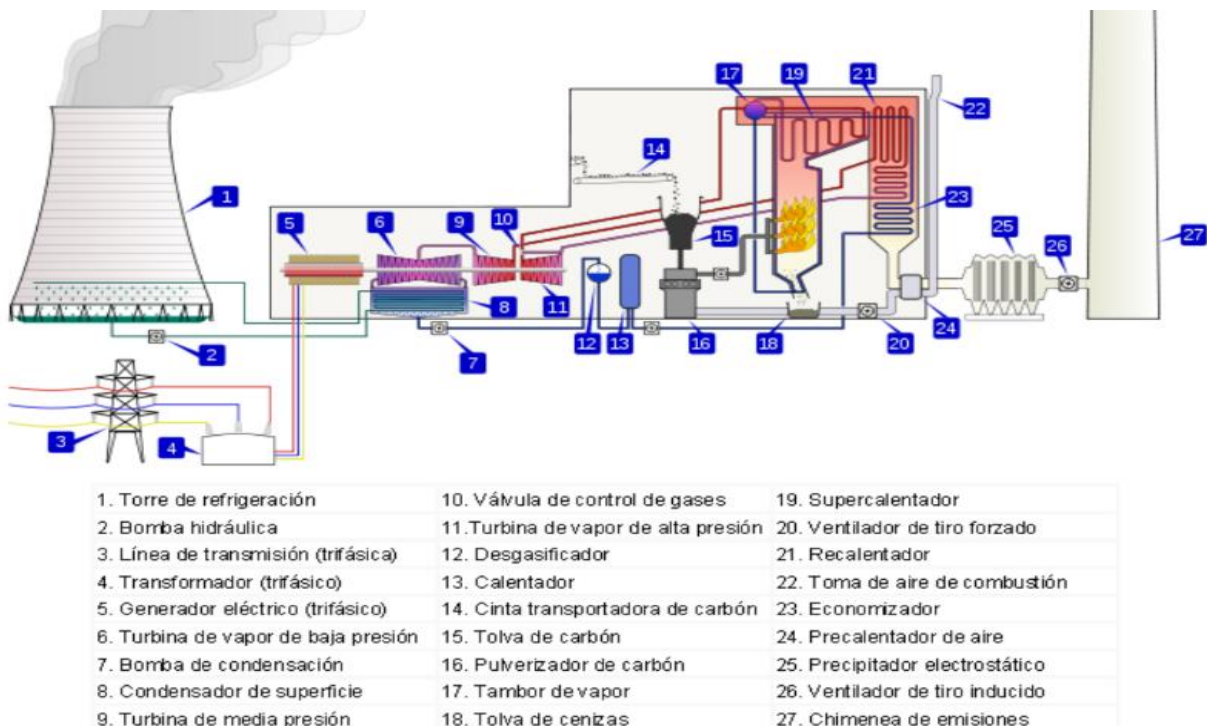


Figura 7: Diagrama técnico genérico para una planta térmica de carbón.

Fuente: Ramírez J. (1977)¹⁸

Una vez revisado todo lo expuesto hasta ahora sobre el contexto energético en el que se encuadra el presente trabajo, nos encontramos en disposición de analizar y comentar lo correspondiente a materiales y recubrimientos para las turbinas de vapor.

¹⁸ Ramírez Vázquez J., "Centrales eléctricas", CEAC, Barcelona, 1977.

1.3.- Consideraciones sobre los materiales y recubrimientos empleados

Los materiales empleados en las turbinas de vapor supercrítico tienen propiedades específicas que les permiten trabajar a temperaturas superiores a 500°C. Este tipo de materiales son denominados “materiales para alta temperatura”. Las propiedades referenciadas se refieren a propiedades mecánicas y de resistencia frente a la corrosión y oxidación. Dichos materiales son de vital trascendencia en más sectores de la industria, además del energético, como por ejemplo el aeronáutico y el transporte; en todos esos sectores un aumento de la temperatura a la cual operan los procesos significa una mayor eficiencia de estos, la cual tendrá repercusiones tanto a nivel económico como medioambiental.

Los factores que deben tenerse en cuenta a la hora de elegir los materiales de alta temperatura idóneos para una aplicación en concreto son la máxima temperatura de operación que se va a alcanzar, así como el tiempo durante el cual el material está sometido a esas condiciones.

Por lo general, un aumento de temperatura conllevará un aumento de eficiencia del proceso, pero ello también puede conllevar la aparición de problemas de corrosión o de fatiga de materiales, por lo que se ha de asegurar que estos procesos no afecten negativamente a los materiales que se utilicen y por lo tanto no se vea disminuida la vida útil de los componentes de la planta.

Los materiales para alta temperatura más utilizados son los de carácter metálico, cerámico y compuestos¹⁹. Existe una amplia gama de materiales englobados en los grupos anteriores, tales como aceros, fundiciones, refractarios, cerámicas, materiales intermetálicos o aleaciones base determinados metales (Ni, Ti, Co...).

No obstante, los materiales que tradicionalmente más se han empleado bien en secciones de las calderas bien en partes de turbinas de plantas de producción de energía mediante vapor de agua son los aceros ferríticos martensíticos con contenidos elevados en Cr (9-12%)²⁰.

¹⁹ Meetham G., Voorde M.V.d., “*Materials for High Temperature. Engineering Applications*” pp 35-51, Springer, 2000.

²⁰ Viswanathan R., Gandy D., Coleman K., “*Advances in Material Technology for Fossil Power Plants*” pp 20-34, ASM International, 2005.

1.3.1.- Aceros ferrítico-martensíticos con 9-12% de Cromo

El motivo por el que se utilizan estos aceros ferrítico-martensíticos con 9-12% Cr en las centrales de producción de energía mediante vapor radica en su coste relativamente bajo unido a su facilidad de fabricación. Asimismo, disponen de gran resistencia a la fluencia y una moderada resistencia a la corrosión en medios oxidantes.

Por resistencia a la fluencia se entiende la resistencia a la deformación a carga constante. El límite de fluencia, por tanto, se define como la tensión desde la que el material experimenta deformaciones de carácter continuo; lo cual significa que antes de alcanzar dicha cifra de tensión, si se interrumpe el esfuerzo a tracción del material, éste regresará a su dimensión de origen, sin experimentar tipo alguno de deformación permanente (lo que se conoce como deformación tipo elástica).

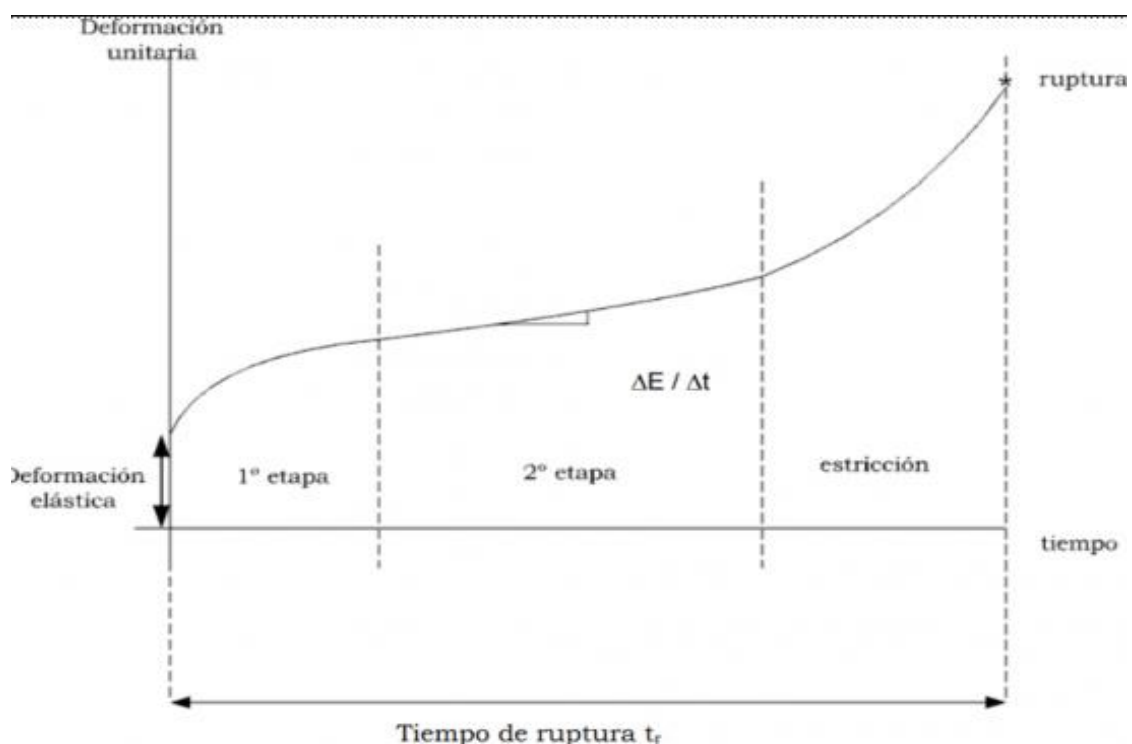


Figura 8: Curva típica de fluencia o creep para carga constante.

Fuente: Faridani M.N.²¹.

Como muestra el gráfico de arriba, el resultado del creep o fluencia, mostrado en una representación tiempo-deformación con carga constante, se puede clasificar en 3 fases diferentes:

²¹ Faridani, M. N., "Classification and probabilistic model development for creep failures of structures: Study of X-70 carbon steel and 7075-T6 Aluminium Alloys". 2011.

1. Etapa Primaria: régimen transitorio de endurecimiento y la tasa del creep se reduce.
2. Etapa Secundaria: la tasa del creep llega a un régimen permanente. Se comporta de forma casi lineal y predecible.
3. Etapa Terciaria: donde la tasa del creep se incrementa velozmente con una brusca deformación hasta el momento en que el material rompe.

Los aceros ferrítico-martensíticos comenzaron a desarrollarse en las primeras décadas del S. XIX, enfocados en el uso para plantas de producción de energía. Los aceros de aquella época consistían en aleaciones formadas por 12%Cr y 9-12%Cr-Mo²². Los constantes requerimientos de disminuir gastos e incrementar la eficiencia para estas plantas de producción de energía fue lo que impulsó la búsqueda y mejora de nuevos aceros de estas características, con más componentes de aleación, desde los años 60.

La cronología resumida de la evolución de estos aceros sería la siguiente:

- 1940-1960: acero tipo T9; con una temperatura máxima de uso de 538°C.
- 1960-1970: adición de Mo, V, Nb; aceros tipo HT9, HT91, EM12, X20; con una temperatura máxima de uso de 565°C.
- 1970-1985: optimización de Nb, V, y C, así como introducción del N; aceros tipo P91, T91, HCM12; con una temperatura máxima de uso de 593°C.
- 1985-1995: sustitución de parte de Mo por W, así como añadido de Cu, B; aceros tipo E911, P92, HCM12A; con una temperatura máxima de uso de 620°C.
- 1995-2000: aumento de W y añadido de Co; aceros tipo NF12, VM12, SAVE12; con una temperatura máxima de uso de 620°C.
- 2000-actualidad: aceros NIMS (eliminación de N y adición de B) y aceros Z (disminución de C y adición de Ta); con una temperatura máxima de uso de 650°C.

Para alcanzar temperaturas superiores, sería necesario el uso de aceros austeníticos (hasta 665°C) o superaleaciones con alto contenido en Ni (hasta 700°C); sin embargo, el uso de aceros ferrítico-martensíticos es preferible debido a los valores más bajos de su coeficiente de expansión térmica y mayor conductividad térmica frente a los aceros austeníticos, propensos a la fatiga térmica²³.

²² Klueh R.L., Harries D.R., “*High-Chromium Ferritic y Martensitic Steels for Nuclear Application*”, ASTM, pp.221-228, 2001.

²³ Dongke Zhang FTSE., “*Ultra-supercritical coal power plants. Materials, technology and optimisation*”, Woodhead Publishing, pp.31-44, 2013.

1.3.2.- Uso de aceros ferrítico-martensíticos en calderas y turbinas

La utilización de aceros ferrítico-martensíticos 9-12%Cr en plantas de producción de energía por vapor en condiciones super y ultrasupercríticas se localiza y ha sido estudiado en las siguientes partes de la caldera y la turbina de la instalación: intercambiadores de calor, calentadores y recalentadores, válvulas, tuberías de vapor, rotores, carcasas y álabes²⁴. Se detallan a continuación.

1.3.2.1.- Caldera

Se han empleado varios tipos de aceros en las calderas de vapor supercrítico a lo largo de las plantas construidas en el mundo. Por ejemplo, los aceros 0,5Cr-MoV, 2.25Cr-1Mo (22 P/T) o 1.0Cr-0.5Mo (T11) para las tuberías de calderas y de conducción de vapor. Se ha observado que a un mayor contenido en Cr se obtiene un superior comportamiento en condiciones de oxidación, de manera que aceros 12Cr tienen preferencia frente a los de 9Cr en zonas de temperatura más elevada (recalentadores).

Entre los aceros de 9%Cr, el P91 se ha usado como material para headers (partes de sección grande), tuberías de vapor y tubos de supercalentadores hasta 593°C. El P92, desarrollado para sustituir parte del Mo en el P91 por W, permite su uso hasta temperatura de 620°C al tener una resistencia mayor al stress térmico. El E911 es un acero desarrollado en Europa, de similar composición y propiedades que el NF616.

En aceros de 12%Cr, el HT91 ha sido muy utilizado para headers y tuberías de caldera, si bien su uso en EEUU y Japón se ha limitado por su pobre soldabilidad. El HCM12 es una versión mejorada del HT91, con 1%W y 1%Mo, teniendo una estructura dúplex de δ -ferrita y martensita templada, lo que mejora su soldabilidad y su creep. Asimismo, mejoras en la resistencia a la fluencia sustituyendo más cantidad de Mo por W y adicionando Cu, resultaron en el HCM12A (P-122), usado en headers y tuberías hasta 620°C. El P-122 posee propiedades similares al P92, con una resistencia a la oxidación por vapor algo superior debido a su mayor contenido en Cr²⁵.

²⁴ Muelas R., “*Recubrimientos resistentes a los fenómenos de degradación en las nuevas turbinas generadoras de energía por vapor de agua*”, Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Facultad de CC Químicas, Universidad Complutense, pp.50-56, Madrid, 2016.

²⁵ Viswanathan R., Purgert R., Rao U., “*Materials technology for advanced coal power plants*”, Ohio Coal Research Office, pp.4, 2005.

Los aceros NF12 y SAVE12, ambos más recientes, tienen una mayor resistencia a la fluencia que el HCM12A. El NF12 contiene 2,5%Co, 2,6%W, y una cantidad ligeramente superior de B comparado con el HCM12. El SAVE12 contiene 3%Co, 3%W, y menores cantidades de Nb y Ta; estos últimos elementos contribuyen al fortalecimiento en la medida en la que producen precipitados de nitruro finos y estables. Otro acero utilizado es el HCM2S (T-23); dicho acero contiene 2,25Cr-1.6W, así como V y Nb. Se trata de un acero de bajo coste con mayor resistencia a la fluencia que el T22, así como una excelente soldabilidad sin haberle efectuado tratamientos térmicos²⁶.

Seguidamente se presenta un cuadro resumen de las composiciones químicas nominales de aceros ferríticos empleados para calderas de plantas de vapor supercrítico:

Aceros	Especificación	Composición Química (% en masa)													
		ASME	JIS	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	Co	V	Nb	B	N	Otros
2Cr	T22 (2,25Cr-1Mo)	T22	STBA24	0,12	0,3	0,45	2,25	1,0	-	-	-	-	-	-	-
	HCM2S	T23	STBA24JI	0,03	0,2	0,12	2,25	0,1	1,3	-	0,25	0,05	0,003	-	-
9Cr	T9 (9Cr-1Mo)	T9	STBA26	0,12	0,3	0,12	9,0	1,0	-	-	-	-	-	-	-
	HCM9M (9Cr-2Mo)	-	STBA27	0,07	0,3	0,45	9,0	2,0	-	-	-	-	-	-	-
	T91 (9Cr-1MoVNb)	T91	STBA28	0,10	0,4	0,45	9,0	1,0	-	-	0,20	0,08	-	-	-
	NF616 (9Cr-0,5Mo-2WVNb)	T92	STBA29	0,07	0,03	0,45	9,0	0,5	1,8	-	0,20	0,05	0,004	0,05	-
	Tempaloy F-9 (9Cr-1MoVNb)	-	-	0,06	0,5	0,06	9,0	1,0	-	-	0,25	0,40	0,005	0,06	-
	EM12 (9Cr-2MoVNb)	(NFA49213)	-	0,10	0,4	0,10	9,0	2,0	-	-	0,30	0,40	-	-	-
12Cr	JT91 (12Cr-1MoV)	(DIN X20CrMoV121)	-	0,20	0,4	0,60	12,0	1,0	-	-	0,25	-	-	-	0,5Ni
	HT9 (12Cr-1MoWV)	(DIN X20CrMoWV121)	-	0,20	0,4	0,60	12,0	1,0	0,5	-	0,25	-	-	-	0,5Ni
	HCM12 (12Cr-1MoWVNb)	-	SUS410J2TB	0,10	0,3	0,55	12,0	1,0	1,0	-	0,25	0,05	-	0,03	-
	HCM12A (12Cr-0,4Mo-2WCuVNb)	T122	SUS410J3TB	0,11	0,1	0,60	12,0	0,4	2,0	-	0,20	0,05	0,003	0,03	1,0Cu
	NF12 (11Cr-2,6W-2,5CoVNbB)	-	-	0,08	0,2	0,50	11,0	0,2	2,6	2,5	0,20	0,07	0,004	0,05	-
SAVE12 (11Cr-3W-3CoVNbTaN)	-	-	0,10	0,3	0,20	11,0	-	3,0	3,0	0,20	0,07	-	0,04	0,07Ta	

Tabla 1: Composición química nominal de aceros ferríticos para calderas.

Fuente: Masuyama F. (1999)²⁷

²⁶ Nawrocki J.G., Dupont J.N., Robino C.V., Marder A.R., "The Stress-Relief Cracking Susceptibility of a New Ferritic Steel — Part 1: Single-Pass Heat-Affected Zone Simulations", Welding Research Supplement, pp. 355-361, 2000.

²⁷ Masuyama F., "New Developments in Steels for Power Generation Boilers", IOM Communications Ltd. London, pp. 33-48, 1999.

1.3.2.2.- Turbina

La turbina de vapor se compone principalmente por los componentes²⁸ mencionados a continuación:

- **Álabes:** se trata de partes críticas de las plantas de producción de energía puesto que transforman la energía del vapor en energía rotatoria asociada al eje de la turbina.
- **Cuerpo del rotor:** se trata de la parte que sujeta los álabes móviles en la turbina. Se activa por medio de un accionador.
- **Estator:** compuesto de álabes fijos y unido a una carcasa.
- **Sistemas de tipo auxiliar de refrigeración y lubricación.**

Del tema de materiales utilizados, se pasa seguidamente a comentar los más frecuentes:

- **Álabes.** Los materiales que se emplean con más frecuencia para álabes de turbina consisten en aceros con modificaciones con 12% Cr. En aplicaciones para turbinas de vapor supercríticas, a temperaturas por encima de 550°C, los aceros 12% Cr tienen que añadir más elementos de aleación, tal como pueden ser los aceros del tipo 12Cr-MoVNbWNB. Ejemplos de este tipo pueden ser el TF2, desarrollado en Japón. De igual forma son usados aceros más aleados, tipo 13%Cr. Asimismo, el desarrollo de superaleaciones de base Ni²⁹ es y ha sido también tenido en cuenta para este punto, puesto que históricamente han sido empleadas con buenos resultados a temperaturas superiores a los 570°C.

Los fallos más corrientes producidos en los álabes se relacionan con corrosión bajo tensión y debida a la fatiga. Para solucionar estos temas de corrosión y erosión se emplean distintas metodologías para endurecer superficialmente los álabes de aceros 12%Cr por medio de tratamientos térmicos junto a templado de elevada frecuencia³⁰.

²⁸ Muñoz M., Rovira A.J., “*Máquinas térmicas*”, Universidad Nacional de Educación a Distancia, capítulo 10.1, Madrid, 2013.

²⁹ Wang W.Z., Xuan F.Z., Zhu K.L., Tu S.T., “*Engineering Failure Analysis*”, vol. 14, pp. 632-641, 2007.

³⁰ Chen X., Tortorelli P., Shyam A., Santella M., Dryepondt S., Unocic K.A., Lara E., Maziasz P., “*Characterization of Ni-based alloys for Advanced Ultra supercritical Power Plants*”, Proceedings from EPRI’s 9th International Conference on Advances in Material Technology for Fossil Power Plants and the 2nd International 123Hi Mat Conference on High-Temperature Materials, pp. 580-592, 21-24 octubre, Nagasaki, Japón, 2019.

- **Rotores.** Los rotores, por norma general, se fabrican con aceros ferríticos 9-12%Cr. Para los rotores de turbinas que operan a temperaturas entre 630-650°C, se han empleado en la fabricación aceros del tipo 9%CrMoV u otros más aleados, como el tipo 9.5Cr-MoVNbB, 10.5Cr-MoVNbWN o 10.2Cr-MoVNbN (aceros desarrollados como parte de programas de investigación de la Unión Europea)³¹.

- **Carcasa, estator y cuerpos de válvula.** En el caso de que las temperaturas de funcionamiento no superen los 600°C, materiales de la clase 9Cr-1Mo han sido usados para estos elementos de las turbinas de vapor, fundamentalmente en Europa.

También se han empleado aceros de forma como el F91 (9Cr-1Mo), en las válvulas, con buenos resultados³².

Para mayores temperaturas, los aceros tipo 9Cr-MoVNbW y 12Cr-MoVNb son los mayormente escogidos para su manufactura; estos aceros han sido desarrollados en Japón.

- **Tornillería.** La longitud de los tornillos empleados en las turbinas de vapor actuales oscila entre los 300 y los 1000 mm, mientras que su diámetro puede variar entre de los 40 a los 150 mm. Estos tornillos suelen trabajar a temperaturas que se encuentran en el rango de fluencia. Asimismo, con propósitos de mantenimientos, deben ser aflojados y apretados después de periodos de operación que abarcan desde las 30.000 hasta las 80.000 horas.

Las propiedades que deben tener estos tornillos para su uso en las turbinas de vapor son, entre otras, alta tenacidad a la fractura y límites elástico, gran ductilidad con el fin de impedir la formación de grietas debidas a fluencia, resistencia frente a grietas provocadas por fenómenos de corrosión debidos a tensión en medios con vapor, etc....

En la práctica se han utilizado aceros martensíticos con elevada composición de Cr (tipo 12Cr-MoNiV o 12Cr-MoV), pero únicamente hasta temperaturas de 550-560°C.

³¹ Staubli M., Mayer K. H., Giselbrecht W., Stief J., DiGianfrancesco A., Kern T. U., “*Development of creep resistant cast steels within the European collaboration in advanced steam turbine materials for ultra efficient, low emission steam power plant/COST 501-522*”, Germany, pp.1065-1080, 2002.

³² Zhang X.Z., Wu X.J., Liu R., Yao M.X., “*Deformation-mechanism-based modeling of creep behavior of modified 9Cr-1Mo steel*”, Materials Science and Engineering, Volume 689, pp.345-352, 24 marzo 2017.

INTRODUCCIÓN

En vista de lo anterior, para la utilización de tornillería a temperaturas superiores a las mencionadas previamente, es necesario recurrir a superaleaciones base Ni, por ejemplo Nimonic 80 A [0.10% C (máximo), 3.0%Fe (máximo), 18–21%Cr, 2.0%Co (máximo), 1.0–1.8%Al, 1.8–2.7%Ti, balance: Ni), Waspalloy, Refractaloy 26 o la aleación 105; también se están realizando modificaciones tomando de base estas aleaciones originales para mejorar sus propiedades y permitir su uso en entornos de 700°C y superiores³³.

Seguidamente, una vez revisados los aceros más empleados tanto en las calderas como en las turbinas de las plantas de vapor supercrítico, se comentarán los fenómenos de corrosión y oxidación a los que estarán expuestos en dichos entornos de operación como consecuencia de las altas temperaturas y de la presencia del vapor de agua. El entendimiento de los mecanismos cinéticos y formados de capas protectoras será de vital importancia a la hora de seleccionar los materiales y recubrimientos más idóneos.

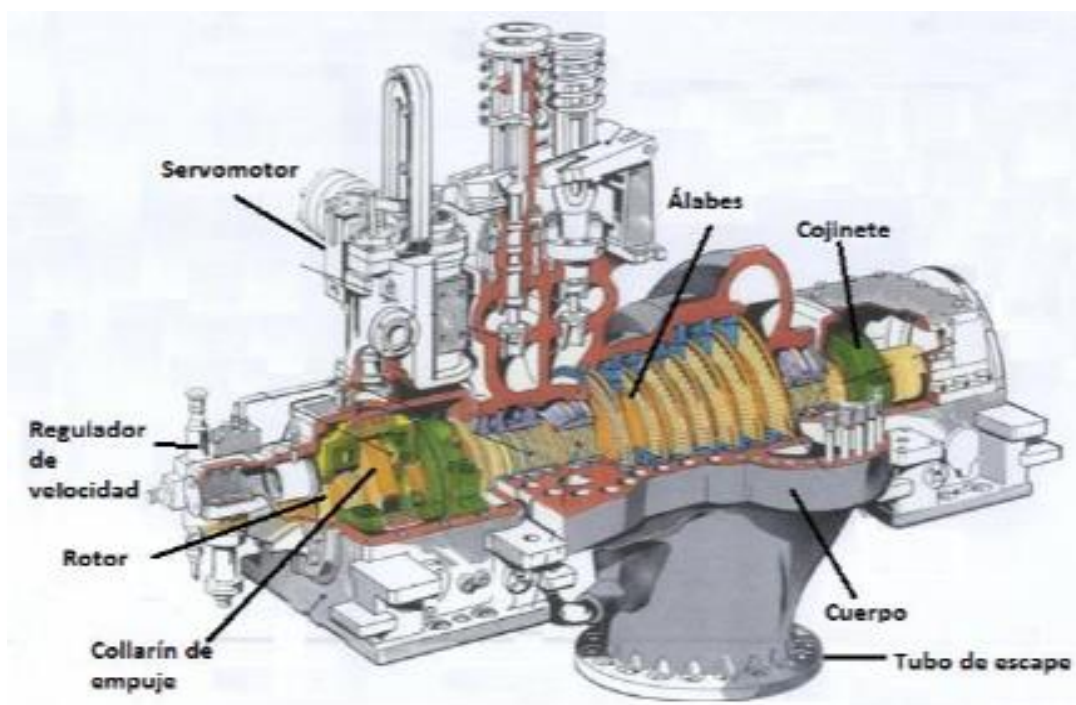


Figura 9: Ejemplo de turbina de vapor y partes principales.

Fuente: Estevez A. (2017)³⁴.

³³ Abe F., “*Research and Development of Heat-Resistant Materials for Advanced USC Power Plants with Steam Temperatures of 700 °C and Above*”, Engineering, Volume 1, Issue 2, Elsevier, pp.211-224, junio 2015.

³⁴ Estevez A., “*Diagnóstico de daño en turbinas de vapor*”, Departamento Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2017.

1.3.3.- Fenómenos de corrosión a elevada temperatura

De un modo genérico, la integridad de los elementos funcionando a temperaturas elevadas puede estar comprometida debido a los procesos de corrosión existentes; dichos procesos de corrosión son susceptibles de disminuir de una forma relevante la duración en servicio de los materiales empleados. Ello conllevaría una pérdida de estos materiales, así como una parada de la producción que conllevaría importantes pérdidas económicas.

En la actividad industrial existen ejemplos de procesos de corrosión típicos: oxidación, sulfidización, carburación, nitruración, corrosión debida a sales fundidas, oxidación en vapor... Cabe destacar que en muchos casos la presencia de oxidación está asociada a la corrosión, debido a la alta actividad del oxígeno existente.

Para el caso particular de los materiales que integran las turbinas de vapor y resto de partes de las plantas de producción de energía térmica, hay que tener en cuenta que los procesos de corrosión tienen lugar a alta temperatura en medios donde existe mucho vapor de agua, lo cual hace que el ambiente presente más agresividad que el aire.

Deben observarse otras consideraciones tales como que en medios reductores la degeneración del material está fijada por la actividad de elementos tales como H_2/H_2O y CO/CO_2 ; este tipo de medios suelen ser presentar más agresividad que los oxidantes, debido a que la probabilidad de constituir un óxido que pueda proteger es más pequeña.

Los factores que intervienen a la hora de que un óxido pueda proteger a un metal de los procesos de corrosión, situación que interesa conseguir de cara a aumentar la durabilidad de dichos metales, son los siguientes:

- tanto por ciento en volumen del óxido frente al metal posteriormente a la oxidación (mejor cuanto más próximo a uno).
- punto de fusión del óxido (mejor cuanto más alto sea).
- adherencia de la película que se forma.
- coeficiente expansión de la película que se forma (mejor cuanto más próximo al del metal).
- plasticidad a alta temperatura de la película (mejor cuanto mayor sea, con el fin de evitar grietas y fracturas).
- conductividad (mejor cuanto más baja sea).
- coeficiente de difusión de oxígeno e iones metálicos (mejor cuanto más bajo sea).

El proceso por el que se forma un óxido cuando existe oxidación a alta temperatura sobre un sustrato metálico se produce según el siguiente mecanismo.

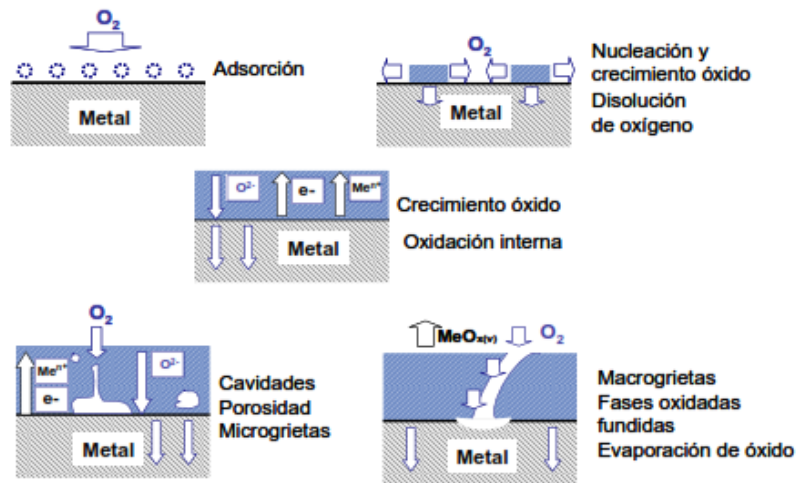


Figura 10: Etapas del mecanismo de formación de óxido cuando existe oxidación debida a gases.
Fuente: Bradford S.A., 1994 ³⁵.

Según puede comprobarse en la figura 10, en un primer término tiene lugar la adsorción del gas en la superficie del metal, en forma de oxígeno atómico. Este óxido experimenta nucleación en las ubicaciones más beneficiosas desde el punto de energético, creciendo lateralmente hasta la formación de una capa que cubra la totalidad de la extensión del metal. La película de óxido dota al metal de una capa protectora que sirve de barrera separando metal y gas. Debe tenerse en cuenta que, a lo largo del desarrollo de la película de óxido, se genera un movimiento de cationes y electrones con dirección al nivel alto del óxido y uno en sentido opuesto de átomos de oxígeno por la película de óxido, con capacidad de atravesar el metal. Asimismo, a raíz de las tensiones originadas mientras crece el óxido, son generadas microcavidades y grietas, de forma que pueden cambiar la metodología de crecimiento, de manera que la superficie del metal esté otra vez contactando el ambiente agresivo. Es en este punto donde el uso de materiales más resistentes o recubrimientos protectores pueden contribuir a incrementar la resistencia a la oxidación en los metales.

En los fenómenos de oxidación con presencia de gases los óxidos formados se dividen en 2 tipos: el primero de ellos estaría formada por óxidos volátiles a temperaturas relativamente bajas y el segundo la constituirían óxidos que tienen estabilidad en la superficie del metal.

³⁵ Bradford S.A., "Fundamentals of Corrosion in Gases", ASM Handbook, ASM, Editor, 1994.

Dichos óxidos que son estables pueden ejercer una labor protectora frente a la corrosión en función de su constitución química, espesor, adhesión, porosidad, etc. y la oxidación estará en función de los agentes siguientes: facilidad de difusión de cationes y oxígeno por la película de óxido, cantidad de oxígeno existente en la superficie del metal y el volumen de óxido sobre el metal.

Una opción para medir el deterioro causado por la corrosión es la cuantificación de la velocidad de corrosión experimentada por un material en medios agresivos. Se lleva a cabo mediante determinación de la masa perdida o adquirida que experimenta el material debido a la oxidación generada por la reacción con el metal y el ambiente agresivo. Por ello, la cinética de la mecánica se fundamentaría en medir cuánto metal se consume o cuánto óxido se forma por unidad de tiempo. Hay numerosos mecanismos de desarrollo de la capa de óxido, pero los principales son 3: lineal o rectilíneo, parabólico y logarítmico³⁶. Sus curvas gravimétricas típicas se muestran en la figura a continuación.

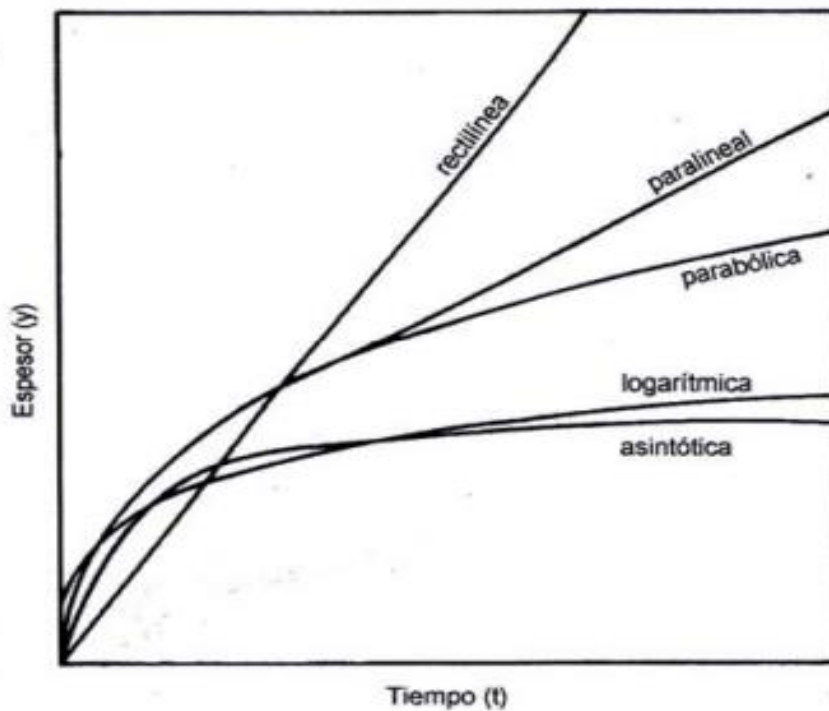


Figura 11: Trazado general representativo de las leyes cinéticas habituales a las que se ajustan los procesos de corrosión a alta temperatura.

Fuente: Otero, E. 2012³⁷.

³⁶ Khanna A.S., "Introduction to High Temperature Oxidation and Corrosion", ASM International, pp 1-24, 2002.

³⁷ Otero Huerta E., "Corrosión y degradación de materiales", Madrid: Síntesis, pp 276-290, 2012.

Cuando se forman óxidos que se caracterizan por su estabilidad y no volatilidad se observa un incremento de masa con el tiempo que se ajusta a una cinética lineal, logarítmica o parabólica; por el contrario, cuando se forman óxidos que se caracterizan por su volatilidad lo que tiene lugar es una disminución de masa lineal. La manera en que se comporta una materia con óxido no estable y creación de fenómenos formación de grietas o separación óxido, sin embargo, muestra fluctuaciones gravimétricas. Se comentan seguidamente cada uno de estos casos.

- **Crecimiento lineal.** Tiene lugar en el caso de que el óxido permite la entrada del oxígeno a la superficie metálica, dado que el volumen del óxido que se genera no es bastante para abarcar toda la extensión. Lo que ocurre entonces es que la superficie metálica no dispone de protección por una capa de óxido³⁸, de manera que la oxidación permanece constante durante el tiempo en el que está expuesta.

$$y = k t \text{ [Ecuación 1]}$$

donde: y representa la variación másica o de espesor

t es el tiempo

k representa una constante que es función de la temperatura, la presión, el metal y la composición del gas.

- **Crecimiento logarítmico.** El crecimiento logarítmico ocurre con carácter general a temperaturas bajas³⁹ y en el caso de que se haya constituido una película de óxido que no llega a los 100 nanómetros. Si esto se produce, los procesos de transporte que tienen lugar en la película de óxido controlan el crecimiento, ya que son la etapa controlante de la oxidación. Esta es la cinética deseable para materiales que operan a elevada temperatura.

$$y = k \ln t \text{ [Ecuación 2]}$$

Debe mencionarse que no se suelen dar cinéticas asintóticas, que corresponderían a capas de óxido que dispusieran de muy poca conductividad y que no crecerían más a partir de cierto espesor. Se regirían por la siguiente ecuación que se presenta a continuación, en el caso de que llegaran a materializarse.

³⁸ Callister W.D., “*Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2*”, Reverté, pp 599, 2007.

³⁹ Andrade M.C., Feliu S., “*Corrosión y Protección Metálicas, Vol.I*”, CSIC, pp 32-35, 1991.

$$y = k_1 (1 - e^{-k_2 t}) \text{ [Ecuación 3]}$$

• **Crecimiento parabólico.** Para esta cinética en particular, el óxido forma una capa densa localizada en la superficie que origina que el oxígeno únicamente es capaz de alcanzar la superficie metálica mediante difusión⁴⁰, con lo que la velocidad a la que crece el óxido es inversamente proporcional al espesor.

$$y^2 = k t \text{ [Ecuación 4]}$$

• **Formación de óxidos volátiles.** Los óxidos volátiles tienden a formarse en la superficie metálica, aunque de una forma inmediata tiene lugar un cambio de fase a gas; esto hace que se mantenga libre la superficie metálica de manera que continúe formándose el óxido que más tarde se volatilizará, finalizando cuando se consuma todo el metal⁴¹. En función de la atmósfera, es posible que se generen de igual forma productos volátiles distintos que favorecen que el material se degrade.

• **Separación del óxido protector.** En el caso de que se originen tensiones de compresión mientras tiene lugar el crecimiento de la película de óxido, pueden producirse agrietamientos que provoquen el desprendimiento de parte de óxido, alterando su proceso de creación de una forma más compleja, puesto que estarían implicados en ese caso la temperatura, la presión y composición del gas, junto con la geometría y composición del metal. El presente fenómeno es algo habitual cuando tienen lugar oxidaciones cíclicas, al ocurrir la separación del óxido protector más fácilmente por causa de las tensiones debidas a los ciclos de temperatura. Esto es algo que deberá tenerse en cuenta pues se ajusta a la casuística de las centrales supercríticas. En este sentido, se han realizado experimentos que han probado la afectación de la temperatura y la presencia de vapor de agua en la separación de la capa de óxido protector, en concreto para la oxidación de aceros ferríticos-martensíticos de 11% Cr en entornos de 500-700°C con y sin presencia de vapor de agua, donde la vaporización del Cr se ha visto que favorece la corrosión del material⁴².

⁴⁰ Peña Ballesteros D.Y., Vázquez Quintero C., Laverde Cataño D., Serna A., “Corrosión a temperatura alta del acero ferrítico 9Cr-1Mo modificado P91, en atmósferas simuladas oxidantes-carburantes”, Revista de Metalurgia 48 (2), ISSN: 0034-8570, pp 103-104, 2012.

⁴¹ Han G.S., Cho W.D., “Oxidation of Metals”, 58, pp 391-413, 2002.

⁴² Segerdahl K., Svensson J.E., Halvarsson M., Panas I., Johansson L.G., “Breakdown of the protective oxide on 11 % Cr steel at high temperature in the presence of water vapor and oxygen, the influence of chromium vaporization”, Materials at High Temperatures, 22:1-2, pp 69-78, 2005.

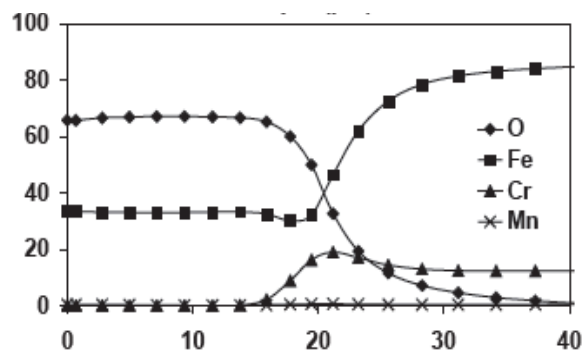


Figura 12: Perfil GDOES (Glow Discharge Emission Spectrometry) de acero CrMoV11 1 oxidado en $O_2+40\% H_2O$ durante 168 horas a $700^\circ C$ (profundidad en μm vs AC%).

Fuente: Segerdahl, L. (2005).

1.3.3.1- Oxidación en ambientes de vapor

Debe hacerse hincapié en que el resultado que la oxidación en ambientes de vapor a altas temperaturas provoca para distintas aleaciones constituye una métrica fundamental a tener en cuenta para seleccionar los materiales dentro de la actividad industrial de la generación de electricidad con turbinas de vapor.

De hecho, los aceros ferríticos son oxidados con mayor rapidez en atmósferas que contienen vapor de agua que en aire⁴³; la cinética de este proceso se ajusta a una ley parabólica.

Son varias las partes de estas plantas de producción que se exponen al efecto perjudicial del vapor de agua y combinaciones vapor/aire a temperaturas que pueden llegar a superar los $650^\circ C$ en condiciones de operación supercríticas.

Ello hace que los componentes de este tipo de centrales térmicas, sobre todo los ya mencionados aceros con 9-12% Cr, soporten parámetros de operación con más agresividad que una atmósfera seca. Lo cual produce que aumente en gran medida la cinética de oxidación de los materiales debido a la creación de óxidos que ofrecen muy poco grado de protección. Basta el ejemplo de que un incremento de un 1% de vapor de agua hace que la oxidación aumente en mucha mayor medida.

⁴³ Kurniawan T., Binti F.A., Asmara Y., "High Temperature Oxidation of Fe-Cr Steels in Steam Condition – A Review". Indonesian Journal of Science & Technology, Volume 1 Issue 1, pp 107-114, abril 2016. <http://dx.doi.org/10.17509/ijost.v1i1>.

La creación de estos óxidos es susceptible de inconvenientes en la operatividad de la planta de producción de energía, por ejemplo, la reducción de sección y obstrucción de canalizaciones de conducciones o incluso el desprendimiento de óxidos, generando abrasión superficial⁴⁴.

El motivo por el que el fenómeno de oxidación en vapor resulta más dañino que en aire seco radica principalmente en el distinto desarrollo de composición de las películas de corrosión. A temperaturas de 600-650°C, los productos típicos de oxidación en aire de aceros ferrítico-martensíticos consisten, de una parte, en una película externa de fase hematita (Fe_2O_3) y en una interna compuesta por una espinela de clase $(\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Mn})_3\text{O}_4$; la fase espinela confiere la protección a la película que se crea. Por otro lado, en ambientes con vapor de agua, la proporción de hierro en la mencionada espinela protectora aumenta considerablemente, con lo cual el nivel de protección desciende.

Si nos referimos a aceros inoxidable se observa que las consecuencias provocadas por el vapor de agua en la corrosión a elevada temperatura son peores. Mientras tiene lugar la oxidación en aire de los aceros inoxidable, se genera una película delgada de Cr_2O_3 (cromia), que se adhiere de forma continua y confiere protección. Sin embargo, en atmósferas con vapor de agua no se repite la situación anterior, puesto que el agua hace que la capa de cromia pierda estabilidad, ya que se favorece la difusión de átomos de Fe a través de dicha capa, incrementando la formación de óxidos de Fe.

Las investigaciones efectuadas para analizar las consecuencias nocivas que el vapor de agua tiene en la forma de comportarse de los aceros inoxidable apuntan como posibles causas la generación de compuestos de cromo que son volátiles, hidróxidos y oxihidróxidos así como defectos de tipo mecánico en la película de cromia.

La degeneración de la película de Cr_2O_3 a causa de los compuestos volátiles formados tiene lugar al interaccionar con el vapor de agua. La vaporación de las especies volátiles de cromo puede generar Cr (g), CrO_2 (g) y oxihidróxidos de cromo, principalmente CrO_2 (OH)₂, pero también CrOOH y Cr (OH)₆, de la capa superficial.

⁴⁴ Żurek J., Michalik M., Schmitz F., et al. "The Effect of Water-Vapor Content and Gas Flow Rate on the Oxidation Mechanism of a 10%Cr-Ferritic Steel in Ar-H₂O Mixtures". *Oxid Met* 63, pp 401–422, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11085-005-4394-1>.

Si se pierde más cromo debido a la formación de hidróxidos que cromo se proporciona desde el material de base, entonces es cuando se da lugar a un fallo de la película, lo cual hace que pierda sus propiedades protectoras⁴⁵.

La película de Cr_2O_3 es susceptible de volverse más frágil y producir agrietamientos a través de los cuales accede el vapor de agua y tiene lugar la interacción con la superficie del sustrato. De este modo se generan óxidos base hierro con menor capacidad de protección, incrementando en gran medida el grado de oxidación⁴⁶.

Pasamos a continuación, después de haber revisado los fenómenos de corrosión a elevada temperatura y oxidación en ambientes con vapor de agua, a comentar las características principales de los recubrimientos que se emplean en alta temperatura, así como las tipologías existentes y los métodos de deposición empleados.

1.3.4.- Recubrimientos

1.3.4.1.- Recubrimientos utilizados para alta temperatura

Los recubrimientos utilizados para su uso en altas temperaturas consisten en capas superficiales de materiales que pueden ser metálicos, cerámicos o mezcla de ambos y que permiten impedir o frenar la interacción entre el sustrato y una atmósfera externa con potencial nocivo. El perjuicio provocado por dicha interacción genera consecuencias indeseadas tales como degradación de sustrato por oxidación/corrosión o disminución de resistencia mecánica del sustrato provocada por la propagación de especies dañinas para el material a temperaturas elevadas.

Los recubrimientos utilizados para altas temperaturas tienden a reaccionar con el oxígeno de la atmósfera con el fin de generar películas de óxido compactas y con capacidad de adhesión que pueden inhibir la propagación de especies dañinas en dirección al sustrato. Se recomienda por tanto que los recubrimientos tengan mucha proporción de cromo, silicio o aluminio⁴⁷, con capacidad para crear óxidos protectores.

⁴⁵ Asteman H., Svensson J., Norell M., Johansson L., "Oxidation of Metals", Vol.54, pp 11-26, 2000.

⁴⁶ Henry S., Galerie A., Antoni L., "Materials Science Forum", 369-3, pp 353-360, 2001.

⁴⁷ Marulanda J.L., Alucema O., Barón J.A., "Oxidación en vapor de agua del acero inoxidable AISI 316 recubierto con Al-Si por deposición química de vapor en lecho fluidizado", Revista Ion, vol.27, no.1, pp 49-57, 2014.

Así, la vida en servicio de los recubrimientos va en función de su capacidad para generar películas de óxido que puedan conferir protección, además de conservarlas o sustituirlas por otras de similares características.

Los requisitos que debe cumplir por tanto un recubrimiento de estas características para satisfacer criterios técnicos y económicos pueden resumirse en los siguientes:

- Debe ser resistente frente a corrosión y oxidación, y poseer estabilidad de cara a la interdifusión recubrimiento-sustrato.
- No tiene que producir efectos significativos en las características mecánicas de la pieza (resistencia a la fatiga, choques térmicos y fluencia).
- Con resistencia a impactos en las fases de instalación y servicio.
- Tanto los materiales como la sistemática para aplicar el recubrimiento han de cumplir con las exigencias medioambientales requeridas legalmente.
- El proceso de aplicación debe adecuarse a la geometría y dimensiones de los componentes.

El empleo de este tipo de recubrimientos resistentes a altas temperaturas ha conseguido incrementar el tiempo de duración de las piezas, del mismo modo que aumentar la temperatura de operación de turbinas de generación eléctrica, así como la eficiencia de dichas turbinas durante los últimos años. Esto se ha conseguido mediante la modificación de las propiedades superficiales del sustrato; dichas propiedades externas pueden ser, en función del recubrimiento empleado: químicas, mecánicas, térmicas, eléctricas, magnéticas, ópticas...

Debe referirse que se siguen realizando continuamente investigaciones en este campo con el propósito de continuar aportando mejoras en la forma de comportarse de los recubrimientos en relación con los mecanismos de degradación⁴⁸, conseguir aumentar las temperaturas de servicio de las turbinas para potenciar el rendimiento, reducir costes y minimizar los impactos medioambientales negativos.

⁴⁸Boissonnet, G., Boulesteix C., Bonnet, G. et al., “*Thermal Transport Properties of New Coatings on Steels for Supercritical Steam Power Plants*”, *Oxid. Met* 88, pp 191–202, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11085-016-9682-4>

1.3.4.2.- Tipología de los recubrimientos

La función esencial de los recubrimientos es alargar la vida de los materiales. Existen también otros motivos para la utilización de recubrimientos como pueden ser la modificación de propiedades termo-ópticas o del aspecto de un material, así como el impedimento de paso de elementos como el oxígeno y el agua.

Para el caso más general que nos ocupa, relacionado con alargar la vida de los materiales, pueden distinguirse:

- Recubrimientos frente a la corrosión y oxidación a temperatura elevada. En la mayoría de los casos se trata de aleaciones y compuestos intermetálicos caracterizados por la formación de una película de óxido que confiere protección, cromia, alúmina, etc...
- Recubrimientos compactos frente al desgaste, erosión y abrasión. Este tipo de recubrimientos suelen estar formados por compuestos cerámicos de gran dureza tipo como los carburos, nitruros y boruros metálicos. Estos compuestos se caracterizan por sus puntos de fusión elevados, así como densidades bajas y pocas pérdidas por fricción⁴⁹.
- Recubrimientos tribológicos. Son aquellos recubrimientos que presentan un bajo coeficiente de fricción y una suficiente resistencia al desgaste. Se presentan en películas con forma de lámina de materiales compuestos o metales no compactos con bajos coeficientes de fricción y baja resistencia a la cizalladura. Entre estos recubrimientos más utilizados destacan los correspondientes a combinaciones de capas duras y capas antifricción (tipo TiN + MoS₂), y capas tipo metal-carbono⁵⁰.
- Recubrimientos Tipo barrera térmica. Generalmente consisten en compuestos cerámicos que tengan muy poca conductividad y estabilidad térmica elevada, y que facilitan la operación con mayores temperaturas (por lo general, aumento de la temperatura de trabajo entre 100 y 300°C⁵¹).

⁴⁹Caselles M.J., Gómez M.R., Molero M., Sardá J., *“Química aplicada a la Ingeniería”*, UNED, pp 404, 2015.

⁵⁰Hernández Jiménez L.G., *“Determinación mediante microabrasión del espesor y tasa de desgaste de recubrimientos delgados depositados sobre materiales metálicos”*, 3Ciencias, Ed. Área de Innovación y Desarrollo S.L., pp 32, 2019.

⁵¹Garmés Belmonte B., *“Motores de reacción y turbinas de gas”*, Paraninfo 2ªEd., pp 118, 2018.

1.3.4.3.- Deposición de los recubrimientos

A la hora de elegir un recubrimiento para un sustrato y una aplicación determinada han de tenerse en cuenta una serie de factores, entre los que se incluye obviamente el tipo de tratamiento superficial y técnica de deposición empleada.

La elección de la técnica más adecuada dependerá, por tanto, de los requisitos concretos de operación del material en condiciones de servicio, la rentabilidad tecnológica y económica, además de la compatibilidad con el sustrato, densidad y adherencia del recubrimiento, naturaleza, temperatura y pureza del sustrato... Asimismo, los procesos de superficie y las tecnologías de deposición han de poder acomodarse con el material elegido para ser sustrato y ha de ser factible la obtención del recubrimiento con el espesor suficiente para cada requisito. Por otro lado, debe mencionarse que existen técnicas específicas para sustratos o recubrimientos determinados.

Con carácter general, dentro de los procesos que modifican una superficie, se encuentran varias tipologías: tratamientos que no cambian la composición química de la superficie del sustrato, tratamientos que cambian la composición química de la superficie del sustrato, y tratamientos que crean una película o recubrimiento en la superficie del sustrato.

Entre los tratamientos que **no cambian la composición química de la superficie** se encuadran los métodos térmicos de *temple* y *fusión superficial*, en los que se mejora la dureza y resistencia al desgaste de material mediante templado o fusión superficial utilizando rayo láser, haz de electrones, inducción, flama, calentamiento por resistencia a alta frecuencia⁵²... También existen procesos mecánicos en frío como el *shot peening*, utilizados con el fin de aumentar la resistencia contra la fatiga de piezas expuestas a altas tensiones cíclicas⁵³.

Entre los tratamientos que **cambian la composición química de la superficie** se distinguen fundamentalmente los tratamientos *termoquímicos* de difusión y los métodos de *implantación iónica*.

⁵²Groover M.P., “*Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas*”, Prentice Hall, pp 157-161, 1997.

⁵³Chaudary K., “*Shot Peening. Process, Equipments and Applications*”, Educreation, pp 2-4, 2017.

Los tratamientos termoquímicos modifican la composición química en la región externa de los componentes mediante adición de un determinado elemento, incrementando de esta manera la dureza localmente en la zona en la que se ha inducido la modificación estructural.

El más común de estos tratamientos es la *cementación o carburización*, donde se provoca endurecimiento superficial de un componente férrico por adición de carbono. Gracias a la difusión en la zona superficial, dicha región del material se comporta como un acero de alto carbono. El proceso debe producirse a una temperatura lo suficientemente elevada para que el componente se halle en dominio austenítico, de manera que el enfriamiento rápido provoque endurecimiento en la región enriquecida por la transformación martensítica, mientras que el núcleo se mantenga con la composición y la microestructura originales. Otro tipo de tratamiento termoquímico bastante habitual es la *nitruración*, consistente en inducir la difusión de nitrógeno atómico en la superficie de los componentes a tratar; se lleva a cabo a temperaturas inferiores a las de carburización (próximas a 500°C) e incrementa la dureza considerablemente debido a la formación de nitruros. La combinación simultánea de los dos tratamientos anteriores mediante la difusión de carbono y nitrógeno, seguida de un tratamiento térmico de temple, se conoce como *carbonitruración*⁵⁴.

Los métodos de implantación iónica consisten en inyectar un flujo de iones sobre la superficie del material, de manera que se alojen en los defectos de la red o formando compuestos con nuevos parámetros, mejorando de esta manera la resistencia a la corrosión, a tracción, a fatiga y elevando la dureza. El procedimiento de implantación iónica es realizado a muy baja temperatura por lo que se minimizan de esta forma las posibles deformaciones. Además, no existen procesos de oxidación al realizarse en vacío y puede ser muy localizado⁵⁵.

Por último, los **tratamientos que modifican la superficie de materiales formadores de película** pueden clasificarse en función del modo de aplicación de los mismos: en estado *sólido*, en *fundido*, en *fase vapor* en *solución*.

⁵⁴Salán Ballesteros M.N., “*Tecnología de proceso y transformación de materiales*”, UPC, pp 71-72, 2009.

⁵⁵Barroso Herrero S., Gil Bercero J.R., Camacho López A.M., “*Introducción al conocimiento de los materiales y sus aplicaciones*”, UNED, pp 413-414, 2010.

- **Estado sólido.** Para este caso se debe mencionar el *cladding*, que es un método consistente en la unión de dos chapas: el material de base y el material resistente a la corrosión soldado por medio de diferentes procedimientos. Esta técnica es ampliamente utilizada en sectores ingenieriles. Uno de los factores que más influyen este caso es la existencia de una microestructura favorable, determinada por la composición química de ambos materiales⁵⁶.

- **Fundido.** Existen varias técnicas que emplean la deposición de material en estado fundido.

- **Hot Dip.** En este caso lo que se lleva a cabo es la introducción del componente en un baño fundido correspondiente al metal con el que se pretende recubrirlo. Es normal usarlo con Zn (*galvanizado*), así como aleaciones de dichos metales. A continuación, se comentan las características principales de la técnica más comúnmente empleada: *galvanizado en caliente (HDG – hot dip galvanization)* por lotes. Se base en meter una porción de acero en un recipiente de zinc fundido a 440-500°C, de manera que una película de zinc se adhiere a dicha porción; dicha película conferirá protección al acero frente a la corrosión. Se trata de una tecnología utilizada con el fin de proteger multitud de estructuras, tanques, conducciones de acero, componentes de fontanería, etc...El proceso de galvanizado en caliente es relativamente sencillo, lo cual otorga ventaja en comparación con otras técnicas de protección frente a la corrosión. Se compone de 3 pasos básicos: acondicionamiento, galvanizado y revisión de la superficie.

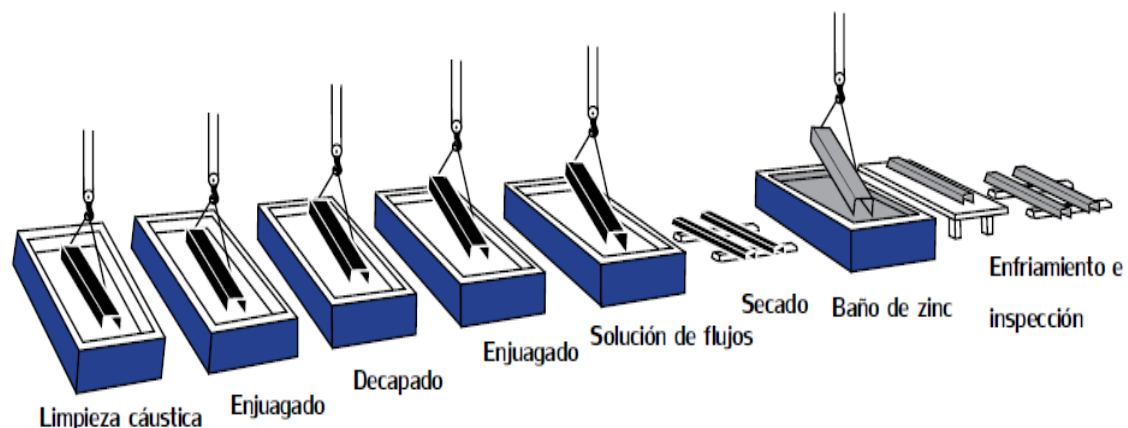


Figura 13: Proceso para galvanizado en caliente de lotes.

Fuente: American Galvanizers Association (2015)⁵⁷.

⁵⁶Shunmugam M.S., Kanthababu M., “*Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering*”, Springer, pp 571-572, 2019.

⁵⁷ American Galvanizers Association, “*Galvanizado en caliente para protección contra la corrosión. Guía del especificador*”, 2015.

El ***acondicionamiento de la superficie*** se considera el paso de mayor importancia cuando se procede a depositar un recubrimiento. La mayoría de las situaciones en las que se produce un fallo del recubrimiento con anterioridad a la finalización de su tiempo esperado de funcionamiento tienen lugar por preparar deficientemente la superficie. Se debe señalar que este paso, dentro del proceso de galvanizado en caliente, no se producirá si la superficie no se encuentra perfectamente acondicionada puesto que el zinc no experimenta reacción con acero que no esté limpio. Cualquier fallo al preparar la superficie es reflejado inmediatamente al quitar el acero del baño de zinc, puesto que las zonas sucias quedarán sin recubrir. Se han de tomar actuaciones correctoras. El acondicionamiento de superficie en galvanizado consta de:

- **Desengrasado** - Se eliminan los contaminantes de carácter orgánico contenidos en la superficie mediante solución alcalina caliente, baño de limpieza biológica o acídico leve. En el caso de epoxis, vinilos u otros contaminantes no susceptibles de eliminación con desengrasado, hay que realizar tratamientos como granallado, arenado u otros medios mecánicos, con carácter previo al galvanizado.
- **Decapado** – Mediante solución de ácido clorhídrico a temperatura ambiente o solución diluida de ácido sulfúrico caliente se elimina la herrumbre (óxidos de hierro) y la batidura de la superficie de acero. Otra opción para ello es utilizar limpieza de carácter abrasivo, chorreado de arena o incluso granallado.
- **Aplicación de flujos** – La etapa final del acondicionamiento de la superficie para la técnica del galvanizado es emplear una disolución de cloruro de amonio de zinc, con una doble finalidad. Por un lado, remover cualquier reminiscencia de óxido que haya podido quedar y por otro depositar una película que confiera protección en el acero de cara a evitar la formación de otros óxidos en la superficie previamente a la inmersión en el baño de zinc fundido.

El paso siguiente representa el ***galvanizado*** de la técnica, donde el material es sumergido enteramente en un baño de zinc fundido. La química del baño ese incluye en la especificación B6 de la ASTM⁵⁸, y necesita como mínimo un 98% de zinc puro que se mantenga más o menos a unos 449°C (840°F) y con una cantidad menor del 2% de aditivos.

⁵⁸ ASTM B6-18, “*Standard Specification for Zinc*”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.

Los aditivos más utilizados son el aluminio (Al), bismuto (Bi) y níquel (Ni), los cuales contribuyen a mejorar la fluidez, el aspecto del recubrimiento, etc. Cuando se encuentra sumergido en la caldera, el zinc entra en reacción con el Fe y forma una sucesión de películas intermetálicas de aleación Zn/Fe, con una película de superficie de zinc puro. Las películas intermetálicas se encuentran unidas (3600 psi) al acero base, teniendo mayor dureza y proporcionando gran resistencia frente a la abrasión.

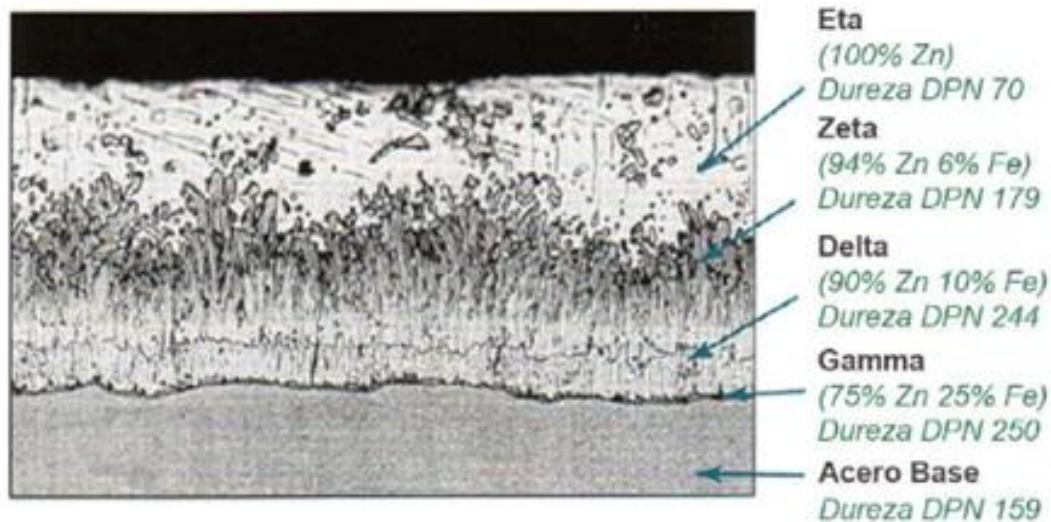


Figura 14: Fotomicrografía del recubrimiento galvanizado por inmersión en caliente.

Fuente: Yeomans, S.R. (2004)⁵⁹.

Las películas de aleación Zn/Fe se encuentran unidas al acero, volviéndose una fracción integrante del mismo en vez de simplemente un recubrimiento. Si se diera el caso de que las películas intermetálicas se dañasen (con un máximo de 1/4" de diámetro), el zinc circundante se sacrificaría con el fin de ofrecer protección al acero que pudiera encontrarse sometido a exposición hasta que dicho zinc fuera consumido totalmente. Cuando se ha finalizado el crecimiento del recubrimiento para los objetos, pueden ser extraídos del baño de galvanizado, quitándose el zinc superfluo a través de vibración, drenaje o centrifugado. La reacción de carácter metalúrgico seguirá aún con posterioridad a la extracción del objeto del baño fundido, mientras se encuentre cerca de la temperatura de dicho baño. Los objetos son enfriados al sumergirlos en una disolución de pasivación, agua o simplemente exponiéndolos a la temperatura ambiente.

⁵⁹ Yeomans S.R., "Galvanized Steel Reinforcement in Concrete", Elsevier, pp.5, 2004.

En última instancia tiene lugar la *inspección*. Dicha inspección se hace rápidamente, de una forma simple. Las dos propiedades del revestimiento galvanizado en caliente que se revisan en profundidad consisten en la apariencia y el grosor del recubrimiento. Es posible llevar a cabo una serie de medidas en el laboratorio con el fin de definir el grosor, uniformidad, adherencia y apariencia. Los objetos son galvanizados de acuerdo a los estándares que han sido aprobados y establecidos por parte de la ASTM, la Organización Internacional para la Normalización (ISO), la Canadian Standards Association (CSA) y la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Dichas normas dan cobertura a todas las situaciones: grosor de recubrimiento necesario para distintos tipos de galvanizado, composición del metal de zinc utilizado en la técnica. En hormigón, las normas que dan las directrices para el galvanizado en caliente A123, A153 y A767 de la ASTM, 1461 de la ISO y G164 de la CSA incluyen los requerimientos de espesor de recubrimiento mínimo en función de la clase de acero y espesor. Los procedimientos de ensayo y la explicación de conclusiones se ajustan a los criterios establecidos⁶⁰ por la American Galvanizers Association (AGA). Todas las publicaciones de referencia están disponibles en la web de la AGA (www.galvanizeit.org). Tradicionalmente el acero galvanizado en caliente es reconocido a causa de su eficacia protectora frente a la corrosión, sobre todo en atmósferas agresivas. Si bien el motivo fundamental para utilizar el galvanizado es la resistencia contra la corrosión, es frecuente que se tengan en cuenta otras razones tales como su menor coste inicial, vida útil, accesibilidad, sostenibilidad y empleabilidad.

Un aspecto importante del galvanizado en caliente es que se ha verificado que tiene una gran duración. El acero galvanizado en caliente se usa de forma habitual en todo tipo de operaciones industriales debido entre otras cosas a la uniformidad de la capa protectora y a la integridad de su revestimiento.

Otra característica única del recubrimiento galvanizado en caliente radica en su **resistencia a la abrasión** mediante el crecimiento de películas intermetálicas con resistencia a la abrasión que se encuentran unidas de una forma muy intensa (~3600 psi aproximadamente).

⁶⁰ American Galvanizers Association, “*Inspección de productos de acero galvanizado en caliente*”, 2016.

Existen 3 películas intermetálicas (gamma, delta y zeta) y una película externa de zinc puro (eta). A lo largo de la galvanización, dichas películas crecen de forma natural debido a la reacción metalúrgica entre el hierro en el acero y el zinc en la caldera. Asimismo, en relación a la dureza de cada una de las capas (dureza Vickers), se observa que las 3 películas intermetálicas poseen mayor dureza que el acero no recubierto, así como que la capa eta es dúctil, incrementando la dificultad de provocar daño al recubrimiento HDG. La resistencia a la abrasión del galvanizado en caliente hace que no se produzcan daños mientras es transportado e instalado. En el caso de recubrimientos con fuerzas de unión no tan grandes (300 a 600 psi), es más factible que se dañen durante alguna de sus fases, decreciendo de esta manera su eficacia.

Otra propiedad importante asociada al HDG es la **uniformidad** de su protección. Cuando tiene lugar la difusión, el crecimiento del recubrimiento galvanizado avanza perpendicularmente a la totalidad de las áreas. De esta manera, el recubrimiento presenta el mismo espesor en bordes, esquinas y áreas planas. Generalmente la acción que daña al recubrimiento tiene lugar en los bordes, de ahí la importancia de concentrar mayor protección en esas zonas. Los recubrimientos que se aplican con spray o cepillo suelen por lo general rebajar el volumen en bordes y esquinas, lo que hace que estén más expuestos a ataques. Sin embargo, la uniformidad en la protección del HDG hace que no existan zonas más propensas a que se acelere la corrosión.

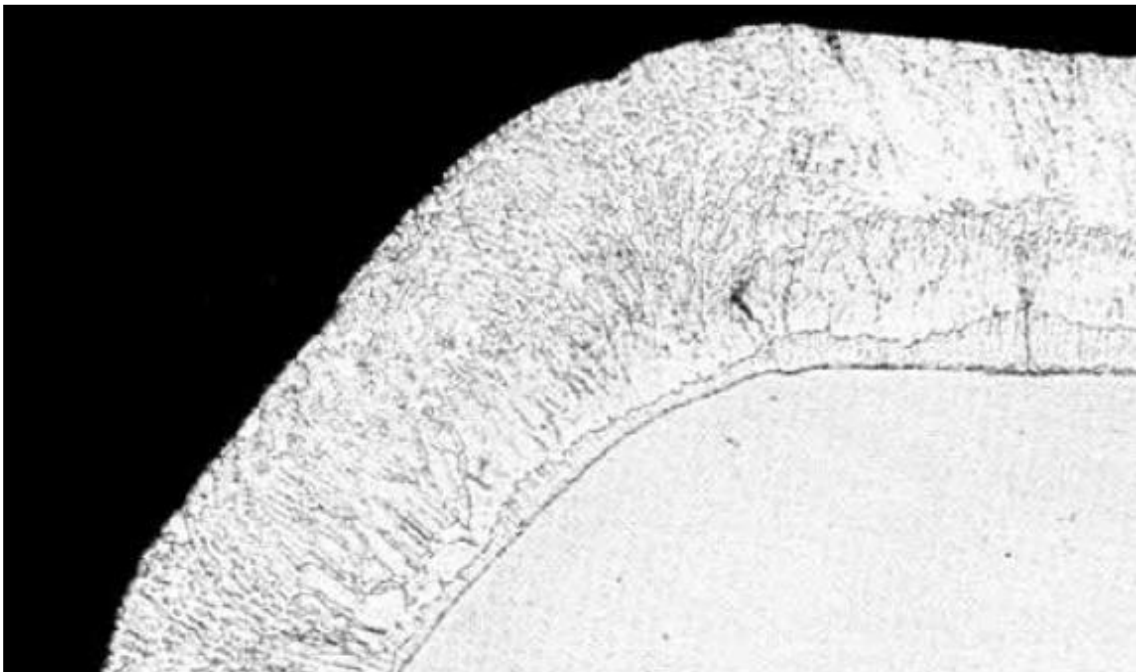


Figura 15: Espesor revestimiento de zinc en borde curvado.
Fuente: AGA (2015)

Debe comentarse, asimismo, la **cobertura completa** que ofrece el galvanizado en caliente al tratarse de una metodología que requiere inmersión completa en donde el acero es sumergido enteramente en el zinc fundido recubre todas las áreas externas e internas. Esto incluye huecos, construcciones en forma de tubo y las piezas roscadas. Esto representa una gran ventaja para el HDG, ya que en las áreas huecas es donde suele producirse mayor corrosión debido fundamentalmente a la presencia de humedad o condensación. El acero galvanizado en caliente es usado con frecuencia en atmósferas de las más agresivas que podemos encontrar a nivel industrial. La resistencia frente a la corrosión del galvanizado en caliente es variable dependiendo de la atmósfera que lo rodea, sin embargo, es habitual que se corroa en una proporción treinta veces menor que la correspondiente al acero no recubierto en una atmósfera idéntica. Con medidas de la proporción de desgaste efectivo del recubrimiento al principio de la vida útil pueden extrapolarse valores fiables con el fin de estimar del resto de vida disponible; debe tenerse en cuenta que cuando se van formando productos de la corrosión del zinc en la superficie, por lo general con gran adherencia e insolubilidad, la velocidad de corrosión habitualmente decrece. Información detallada⁶¹ relativa a la vida útil del acero galvanizado en caliente puede encontrarse en las publicaciones de la AGA.

Por otro lado, debe recalcar la **disponibilidad** inmediata y la gran **versatilidad** del acero galvanizado en caliente (HDG). Una gran variedad de configuraciones y medidas que varían desde pequeños componentes hasta partes de estructuras de gran tamaño son susceptibles de galvanizarse. Debido a que los elementos que se pretenden recubrir son sumergidos íntegramente en un baño, hasta componentes de fabricación muy complicada pueden disponer de protección frente a la corrosión. Un gran número de métodos protectores frente a la corrosión están condicionados por la humedad y la temperatura para aplicarse de forma precisa. No obstante, al estar este método sometido a control en factoría, se puede ejecutar en cualquier momento, lo cual representa una ventaja. El zinc es solidificado posteriormente a haberse retirado del baño de cara a evitar demoras en el curado; además, el acero galvanizado se puede transportar y montar en un solo día. Por ello, el material galvanizado no tiene por qué colocarse con carácter urgente, es relativamente sencillo depositarlo a la intemperie, puesto que la radiación ultravioleta del sol no perjudica las propiedades del recubrimiento.

⁶¹ American Galvanizers Association, “*Rendimiento de productos de acero galvanizado en caliente*”, 2015.

El acero galvanizado posee alta **eficiencia** debido a su alta proporción resistencia/peso. De acuerdo con World Steel Association⁶², la tasa resistencia/peso es capaz de minimizar el coste de estructura y permite generar ahorros económicos cuando se transporta y manipula, así como en materiales y energía. También debe referirse que el acero galvanizado ayuda al crecimiento de estructuras ya construidas debido a las propiedades que lo hacen flexible y fácil de almacenar. Los materiales de acero galvanizado son susceptibles de expansión a través de soldeo y empalme de partes de las estructuras ya construidas, así como adición de elementos de refuerzo. Esto hace que el espacio disponible puede ser aprovechado con una eficiencia elevada. Las estructuras de acero resultan más ligeras que bastantes materiales, y de todas maneras ofrecen un elevado grado de resistencia, permitiendo que se expandan en los espacios que ya se encuentran disponibles.

A efectos de **sostenibilidad**, la durabilidad del acero galvanizado en caliente sin necesidad de un gran mantenimiento otorga ventajas económicas de cara a las próximas décadas. A eso debe unirse la ventaja económica de que el zinc existe en el aire, agua y suelo de forma natural. Sobre 6 millones de toneladas de zinc están presentes en el ambiente animal y vegetal, precipitaciones y demás fenómenos del ecosistema. El zinc es un elemento vital: desde los humanos hasta los microorganismos más pequeños necesitan consumir determinadas cantidades de zinc para su actividad normal. Este es el motivo por el cual usar acero galvanizado en caliente no perjudica al ambiente puesto que el zinc se encuentra presente naturalmente en el ambiente.

Tanto el acero como el zinc son susceptibles de someterse a reciclado de manera indefinida sin que se eliminen propiedades químicas o físicas. Más del treinta por ciento de la provisión mundial de zinc corresponde de procesos de reciclado por año⁶³, y esta cifra podría aumentar si hubiera más zinc para reciclar. Además, el acero es el material que experimenta un mayor número de procesos de reciclado a nivel mundial.

⁶² World Steel Association, www.worldsteel.org, accedido en marzo 2023.

⁶³ Sotomayor A., “*Tecnologías Limpias. Medio Ambiente y Comercialización de Minerales*”, Universidad de Lima, Fondo Editorial, 2018.

En lo que refiere a **análisis de Ciclo de Vida (LCA)**, en 2008 la International Zinc Association (IZA)⁶⁴ encargó al grupo de eruditos de prestigio en LCA Five Winds International y PE International la tarea de generar un inventario del ciclo de vida (LCI) y una evaluación del ciclo de vida (LCA) destinado al acero galvanizado en caliente. A través de valores bibliográficos del consumo energético, emisiones de partículas/sólidos generadas en la fabricación de zinc y a lo largo del galvanizado, aglutinados con valores de encuestas obtenidos en la industria del acero, se confeccionó un LCA para el acero galvanizado en caliente.

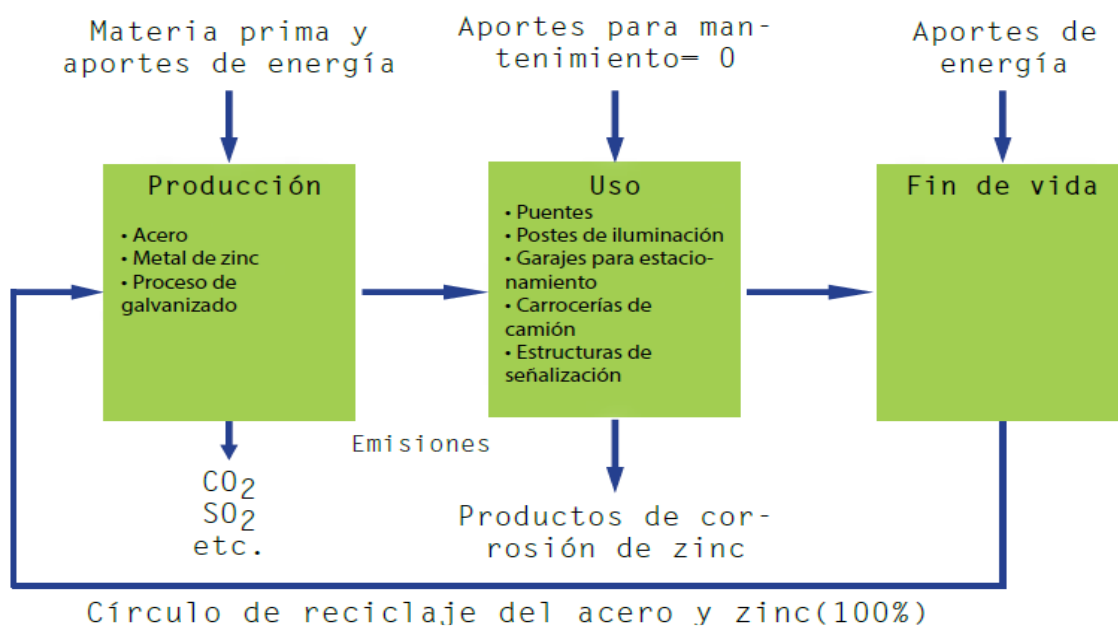


Figura 16: Análisis de ciclo de vida de acero galvanizado.
Fuente: AGA (2015)

El galvanizado en caliente posee una singularidad ya que la totalidad de la sustancia, el suministro de energía y las emisiones emitidas son aislados hacia la etapa de fabricación y es 100% reciclable cuando acaba su vida útil.

Existen publicaciones de la AGA donde aparecen de forma más detallada datos acerca de la sostenibilidad del acero galvanizado, incluyendo el análisis total referido al LCA. El acero galvanizado en caliente proporciona ganancias en el principio y a lo largo de la ejecución del proyecto. Si bien el coste preliminar es relevante, el análisis de costes a lo largo del proyecto da una evaluación de costes más detallada para próximas ocasiones.

⁶⁴ International Zinc Association, IZA, www.zinc.org, accedido en marzo 2023.

El coste del ciclo de vida (LCC) refleja tanto el coste preliminar como los costes asociados al mantenimiento a lo largo de la vida en servicio y la valoración del dinero en términos de valor actual neto (NPV) y valor futuro neto (NFV). Hacer la evaluación del LCC es difícil, con lo que, para simplificar el proceso de análisis, la AGA puso en funcionamiento la calculadora de costes del ciclo de vida por medio de lccc.galvanizeit.org⁶⁵. La calculadora online dispone de información relativa a costes que se han publicado, con lo que facilita a los usuarios el poder introducir los términos asociados a un proyecto y hacer una comparación de costes preliminares y de ciclo de vida del galvanizado en acero con multitud de procesos que confieren actividad protectora frente a la corrosión.

- **Proyección térmica.** Se introduce el material en forma de polvo (aunque también puede encontrarse como barra, filamento o cordón) en una antorcha o pistola de proyección, la cual proporciona el calor requerido de cara a la fusión de la sustancia, a través de combustión o de forma eléctrica. Cuando se calientan, las sustancias tornan a una configuración semilíquida o plástica, al mismo tiempo que experimentan una aceleración por gas comprimido. El flujo de partículas es dirigido en dirección al sustrato, entrando en contacto con su área. De esta manera son producidas plaquetas ligeras las cuales van adaptándose y adhiriéndose a todas las discontinuidades existentes en su superficie. Suele ser necesario ejecutar varias veces la operación para conseguir el espesor total de la capa.

Dentro de esta técnica se pueden emplear otras variaciones: proyección térmica por alta velocidad, llama, arco eléctrico, plasma a presión reducida o atmosférica...etc. Se trata de una metodología extremadamente variable que tiene la capacidad de poder generar depósitos de sustancias cerámicas-metálicas (cermets) incluyendo polímeros sobre casi todo tipo de sustratos. Dentro de esta técnica cabe destacar la variante *HVOF* (High-Velocity Oxi Fuel Spray) o *Proyección Térmica de Alta Velocidad*.

⁶⁵ Life Cycle Cost Calculator, American Galvanizers Association, <http://lccc.galvanizeit.org>, accedido en marzo 2023.

INTRODUCCIÓN

Esta tecnología funciona mediante una boquilla dentro de la cual se coloca una cámara de combustión que se une a 2 tuberías, proporcionándose a través de ellas una combinación de oxígeno y gas combustible. Esta mezcla es inyectada a una alta presión, del orden 0,5-3,5 MPa (unos 80-500 Psi aproximadamente), creando una llama de carácter continuo. En el medio de la boquilla se proporciona la sustancia para administrar en una forma apropiada, mientras que en otra área de la boquilla se suministra aire comprimido como método de protección. El resultado de la combustión que se produce es emitido por la boquilla a una velocidad mayor que la del sonido. Los materiales que se van a emplear se inyectan en el interior de la cámara mediante un compartimento que se une axial o radialmente. Cuando se produce la expansión y proyección de los gases, las partículas en estado fundido impactan en el sustrato, teniendo lugar una deformación plástica, enfriamiento y solidificación. Lo que determinará entonces el tipo de combustible a emplear, la temperatura del gas y las velocidades de las partículas resultantes será el diseño y medidas de la pistola de HVOF. Los gases combustibles más usados normalmente son los siguientes: propileno, propano, acetileno, mezcla de metil-acetileno-propano, queroseno, hidrógeno y oxígeno (el oxígeno es el gas más importante de cara a conservar la combustión). En función del combustible que se usa la temperatura del gas es susceptible de llegar al rango de 1.650-2.760°C. Gran influencia en la calidad del recubrimiento la tiene el tamaño de la partícula; las partículas han de tener una forma geométrica de esfera con tamaños 45-15 μm , así como unas velocidades de rociado entre los 2,25 y 12 kg/hora.

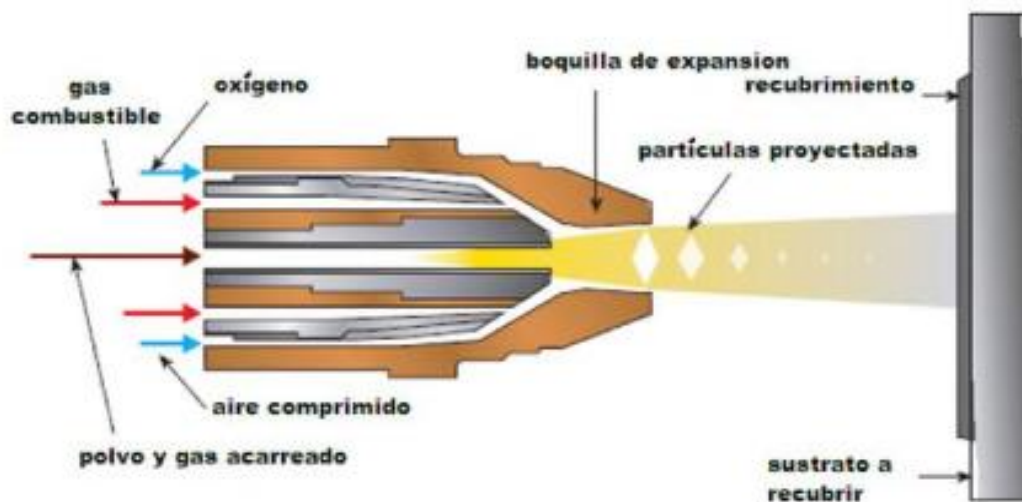


Figura 17: Esquema de funcionamiento del equipo HVOF.

Fuente: Morales Hernández J., (2013)⁶⁶

⁶⁶Morales Hernández J., Mandujano Ruiz A., Torres González J., “Corrosión y preservación de la infraestructura industrial”, OmniaScience, pp 238-240, 2013.

La técnica HVOF se ha usado con éxito depositando recubrimientos con resistencia frente a la abrasión: WC/Co⁶⁷, Cr₃C₂/NiCr⁶⁸, aleaciones base níquel o base cobalto (familia Inco718 y Tribaloy^{69,70}), del mismo modo que metales refractarios y recubrimientos con resistencia a la oxidación a temperatura elevada, del tipo MCrAlY⁷¹ (siendo M el estándar que señala la base metálica, pudiendo consistir en Ni, Fe o Co). Estos recubrimientos se caracterizan por tener una baja porosidad, así como un bajo contenido en óxido (<2%), del mismo modo que una interfaz limpia recubrimiento-sustrato. Las equipaciones HVOF son capaces de diseñarse para uso manual o automático mediante brazos robóticos, donde se mejora tanto la precisión en el manejo como el control en los parámetros de deposición.

- **Procesos electroquímicos.** En este tipo de procesos se deposita un metal mediante electrólisis. La electrólisis es un proceso fisicoquímico en el que se aplica una corriente eléctrica continua mediante un par de elementos conductores (electrodos) sumergidos en una disolución (electrolito). Tiene lugar un proceso de oxidación-reducción: en el ánodo se produce la oxidación y en el cátodo la reducción, estableciéndose una transferencia de electrones entre los electrodos y los iones. Los componentes que van a ser recubiertos actúan de cátodos. Hay infinidad de procedimientos en la industria que permiten depositar Zn, Cr, Al, Cu, Sn, Cd, Pd, Pt, Au... que parten de disoluciones adecuadas de las sales oportunas. De todas las aplicaciones de las que dispone destaca la protección contra el desgaste y la corrosión; también puede utilizarse como función estética, etc.

⁶⁷ Shipway P.H., McCartney D.G., Sudprasert T., “*Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC-Co coatings*”, *Wear*, Volume 259, Issues 7–12, pp 820-827, julio-agosto 2005.

⁶⁸ Gang-Chang J., Chang-Jiu L., Yu-Yue W., Wen-Ya L., “*Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr coating*”, *Surface and Coatings Technology*, Volume 200, Issue 24, pp 6749-6757, 1 agosto 2006.

⁶⁹ Lyphout C., Nylén P., Manescu A., et al., “*Residual Stresses Distribution through Thick HVOF Sprayed Inconel 718 Coatings*”, *J Therm Spray Tech* 17, pp 915–923, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9242-9>

⁷⁰ Sahraoui T., Feraoun H.I., Fenineche N., Montavon G., Aourag H., Coddet C., “*HVOF-sprayed Tribaloy®-400: microstructure and first principle calculations*”, *Materials Letters*, Volume 58, Issue 19, pp 2433-2436, julio 2004.

⁷¹ Brandl W., Marginean G., Maghet D., Utu D., “*Effects of specimen treatment and surface preparation on the isothermal oxidation behaviour of the HVOF-sprayed MCrAlY coatings*”, *Surface and Coatings Technology*, Volumes 188–189, pp 20-26, noviembre-diciembre 2004.

- **Procesos electroless/autocatalíticos.** En estos casos el metal se deposita partiendo de reacciones redox las cuales no necesitan electricidad. Son utilizados de forma principal con el fin de depositar Ni y en un grado más pequeño con Au, Cu y varias aleaciones. Sus utilidades más señaladas consisten tanto en anticorrosión como en antidesgaste. Este tipo de procesos de deposición de Ni electroless también pueden encontrarse en la preparación de recubrimientos para calderas de vapor supercrítico de plantas de generación de energía eléctrica⁷².
- **Tratamientos de conversión.** Estos tratamientos conducen a la generación de óxidos en la capa superficial del sustrato, aportando o no distintos elementos. Un tratamiento muy corriente es el anodizado, el cual típicamente se aplica oxidando la superficie de las aleaciones de Ti o Al a través de un proceso electroquímico con el fin de lograr su pasivación. También se pueden encontrar otros tratamientos como el fosfatado y el cromado, resultantes de la generación de óxidos con carácter protector.
- **Recubrimientos orgánicos.** Es el caso de las pinturas de uso común formadas por compuestos poliméricos las cuales se administran mediante brocha o rociado. Hay múltiples aplicaciones: pinturas para la protección térmica, anticorrosivas, tribológicas, pinturas conductoras que previenen que se acumulen las cargas estáticas, etc.
- **Procesos SOL-GEL.** Consisten en procesos altamente asequibles que permiten el depósito de materias cerámicas y óxidos. Son administrados a través de una solución coloidal con partículas de óxidos hidratados o hidróxidos que se conoce como sol, aplicada en el sustrato por medio de rociado e/o inmersión. El mencionado sol se somete a una etapa de secado y transformación en estructura sólida compacta que dispone de un líquido contenido en su interior que recibe el nombre de gel. Como paso final, a través de un tratamiento térmico el gel sinteriza generando un recubrimiento sólido en la superficie. En la práctica casi todos los óxidos son susceptibles de depositar por medio de esta metodología. Hay ejemplos de aplicación de estos procesos en el campo que nos ocupa, por ejemplo: deposición de alúmina sobre acero ferrítico P92⁷³.

⁷² Agüero A., Baraibar I., González V., et al., “Corrosion Resistance of Novel Coatings on Ferritic Steels for Oxycombustion–Supercritical Steam Boilers: Preliminary Results”, *Oxid Met* 85, pp 263–281, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11085-015-9575-y>

⁷³ Mosquera Feijoo M., Nofz M., Sojref R., Saliwan-Neumann R., Doerfel I., Kranzmann A., Perez Trujillo F., “Alumina sol-gel coatings for corrosion protection of steel P92”, *Energy Production, Environmental & Multiscale*. Volume 7. 2014. pp 119-120, 2014.

- **Slurries.** Se trata de suspensiones de partículas de metales en fase líquida, generalmente agua y aglutinante no orgánico, aplicadas por medio de inmersión, brocha y rociado. Aquéllos que comúnmente se emplean consisten en Al, si bien se pueden encontrar de AlSi, Ni, Cr y Si. La mayor ventaja radica en la sencilla administración y pequeño costo. Los slurries pueden aplicarse sobre el material base por medio de inmersión, pistola aerográfica “spray” y pintado manual (pincel), con sus respectivas fases de secado y curado. Seguidamente de su aplicación, debe realizarse tratamiento térmico adecuado en ambiente con protección, persiguiendo la generación de fases intermetálicas adecuadas de acuerdo a su último uso.

En lo que respecta a matrices de slurries de aluminio, suelen estar formadas de bases fosfato, y son curadas gracias a los enlaces de hidrógeno que se forman entre los oxígenos de los fosfatos, y los protones de las formas protonadas. Esto hace que sea necesario tener una alta acidez (pH en torno a 1-2), de cara a poseer un número adecuado de esta clase de enlaces. Existe la opción de añadir ácido ortofosfórico, H_3PO_4 para aumentar la fuerza protónica. Por motivo de la mencionada acidez, se debe someter el Al a pasivación con el fin de que no haya reacción con la mezcla debido a su elevada cinética en medio ácido. Los procedimientos de pasivación del aluminio suelen consistir en la introducción en la mezcla de ácido crómico o dicromato (superior utilización de este último), con lo que se produce un proceso electrolítico que pasiva el Al en la matriz del slurry (pH ácido).

Se ha demostrado que este tipo suspensiones es una buena opción de cara a la protección de materiales a temperaturas elevadas. No obstante, tiene desventajas relativas a la tendencia a fragilizar debido al hidrógeno, desigualdad de la superficie, adherencia... Asimismo, en casi todas las gamas mercantiles existentes, se incluye en la composición Cr+6 que procede de un estado de oxidación VI para el ácido crómico, tratándose de un agente corrosivo y oxidante agresivo. Este último punto es algo en lo que se está trabajando, de cara a conseguir slurries con la misma eficacia de cara a proteger contra la corrosión y oxidación a temperaturas elevadas, pero reduciendo los impactos medioambientales y en la salud, como por ejemplo los que utilizan aglutinante a base de aceite⁷⁴.

⁷⁴ Day L., Wiens K., “*Development of a slurry aluminide coating process with reduced environmental and health impacts*”, 17-IAGT-209, Symposium of the industrial application of gas turbines committee, Banff, Alberta, Canada, octubre 2017.

- **Fase vapor.** Existen dos técnicas muy importantes que se describen a continuación.

- **CVD (Chemical Vapour Deposition).** Tiene lugar cuando se deposita el recubrimiento a lo largo de una superficie que se calienta con una reacción química en la fase gas. Dicha reacción se puede producir de diversas formas: por descomposición de una especie en fase gas en un sólido y un compuesto gaseoso, o también por reacción de varias especies generando una deposición sólida y una especie gas. Hay algunos procesos que han sufrido modificaciones, que dependen del campo de aplicación y que se clasifican en función del medio por el que se inician las reacciones químicas y las condiciones del proceso. Existen, por ejemplo, CVD a presión atmosférica (APCVD), baja presión (LPCVD), ultravacío (UHVCVD)...

- **PVD (Physical Vapour Deposition).** Se trata de depositar el recubrimiento partiendo de un proceso físico en fase gas. El recubrimiento es generado cuando se solidifican los vapores conseguidos a través de métodos físicos. Dichos métodos consisten fundamentalmente en evaporación, el activado por un plasma, el plaquado iónico, así como el sputtering o pulverización catódica consistente en bombardear la superficie del material que se tiene que evaporar con iones de energía elevada de un gas inerte que causan la emisión de átomos o moléculas del material del recubrimiento.

Esta última técnica, High Power Impulse Magnetron Sputtering (HiPIMS) o pulverización catódica de magnetrón de alta potencia, es muy novedosa. El trabajo que condujo al desarrollo de la técnica HiPIMS se inició en el Instituto de Ingeniería y Física de Moscú (MEPhI) a fines de la década de 1960, donde se aplicaron pulsos de alta potencia a las fuentes de bombardeo de diodos. El confinamiento magnético se agregó en la década de 1980, y la técnica de magnetrón pulsado de alta potencia se desarrolló en diversas aplicaciones, incluidos los emisores de electrones. Una descarga de HiPIMS preionizada se informó a principios de la década de 1990 y se demostró que se trataba de una buena herramienta para depositar películas delgadas y para el grabado con estimulación iónica. Las primeras fuentes de alimentación HiPIMS utilizaron un tiristor de alta potencia y un condensador bastante pequeño que se cargó a través de un circuito de diodo desde una fuente de 50 Hz (o un transformador) y se descargó a través de un inductor.

En las últimas dos décadas, ha habido una mejora significativa de la tecnología de pulsos. Estas mejoras incluyen la introducción del transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) como un interruptor de alta potencia junto con condensadores o bancos de condensadores más grandes y un manejo de arco más sofisticado. Estos desarrollos han mejorado el voltaje de descarga y formas de onda de corriente, además de permitir una variación en la frecuencia de repetición y una longitud de pulso mejor definida⁷⁵. Los electrones son los principales portadores de energía en las descargas de HiPIMS y sus propiedades gobiernan los procesos de ionización y, por lo tanto, las propiedades de descarga. Las propiedades de los electrones se describen mediante los parámetros fundamentales del plasma como la densidad de electrones n_e , la temperatura efectiva del electrón T_{eff} , el potencial plasmático V_{pl} y el potencial flotante V_{fl} . Los electrones son responsables de algunos de los procesos de colisión inelástica más importantes que tienen lugar en el volumen del plasma, como la ionización de los átomos de gas de trabajo y los átomos del material pulverizado, la excitación de átomos a niveles energéticos más altos, la excitación de moléculas a estados vibratorios o rotacionales más altos, disociación de moléculas, que ocurre en particular en procesos de pulverización reactiva, y creación de iones negativos por procesos de unión⁷⁶. Debe tenerse en cuenta que la energía y la composición de las especies formadoras de película influyen fuertemente en las propiedades de las películas que se depositan. En HiPIMS, el material formador de película consiste en átomos neutros dispersados por el objetivo y sus iones. En el caso de la pulverización reactiva, los átomos, las moléculas y los iones del gas reactivo también contribuyen a la película⁷⁷.

Comparando el HiPIMS con otras descargas de pulverización catódica de magnetron, en términos del proceso de plasma, la diferencia radica en los pulsos de descarga de alta potencia aplicados y las grandes corrientes de descarga generadas⁷⁸.

⁷⁵ Hubicka Z., Gudmundsson J.T., Larsson P., Lundin D., “*Hardware and power management for high power impulse magnetron sputtering*”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 49-80, 2020.

⁷⁶ Cada M., Gudmundsson J.T., Lundin D., “*Electron dynamics in high power impulse magnetron sputtering discharges*”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 81-110, 2020.

⁷⁷ Cada M., Britun N., Hecimovic A., Gudmundsson J.T., Lundin D., “*Heavy species dynamics in high power impulse magnetron sputtering discharges*”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 111-158, 2020.

⁷⁸ Lundin D., Hecimovic A., Minea T., Anders A., Brenning T., Gudmundsson J.T., “*Physics of high power impulse magnetron sputtering discharges*”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 265-332, 2020.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de superficies mediante la adición de películas y recubrimientos delgados se utiliza en una amplia gama de aplicaciones tecnológicas, incluida la protección de superficies de herramientas de corte y conformado de metales, dispositivos ópticos y microelectrónica. La funcionalidad de las películas y recubrimientos delgados depende de manera crucial de sus atributos físicos, que a su vez se rigen por la morfología de la película y la composición de las fases. Al generar grandes cantidades de especies ionizadoras formadoras de película, HiPIMS representa una forma efectiva de controlar el crecimiento de la película y, por lo tanto, abre el camino para ajustar las propiedades del material⁷⁹.



Figura 18: Equipo de pulverización catódica.

Fuente: <http://www.termoelectricos.imm-cnm.csic.es/es/sputtering/> (accedido en abril 2020)

A continuación, y como último apartado de la introducción, se revisarán las consideraciones desde el punto de vista medioambiental, incluyendo la situación existente en relación a los impactos generados por estas centrales.

⁷⁹ Sarakinos K., Martinu L., “*Synthesis of thin films and coatings by high power impulse magnetron sputtering*”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 333-374, 2020.

1.4.- Consideraciones medioambientales

Son varios los impactos medioambientales causados por las centrales térmicas de carbón que utilizan vapor para conseguir la generación eléctrica. Los impactos pueden tener una extensión variada. Por ejemplo, el aumento de suciedad causado por el carbón y smog fotoquímico (existencia de polución en el aire producida por la interacción entre la luz del sol y algunos productos químicos presentes en la atmósfera, generándose reacciones fotoquímicas debido a la mezcla de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos volátiles en un complejo sistema de transformaciones que forma ozono) se producen a nivel local. Por otro lado, la lluvia ácida (se entiende por lluvia ácida a todo tipo de presentación que contenga grandes cantidades de HNO_3 y H_2SO_4) afectaría a un área más amplia (región o distrito). Aparte de esto, existiría la problemática de afectación mundial o global, y de sobra conocida, asociada al efecto invernadero y el calentamiento global. El primero tiene lugar en el momento que ciertos gases, por ejemplo, el dióxido de carbono o el metano, conservan una fracción de la energía emitida por el planeta tierra una vez calentada mediante los rayos solares. De esa forma tiene lugar un incremento de la temperatura similar a lo ocurrido en el interior de un invernadero. El calentamiento global, por otro lado, conlleva un aumento de la temperatura media del planeta, así como la del agua que está recubriéndole. Como consecuencia, el efecto invernadero está considerado como uno de los causantes del calentamiento global.

Existen medios para combatir los impactos medioambientales referenciados, pero obviamente no todos los países tendrán la misma capacidad para utilizarlos, ya que países en proceso de desarrollo son de los que menos medios económicos disponen.

Se estima que los factores de emisión para carbones nacionales y carbones de importación oscilan entre los 1,331 y 3,169 kg CO_2/kg de carbón quemado⁸⁰ (en función del tipo de carbón); mientras que las emisiones correspondientes a SO_2 , NO_x y partículas son del orden de decenas de gramos por kg de carbón quemado; la mayor parte de las emisiones de estos últimos contaminantes provienen de las centrales térmicas.

⁸⁰ Ministerio para la Transición Ecológica, “Factores de emisión. Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono”, Gobierno de España, pp 6, Versión 22, julio 2022

Debe reseñarse que la cantidad de emisiones dependerá obviamente de factores tales como la calidad del combustible, la tecnología empleada para la combustión, las condiciones de operación o los medios de retención de contaminantes.

En las centrales térmicas de carbón, el impacto al medio ambiente generado por los productos resultantes de la combustión se centra, como se ha mencionado anteriormente, en emisiones de CO₂ y en las emisiones de partículas sólidas, óxidos de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x), y en un rango más pequeño a los productos que han sufrido combustión incompleta tales como sólidos (C), gaseosos (CO), derivados halogenados e hidrocarburos.

Las partículas de tipo sólido que son emitidas se deben a la materia mineral presente en los carbones, que conforma tanto escorias como cenizas (óxidos de hierro, magnesio, calcio, silicatos, carbonatos, sulfatos...). Esta materia se clasifica en función del tamaño según el diámetro de partícula expresado en micras (μm). En general, esta clase de partículas es denominada como material particulado de 10μm (PM₁₀), material particulado de 5μm (PM₅) y material particulado de 2,5μm (PM_{2,5}). En lo que respecta a la legislación existente en Europa, de acuerdo a la Directiva 2010/75/UE sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), cuya transposición en España viene dada por el Real Decreto 815/2013 de 18 de octubre por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales, el valor límite de emisión de partículas en el caso de plantas térmicas que emplean carbón en función del rango de potencia nominal viene dado por:

- 50-300 MW: 20 mg/Nm³
- > 300 MW: 10 mg/Nm³

Por su parte, los óxidos de azufre que forman parte de gases de combustión tienen en un alto porcentaje la forma de dióxido de azufre (SO₂). Únicamente un porcentaje de un 3-4% es oxidado a trióxido de azufre (SO₃), debido a la existencia de metales de transición en el combustible. Se ha observado que los compuestos de partículas tienden a adsorber el SO₃; del mismo modo, la existencia de SO₃ aumenta las emisiones de material particulado PM₁₀ y PM_{2,5}⁸¹, comentadas anteriormente.

⁸¹ Guerrero García F., “Aprovechamiento térmico de residuos estériles de carbón para generación eléctrica mediante tecnologías de combustión y gasificación eficientes y con mínimo impacto ambiental”, Escuela técnica Superior Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica, pp 29-46, Madrid 2015.

Esto implica que una eliminación significativa de óxidos de azufre podría conseguirse mediante el empleo de sistemas de recogida de partículas tales como filtros de mangas y precipitadores electrostáticos (ESP).

La emisión de los óxidos de azufre genera polución en la atmósfera y cuando se hidratan provocan la lluvia ácida. A nivel europeo, de acuerdo a la Directiva 2010/75/UE sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), cuya transposición en España viene dada por el Real Decreto 815/2013 de 18 de octubre por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales, los límites máximos de emisión de estos compuestos para plantas térmicas que emplean carbón en función del rango de potencia nominal, así como el índice mínimo de desulfuración de los sistemas instalados, viene dado por:

- 50-100 MW: 400 mg/Nm³; 93%.
- 100-300 MW: 200 mg/Nm³; 93%.
- > 300 MW: 150 mg/Nm³; 97%.

En lo que respecta a los óxidos de nitrógeno (NO_x), los principales compuestos emitidos en el proceso de combustión del carbón se detallan seguidamente: el monóxido de nitrógeno también denominado óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y óxido nitroso (N₂O). No obstante, éste último no se tiene en cuenta de acuerdo a la Oficina Europea de Prevención y control Integrados de la Contaminación (IPCC), ya que la formación de óxido nitroso comparado con la formación de los otros dos óxidos es despreciable. A nivel europeo, de acuerdo a la Directiva 2010/75/UE sobre emisiones industriales (prevención y control integrados de la contaminación), cuya transposición en España viene dada por el Real Decreto 815/2013 de 18 de octubre por el que se aprueba el Reglamento de emisiones industriales, el límite de emisión de estos compuestos en el caso de plantas térmicas que emplean carbón en función del rango de potencia nominal y tecnología empleada, así como el índice mínimo de desnitrificación de los sistemas instalados, viene dado por:

- 50-100 MW: 300 mg/Nm³ (400 mg/Nm³ para combustión de lignito pulverizado); 93%.
- 100-300 MW: 200 mg/Nm³; 93%.
- > 300 MW: 150 mg/Nm³ (200 mg/Nm³ para combustión de lignito pulverizado); 97%.

INTRODUCCIÓN

En lo concerniente a los óxidos de carbono (CO y CO₂), se refiere a productos de la combustión existentes para todas las materias orgánicas. El CO perjudica el sistema respiratorio de los animales, por su lado el CO₂ potencia de forma importante el efecto invernadero, ya comentado.

Como datos significativos, según el Global Energy and CO₂ Status Report 2019 (Agencia Internacional de la Energía), cabe mencionar que, impulsadas por una mayor demanda de energía en 2018, las emisiones a nivel mundial de CO₂ asociadas a la producción de energía se incrementaron un 1,7% a un máximo histórico de 33,1 Gt de CO₂. El uso de carbón solo en energía fue superior a 10 Gt de CO₂, sobre todo en el continente asiático.

Por primera vez, la AIE estudió el impacto asociado a la utilización de combustibles fósiles en el incremento de la temperatura global. Se observó que el CO₂ que se emitía por la combustión del carbón era el causante de más de 0.3 ° C del incremento de 1 ° C en las temperaturas superficiales anuales promedios mundiales comparado con niveles anteriores a la industrialización. Lo que produce que el carbón sea considerado la fuente más importante de incremento de la temperatura del planeta. De hecho, las centrales eléctricas de carbón fueron el mayor contribuyente al crecimiento de las emisiones observado en 2018, con un aumento del 2,9%, o 280 Mt, en comparación con los niveles de 2017, superando los 10 Gt por primera vez.

Como resultado, la generación de electricidad a carbón representó el 30% de las emisiones globales de CO₂. La mayoría de esa generación se encuentra hoy en Asia, donde las plantas promedio tienen solo 12 años, décadas más jóvenes que su vida económica promedio de alrededor de 40 años.

A pesar del crecimiento en el uso del carbón, el cambio de combustible entre el carbón y el gas se aceleró en 2018, reduciendo la intensidad de carbono del uso de energía global. Impulsado por la economía y las políticas, el cambio de carbón a gas evitó casi 60 Mt de demanda de carbón, con la transición a gas natural con menos carbono que ayuda a evitar 95 Mt de emisiones de CO₂. Sin este cambio de carbón a gas, el aumento de las emisiones habría sido más de un 15% mayor. Este cambio, más significativo en China y Estados Unidos, redujo las emisiones en 45 Mt y 40 Mt, respectivamente.

El mayor uso de energías renovables en 2018 tuvo un impacto aún mayor en las emisiones de CO₂, evitando 215 Mt de emisiones, la gran mayoría de las cuales se debe a la transición a las energías renovables en el sector eléctrico.

Los ahorros de las energías renovables fueron liderados por China y Europa, que en conjunto contribuyeron con dos tercios al total mundial. La mayor generación de centrales nucleares también redujo las emisiones, evitando casi 60 Mt de emisiones de CO₂. En general, sin la transición a fuentes de energía bajas en carbono en 2018, el crecimiento de las emisiones habría sido un 50% mayor.

La eficiencia energética fue el freno más grande en el crecimiento de las emisiones en 2018, pero su contribución fue alrededor de un 40% menor que en 2017, debido en gran parte a una continua desaceleración en la implementación de políticas de eficiencia energética. Siendo la primera ocasión desde hace 10 años, 2018 reflejó un incremento de los planes para desarrollar instalaciones de captura, utilización y almacenamiento de carbono a gran escala. A finales de 2018, el número de proyectos en operación, en construcción o bajo consideración seria aumentó a 43.

Las nuevas construcciones poseen un rango de captura en potencia de 13 Mt de CO₂ por año, un aumento del 15% en la captura potencial de CO₂ en todo el proyecto global. También se espera que la expansión de los créditos fiscales para el uso y almacenamiento de CO₂ en los Estados Unidos respalde una nueva ola de inversión en estas tecnologías para los próximos años.

Actualmente, la intensidad media de carbono de la electricidad generada es de 475 gCO₂ / kWh, una mejora del 10% respecto a la intensidad desde 2010. Sin esto, las emisiones globales de CO₂ habrían sido 1.5 Gt más altas, o el 11% de las emisiones actuales del sector eléctrico. Se hubiera necesitado una mejora adicional en la intensidad del 10% para evitar aumentos en emisiones de generación de eléctrica desde 2010.

No obstante, la tendencia es hacia la descarbonización, objetivo perseguido a nivel mundial por contribuir a crear un marco sostenible y eficiente para luchar contra el cambio climático. El Acuerdo de París de 2015 fue decisivo para pasar a la acción, puesto que 195 países acordaron limitar el incremento de la temperatura global a 2 °C a finales de siglo respecto a la era preindustrial y proseguir los esfuerzos para reducirlo a 1,5 °C.

El objetivo de la descarbonización es la reducción de emisiones de carbono, sobre todo de dióxido de carbono (CO₂), a la atmósfera para lograr una economía global con bajas emisiones que consiga la neutralidad climática a través de la transición energética. Esta mayor ambición climática se ha ratificado en España mediante la Ley 7/2021 de cambio climático, en la que se ha aprobado el compromiso de neutralidad en carbono a 2050 (marcado por el Reglamento Europeo 2021/1119) y se ha incrementado el objetivo de reducción de emisiones a 2030, pasando del 40 % al 55 %. En la actualidad, la Unión Europea ha aprobado los fondos Next Generation EU, un instrumento extraordinario de 750 millones de euros para promover la reactivación económica y la recuperación tras la crisis del COVID-19. Parte de estos fondos se dedicarán a la implantación de las medidas necesarias para alcanzar los objetivos climáticos.

Como puede observarse, la problemática medioambiental es de vital importancia en el contexto energético mundial. La búsqueda de la mejora en las tecnologías y la eficiencia energética con el fin de reducir las emisiones contaminantes es continua; no obstante, debido a la dependencia del carbón, deben seguir estableciéndose iniciativas que permitan explotar este tipo de centrales generando el impacto ambiental mínimo. Los estudios más recientes están orientados hacia esta línea, incluyendo perspectivas para el año 2050⁸², y haciendo hincapié también en la calidad del carbón como aspecto clave para limitar las emisiones contaminantes⁸³.

Es aquí donde entra en juego la aportación recogida en la presente tesis:

- Por un lado, la utilización de condiciones supercríticas, ultrasupercríticas y ultrasupercríticas avanzadas permitirá la consecución de la mayor eficiencia posible en el proceso, lo que se traducirá en menor consumo de combustible, menor generación de emisiones contaminantes y mayor producción eléctrica.
- Por otro lado, el empleo en las turbinas de materiales y recubrimientos aptos para las condiciones de operación mencionadas, pero que además sean las medioambientalmente más favorables de acuerdo con la metodología de análisis de ciclo de vida, posibilitará el alargamiento de la vida útil de las turbinas de la central y la generación del menor impacto ambiental posible entre las distintas configuraciones sustrato-recubrimiento disponibles.

⁸² Semie K., Young-Il L., Doyeon L., Wonchul C., Myung Won S., Jae Goo L., Yong Sik O., “*Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts*”, Energy Conversion and Management, Volume 273-116361, 2022.

⁸³ Asif Z., Chen Z., Wang H., et al., “*Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants*”, Clean Techn Environ Policy 24, pp 2329–2347, 2022.

Seguidamente se pasará a examinar el estado del arte relativo al empleo de aceros y recubrimientos en las turbinas de vapor de las centrales térmicas de carbón que operan en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas, así como a los resultados obtenidos en los distintos ACV llevados a cabo para dichos materiales. Esto permitirá conocer la retrospectiva y la situación actual del tema, de cara a poder alinearlos con la novedad introducida en esta tesis y los objetivos que se pretenden conseguir con la misma.

2. ESTADO DEL ARTE

Se presenta a continuación una panorámica general acerca del tema objeto de esta tesis, con el fin de conocer su evolución, su situación actual y sus expectativas a futuro, así como las contribuciones aportadas por el presente estudio.

Las centrales de vapor supercrítico y ultrasupercrítico son instalaciones relativamente recientes. La historia de las centrales supercríticas se desarrolló principalmente en Japón a finales de los años 80 y principios de los 90, con la construcción y puesta en funcionamiento de varias centrales con estas características. En las últimas décadas también se han construido centrales con esta tecnología en China, Estados Unidos, Italia y Alemania. El desarrollo de las centrales ultrasupercríticas data de los últimos 15-20 años. En la actualidad se encuentra en fase de investigación y desarrollo una tecnología: la ultrasupercrítica avanzada.

Las tecnologías supercrítica y ultrasupercríticas son las más usadas actualmente, ya que, aunque presentan un mayor coste de inversión que la tecnología subcrítica⁸⁴ (fundamentalmente debido a los materiales necesarios para evitar sobrecalentamiento y corrosión), al cabo de un cierto tiempo proporcionan mayores beneficios debido a su mayor rendimiento y potencia bruta disponible, lo cual permite producir más electricidad.

En el caso de plantas supercríticas (SC) y ultra supercríticas (USC), los requerimientos de carbón por MWh son menores que en resto de plantas, lo cual hace que las emisiones también se reduzcan y se obtenga más eficiencia con menores gastos.

Cabe destacar que a día de hoy no se construyen centrales térmicas que operen en condiciones subcríticas, lo que da una idea de lo obsoleta que ha quedado dicha tecnología.

En el desarrollo de las tecnologías supercríticas han surgido problemas relativos a los materiales utilizados en las principales partes de las plantas de producción de energía eléctrica (tuberías principales, tuberías en la caldera y álabes, carcasas y rotores de las turbinas) debido al ambiente agresivo del vapor de agua.

⁸⁴ Miguel Pérez A., “Modelización de una central térmica supercrítica de 700MW con captura de CO₂”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y de Energía, Universidad Politécnica de Madrid, pp.12-16, septiembre 2014.

Se han observado procesos de corrosión y oxidación en tales materiales, lo que ha hecho evolucionar el estudio de dichos materiales y la utilización de recubrimientos resistentes contra la oxidación y corrosión a alta temperatura, no sólo para este caso en particular sino para otras aplicaciones industriales, como turbinas de gas⁸⁵ o plantas termosolares de CSP-concentración solar de potencia⁸⁶. Los materiales empleados con más frecuencia son aceros ferríticos, martensíticos, austeníticos y aleaciones termorresistentes⁸⁷. En concreto, para la construcción de las turbinas de las plantas de producción de energía eléctrica en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas, los materiales más habituales son los aceros ferríticos, los aceros austeníticos y las superaleaciones de base Ni.

Debe comentarse que tradicionalmente a temperaturas superiores a 500° C, se prefiere el uso de acero austenítico debido a que su tasa de corrosión es aproximadamente dos órdenes de magnitud menor que la del acero 9-12Cr. Sin embargo, su tasa de degradación es muy dependiente de la composición de la aleación, el acabado de la superficie y el ciclo térmico del proceso⁸⁸. Se ha demostrado que la resistencia a la corrosión de los aceros austeníticos depende de su capacidad para formar rápidamente una capa uniforme de óxido de cromo de superficie. Asimismo, la tasa de corrosión de la familia de aceros inoxidable austeníticos 18% Cr / 8% Ni puede variar por órdenes de magnitud. Su resistencia a la corrosión puede mejorarse trabajando en frío o alisando la superficie, o aumentando su contenido de Si. La pérdida máxima de metal extrapolada para 250.000 h es de aproximadamente 200 µm para aceros tipo con un contenido aproximado de 18% Cr-8% Ni a temperaturas del orden de 520° C (AISI tipo 321, 316, 304, etc.)⁸⁹. Por otro lado, el uso de aleaciones a base de níquel formadoras de alúmina puede ser una solución alternativa para las temperaturas más altas, superiores a 750° C⁹⁰.

⁸⁵ Agüero A., "Recubrimientos contra la corrosión a alta temperatura para componentes de turbinas de gas", Revista de Metalurgia, 43 (5), septiembre-octubre, pp. 384-398, ISSN: 0034-857, 2007.

⁸⁶ Summers K.L., Chidambaram D., "Corrosion Behavior of Structural Materials for Potential Use in Nitrate Salts Based Solar Thermal Power Plants", J. Electrochem. Soc. volume 164, issue 8, H5357-H5363, 2017.

⁸⁷ Di Gianfrancesco A., "Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants", ISBN 978-0-08-100552-1, <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04826-5>, Woodhead Publishing, Part One and Two, 2017.

⁸⁸ Sarrade S., Féron D., Rouillard F., Perrin S., Robin R., Ruiz J.C., Turc H.A., "Overview on corrosion in supercritical fluids", The Journal of Supercritical Fluids, Volume 120, Part 2, pp. 335-344, 2017. ISSN 0896-8446, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.07.022>.

⁸⁹ Dietz W., "Nuclear Materials, part II", John Wiley & Sons Inc, pp. 144, 1994.

⁹⁰ ASME steam tables, 6th edition, The American society of mechanical engineers, New York, 1992.

Entre la numerosa bibliografía existente sobre la corrosión de aceros y recubrimientos, cabe destacar como uno de los puntos de referencia el proyecto financiado por la Unión Europea POEMA⁹¹ (Production of Coatings for New Efficient and Clean Coal Power Plants Materials), desarrollado entre 2013 y 2016, en el que se estudiaron recubrimientos para plantas de vapor supercrítico y ultrasupercrítico, dentro del marco de uso eficiente y limpio de tecnologías para el carbón. La finalidad buscada era aumentar los valores de eficiencia de este tipo de plantas de producción de electricidad junto con la reducción de las emisiones de gases mediante aumento de las condiciones de temperatura, de modo que es necesario el estudio de recubrimientos que resistan el ataque químico del vapor y la corrosión, para su uso en los sustratos habituales para este tipo de plantas como son los aceros austeníticos (HR3C en este caso) y ferrítico-martensíticos (P92 en este caso). Un total de 31 recubrimientos fueron estudiados, incluyendo una serie de composiciones químicas, así como procedimientos y técnicas de deposición (pintado de slurry y sol-gel, proyección térmica: HVOF, PVD, etc.). Todos los recubrimientos y variaciones se testaron en distintas condiciones de operación (temperatura, presión total, velocidad de flujo y % en volumen, porcentaje de cenizas), incluyendo ambientes de gases de combustión, vapor y test cíclico. Se analizaron los resultados observados para cada parámetro de los que se hizo seguimiento, obteniéndose resultados particulares para cada tipo de recubrimiento, sustrato y tipo de deposición. También se definieron líneas de actuación para futuras investigaciones en este campo.

Otros estudios que han demostrado las buenas propiedades de recubrimientos de NiCr depositados mediante proyección térmica de alta velocidad (HVOF) para la prevención de oxidación en entornos de vapor a alta temperatura con acero P92⁹². También se han desarrollado pruebas acerca de la microestructura y cinética de este tipo de recubrimientos junto con Cr₃C₂ para aceros austeníticos AISI 347H en exposiciones de 700°C⁹³. Existen también otras variantes de los recubrimientos NiCr depositados mediante proyección térmica, como los correspondientes a FeCrAl⁹⁴, CoNiCrAlY...

⁹¹ POEMA, Production of Coatings for New Efficient and Clean Coal Power Plants Materials, <https://cordis.europa.eu/project/id/310436/es> accedido en marzo 2023.

⁹² Agüero A., Muelas R., González V., “*HVOF coatings for steam oxidation protection*”, Materials and Corrosion, Volume 59. pp. 393–401, 2008

⁹³ Kaur M., Singh H., Prakash S., “*High-Temperature Corrosion Studies of HVOF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating on SAE-347H Boiler Steel*”, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 18 (4) pp. 619–632, DOI: 10.1007/s11666-009-9371-9, diciembre 2009.

⁹⁴ Hussain T., Simms N.J., Nicholls J.R., Oakey J.E., “*Fireside corrosion degradation of HVOF thermal sprayed FeCrAl coating at 700-800°C*”, Surface & Coatings Technology 268, pp. 165-172, 2015.

También se pueden citar estudios⁹⁵ dentro de la tecnología CSP que han demostrado buenos resultados para recubrimientos resistentes a la corrosión a alta temperatura basados en Al. Muestras de acero ferrítico P92 en condiciones sin y con recubrimiento de slurry de aluminio se expusieron a la llamada sal solar (grado industrial), una mezcla eutéctica binaria de 60% NaNO₃ - 40% KNO₃, en aire durante 2000 horas a 550°C y 580°C. Los aceros ferríticos recubiertos constituyen una tecnología de menor costo que la aleación basada en Ni. Se probaron las morfologías de recubrimiento resultantes de dos tratamientos térmicos realizados a 700 y 1050°C después de la aplicación de slurry. Los sistemas recubiertos revelaron una excelente resistencia a la corrosión a ambas temperaturas, observándose por el contrario que el P92 no recubierto mostró pérdida de masa significativa desde el inicio de la prueba. Similares buenos resultados se observaron en pruebas de recubrimientos con slurry de aluminio para aceros martensíticos y al carbono⁹⁶ (P91, VM12, MarBN, A516). Los aceros recubiertos exhibieron muy alta resistencia a la corrosión en frente a los no recubiertos. La conclusión que se extrajo es que los recubrimientos de slurry de Al pueden prevenir la corrosión de ferríticos de bajo costo y acero al carbono incluso a 650°C. En condiciones sin recubrimiento, no obstante, los mejores comportamientos para frenar la corrosión corresponden al grupo de aceros inoxidable austeníticos y superaleaciones de base Ni, como demostraron pruebas realizadas con AISI 316 o aleación Inconel 601⁹⁷.

Asimismo, otro punto a mencionar es la utilización de una nueva tecnología de deposición de alta potencia por impulsos de magnetron (HIPIMS) para la deposición de revestimientos de CrN / NbN a base de cerámica con una estructura multicapa a nanoescala. Se ha utilizado para proteger aceros que tienen bajo contenido en Cr, por ejemplo, un P92, observándose que las muestras de acero P92 recubierto con CrN / NbN oxidado a 600 ° C en una atmósfera de vapor de alta presión (50 bar) al 100% durante hasta 1000 h revelan la resistencia superior a la oxidación del recubrimiento y los mecanismos de protección contra el efecto perjudicial que es ejercido por el hidrógeno.

⁹⁵ Audigié P., Bizien N., Baráibar I., Rodríguez S., Pastor A., Hernández M., Agüero A., “Aluminide slurry coatings for protection of ferritic steel in molten nitrate corrosion for concentrated solar power technology”, AIP Conference Proceedings 1850, 070002; doi: 10.1063/1.4984416, 2017.

⁹⁶ Agüero A., Audigié P., Rodríguez S., Encinas-Sánchez V., de Miguel M.T., Pérez F.J., “Protective Coatings for High Temperature Molten Salt Heat Storage Systems in Solar Concentration Power Plants”, conference Paper, noviembre 2017.

⁹⁷ Sarvghad Moghaddam M., “Corrosion of Structural Alloys in molten Salts for Solar Thermal Energy Storage”, Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology, 2018.

Las pruebas de resistencia a la tracción a alta temperatura (650 ° C), fatiga de bajo ciclo y fluencia también confirman que, a diferencia de otras tecnologías PVD de última generación, HIPIMS no es perjudicial para las propiedades mecánicas del material del sustrato ⁹⁸.

En lo que respecta a los Análisis de Ciclo de Vida efectuados para las tecnologías avanzadas de generación eléctrica mediante carbón en condiciones supercríticas, estos se enfocan mayoritariamente a la demostración de una disminución en las emisiones de gases de efecto invernadero, que alcanza valores en torno al 71% en los casos estudiados en China para centrales con captura y almacenamiento de carbono (CCS – Carbon Capture and Storage) ⁹⁹. También se han estudiado casos para centrales de carbón pulverizado supercrítico (SCPC – Supercritical Pulverized Coal) que incluyen CCS en los que se observa una disminución en el potencial de calentamiento global como categoría de impacto ¹⁰⁰. Asociada a todas estas investigaciones siempre aparece reflejada la gran disponibilidad de carbón en países emergentes como fuente de generación de energía eléctrica, así como la necesidad de reducir sus impactos contaminantes en el medio ambiente, como punto de partida para el desarrollo de estas tecnologías y de los estudios medioambientales asociados mediante la metodología ACV.

Asimismo, se observa que si bien han sido llevadas a cabo investigaciones sobre análisis de ciclo de vida tanto para materiales como para recubrimientos susceptibles de utilizarse en turbinas operando en condiciones supercríticas (véanse por ejemplo estudios realizados para aceros ferríticos tipo T-23, T-92 y HCM12 con recubrimientos de Al, Al+Cr, Al+Si, Si, Cr) ¹⁰¹, existe margen para profundizar en el estudio de componentes, recubrimientos y tratamientos superficiales de los materiales implicados, así como en el análisis pormenorizado los impactos causados por cada uno de ellos, siendo este un punto susceptible de desarrollo en futuros estudios.

⁹⁸ Hovsepian P.E., et al., “Novel HIPIMS deposited nanostructured CrN/NbN coatings for environmental protection of steam turbine components”, *Journal Alloys and Compounds*, Vol. 746, pp. 583-593, 2018.

⁹⁹ Asanta-Okyere S., Daqing T., Enemuoh E., Kwofie S., “Life Cycle Assessment of Supercritical Coal Power Plant with Carbon Capture and Sequestration in China”, *Asian Journal of Environment & Ecology* 1(2): 1-8, Article no.AJEE.31400, enero 2016.

¹⁰⁰ Petrescu L., Bonalumi D., Valenti G., Cormos A.M., Cormos C.C., “Life Cycle Assessment for supercritical pulverized coal power plants with post-combustion carbon capture and storage”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 157, pp. 10-21, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.225>, 20 julio 2017

¹⁰¹ Diaz Martin R., Pérez Trujillo F.J., Mayo del Río C., Sanglier Contreras G., “Application of the life cycle analysis (LCA) to the study of ferritic stainless steels with protective coatings”, *Conference Paper, ANQUE-ICC-BIOTEC Madrid*, julio 2014.

Debe indicarse también que otro aspecto importante del proyecto POEMA consistía en la comparación correspondiente en materia de medio ambiente de los sustratos austeníticos sin recubrimiento y los sustratos ferríticos recubiertos. El análisis de ciclo de vida efectuado evaluaba el consumo de energía en los procesos de recubrimiento (la metodología empleada era el CED – demanda acumulada de energía), teniendo en cuenta la energía total consumida en la obtención de los recursos materiales, procesos de recubrimiento, producción de sustratos, así como las emisiones de CO₂. Se utilizó el software SimaPro y la base de datos Ecoinvent (todos estos puntos se detallarán más adelante en el apartado correspondiente a Análisis de Ciclo de Vida). Los resultados probaron que, desde un punto de vista medioambiental, los aceros ferríticos recubiertos eran comparables al acero austenítico. La mayoría de los recubrimientos mostraron un desempeño ambiental ligeramente mejor que el acero austenítico. En cuanto a los costos, se puede observar el mismo patrón: la mayoría de los aceros ferríticos recubiertos desarrollados en los proyectos parecen ser más baratos comparados con acero austenítico. Véase tabla 9 con la relación de sustratos, recubrimientos y técnicas de deposición analizadas, así como los resultados de las pruebas.

Sustrato	Recubrimiento	Técnica de deposición	Resultado
P92 (ferrítico)	Slurry Al	Tratamiento térmico de difusión	Tests superados
H3RC (austenítico)	Slurry Al	Tratamiento térmico de difusión	Tests superados
DADI (hierro dúctil deformable templado)	Slurry Al	Tratamiento térmico de difusión	Mejóro desempeño DADI
IN-800HT (aleación base Ni)	Slurry Al	Tratamiento térmico de difusión	Tests superados
P92 (ferrítico)	Slurry Al/Si	Tratamiento térmico de difusión	Recubrimiento ok pero descartado
H3RC (austenítico)	Slurry Al/Si	Tratamiento térmico de difusión	Recubrimiento ok pero descartado
P92 (ferrítico)	Slurry CrAl	Tratamiento térmico de difusión	Tests superados
P92 (ferrítico)	Slurry BA1	Tratamiento térmico de difusión	Mismos resultados Slurry Al
P92 (ferrítico)	Aluminizado	Pack cementation	Tests superados
H3RC (austenítico)	Aluminizado	Pack cementation	Tests superados
P92 (ferrítico)	CoNiCrAlY	HVOF	Tests superados
H3RC (austenítico)	CoNiCrAlY	HVOF	Tests superados
P92 (ferrítico)	Cr ₃ C ₂ -NiCr	HVOF	No superó primer test debido a espalación
P92 (ferrítico)	Al ₂ O ₃ *TiO ₂	APS	Signos de corrosión presentes en sustrato debido a niveles de porosidad
P92 (ferrítico)	CoNiCrAlY + ZrO ₂	HVOF+APS	Descartado debido a su alta fragilidad y baja conductividad térmica.

P92 (ferrítico)	FeNiCrAlTiB	HVOF	Tests superados
P92 (ferrítico)	Boehmita sol-gel	Dip y Spray-coating	Tests superados
H3RC (austenítico)	Boehmita sol-gel	Dip y Spray-coating	Tests superados
P92 (ferrítico)	AlPO ₄	Dip-coating	Tests superados
P92 (ferrítico)	K ₂ SiO ₃	Dip-coating	Fallo debido a a volatilidad del silicato a alta T en atmósfera de vapor de agua
H3RC (austenítico)	K ₂ SiO ₃	Dip-coating	Fallo debido a a volatilidad del silicato a alta T en atmósfera de vapor de agua
P92 (ferrítico)	SiO ₂ sol-gel	Dip-coating	Test no superado
P92 (ferrítico)	Fe-44Cr-4Al	PVD	Buen comportamiento protector
DADI (hierro dúctil deformable templado)	Fe-44Cr-4Al	PVD	Buen comportamiento protector
H3RC (austenítico)	Fe-44Cr-4Al	PVD	Se produjo fractura
P92 (ferrítico)	Fe-44Cr-4Al-La	PVD	Resultados no mejoraron Fe-44Cr-4Al
DADI (hierro dúctil deformable templado)	Fe-44Cr-4Al-La	PVD	Resultados no mejoraron Fe-44Cr-4Al
P92 (ferrítico)	CrN/NbN (bajo en Nb)	PVD	Tests superados
P92 (ferrítico)	CrN/NbN (rico en Nb)	PVD	Tests superados

Tabla 2: Relación de sustratos y recubrimientos analizados por LCA en el proyecto POEMA.
Fuente: <https://cordis.europa.eu/project/id/310436/reporting/de>, accedido en noviembre 2019.

Puede afirmarse por tanto que, si bien las propiedades y la selección de los materiales y recubrimientos a emplear en las centrales de producción de electricidad en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas constituyen un tema que ha sido investigado a lo largo de los últimos años existiendo numerosa bibliografía al respecto, la búsqueda de un impacto ambiental mínimo en la elección de los materiales y recubrimientos empleados es un campo que no ha sido desarrollado a fondo. Aunque se ha llegado a resultados demostrables, existe todavía margen de mejora para establecer conclusiones definitivas. En la presente tesis se pretende por tanto profundizar en el estudio de estos materiales, así como de los recubrimientos y los tratamientos a someter a dichos materiales de cara a mejorar sus propiedades. Asimismo, se pretende potenciar en este contexto la selección de los materiales y recubrimientos teniendo en cuenta consideraciones medioambientales, además de los criterios mecánicos comentados anteriormente y también económicos. Ello se debe a la creciente importancia del concepto de sostenibilidad en la industria, las exigencias legislativas en materia ambiental y la utilización de herramientas como el ACV para valorar los impactos ambientales generados por los procesos industriales¹⁰².

¹⁰² Lindow K., Kaluza A., Stark R., “Study on sustainability y developments in industrial practice”, 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Procedia Manufacturing 21, pp.345–352, 2018.

En base a todo lo anteriormente expuesto, en la presente tesis se realizará un análisis del comportamiento medioambiental de los materiales elegidos, considerados como de los más representativos de los utilizados en la actualidad, así como de los recubrimientos y tratamientos a emplear en dichos materiales. Se estudiarán los sustratos designados (aceros ferríticos P91, P92, VM12 y aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321), junto con recubrimientos de slurry de aluminio, recubrimientos de NiCr (depositados mediante proyección térmica – HVOF) y recubrimientos de NbN (depositados por pulverización catódica – HiPIMS).

La cuantificación de los impactos permite hacer una caracterización y selección de acuerdo con consideraciones relativas al desarrollo sostenible. La totalidad de lo mencionado se encuadraría en el marco de referencia de Análisis de Ciclo de Vida íntegros relativos a cada uno de los materiales y recubrimientos.

Debe apuntarse que existe mucho margen de desarrollo en este campo, tanto en el desarrollo de ACV a las distintas tecnologías de generación como en el continuo estudio de nuevos materiales y recubrimientos. Los ACV están enfocándose en plantas de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles que incorporen los últimos avances técnicos en tecnologías limpias como puede ser la captura y almacenamiento de carbono (CCS)¹⁰³, captura de CO₂ post-combustión¹⁰⁴ o precalentadores de agua de alimentación impulsados por eyector de vapor¹⁰⁵ con el fin de mejorar en el aspecto medioambiental, manteniendo la máxima eficiencia posible. También se están incorporando consideraciones económicas a la hora de hacer estos estudios, tales como el coste de la turbina, el precio del carbón o el coste de la electricidad, reflejando los beneficios las centrales a gran escala¹⁰⁶.

¹⁰³ Rasheed R., Javed H., Rizwan A., Sharif F., Yasar A., Tabinda A. B., Su Y., “*Life cycle assessment of a cleaner supercritical coal-fired power plant*”. *Journal of Cleaner Production*, 279-123869, 2021.

¹⁰⁴ Akan, A.P., Chau, J.; Gullu, G., Sirkar, K.K., “*Life Cycle Assessment of Post-Combustion CO₂ Capture and Recovery by Hydrophobic Polypropylene Cross-Flow Hollow Fiber Membrane Contactors with Activated Methyl-diethanolamine*”. *Atmosphere* 14, 490, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14030490>.

¹⁰⁵ Han X., Chen N., Yan J., Liu J., Liu M., & Karellas S., “*Thermodynamic analysis and life cycle assessment of supercritical pulverized coal-fired power plant integrated with No.0 feedwater pre-heater under partial loads*”. *Journal of Cleaner Production*. 233, pp 1106-1122, 2019.

¹⁰⁶ Li M., Wang G., Xu J., Ni J., & Sun, E. “*Life Cycle Assessment Analysis and Comparison of 1000 MW S-CO₂ Coal Fired Power Plant and 1000 MW USC Water-Steam Coal-Fired Power Plant*”, *Journal of Thermal Science*. doi:10.1007/s11630-020-1327-x, 2020.

Es indudable que también constituirá una cuestión primordial la incorporación de formas de energía renovable para su utilización en la producción de electricidad en condiciones supercríticas a partir de carbón con el fin de minimizar el impacto ambiental y mejorar el rendimiento económico, fomentando la aparición de centrales híbridas.

En base a lo comentado en el último párrafo pueden mencionarse contribuciones de energía solar¹⁰⁷ o biomasa¹⁰⁸ para dar soporte a la combustión del carbón en la generación eléctrica para las centrales mencionadas; en ambos casos, se utiliza también la tecnología de captura y almacenamiento de carbono.

En lo que respecta a los materiales y recubrimientos, se continúan realizando investigaciones con multitud de sustratos y técnicas de deposición para caracterizar su comportamiento frente a la corrosión y oxidación en este tipo de entornos. Como ejemplo pueden citarse los siguientes: deposición de recubrimientos de NiCoCrAlY en aceros AISI 304 mediante laser cladding¹⁰⁹, recubrimientos de Cu en aceros AISI 316 mediante técnicas electroless y electroplating¹¹⁰, recubrimientos base Cr-Ti-N en aceros P92 mediante evaporación por arco catódico reactivo¹¹¹. También se continúa revisando el comportamiento de las superaleaciones base Ni para su aplicación a las turbinas de las plantas de vapor supercrítico (Inconel 740H¹¹², C700R-1¹¹³), así como los efectos a largo plazo de los ciclos térmicos en la microestructura y propiedades mecánicas de los principales sustratos utilizados, tales como el P92¹¹⁴.

¹⁰⁷ Zhijian D., Xuemin Y., Jintao J., Chunxi L., “Life cycle assessment of coal-fired solar-assisted carbon capture power generation system integrated with organic Rankine cycle”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 356-131888, ISSN 0959-6526, 2022.

¹⁰⁸ Xue X., Wang Y., Chen H., et al., “A coal-fired power plant integrated with biomass co-firing and CO₂ capture for zero carbon emission”, *Front. Energy* 16, pp. 307–320, 2022.

¹⁰⁹ Li Y., Nie J., Yan Y., et al., “High-Temperature Oxidation Behavior of NiCoCrAlY Coatings Deposited by Laser Cladding on 304 Stainless Steel”, *Met. Mater. Int.* 28, pp. 412–420, 2022.

¹¹⁰ Meyer Brittan A., Mahaffey J. T., Colgan N. E., Elbakhshwan M., & Anderson M. H., “Carburization resistance of cu-coated stainless steel in supercritical carbon dioxide environments”, *Corrosion Science*, 169-108639, 2020.

¹¹¹ Mato S., Sánchez-López J.C., Barriga J., Pérez F.J., Alcalá G., “Insights into the role of the layer architecture of Cr–Ti–N based coatings in long-term high temperature oxidation experiments in steam atmosphere”, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 3, pp 4257-4266, 2021.

¹¹² Kościelniak B., Chmiela B., Sozańska M., Swadźba R., Drajewicz M., “Oxidation Behavior of Inconel 740H Nickel Superalloy in Steam Atmosphere at 750 °C”, *Materials*, 14(16):4536, 2021.

¹¹³ Zhen H., Xikou H., Kun C., Xitao W., “Solidification and segregation characteristics of Ni-based superalloy C700R-1 for ultra-supercritical steam turbine rotor”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 912-165107, 2022.

¹¹⁴ Duan P., An D., Liu Z. et al. “Effect of Long-Term Thermal Aging at 680 °C on Microstructure and Mechanical Properties of P92 Steel”, *Journal of Material Engineering and Performance*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08027-9>.

En todos esos casos, futuras contribuciones podrían ayudar a completar dicha evaluación con un análisis de ciclo de vida para revisar los impactos ambientales generados por dichos materiales, recubrimientos y métodos de aplicación de estos; asimismo, consideraciones relativas a la viabilidad económica de las opciones escogidas incorporadas al análisis global refrendarían las alternativas seleccionadas.

A continuación, se recogen las características principales sobre la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV) empleada para realizar el estudio del comportamiento medioambiental de los materiales y recubrimientos seleccionados para su empleo en las turbinas de vapor de las centrales supercríticas.

3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

La evaluación del impacto medioambiental es un proceso sistemático utilizado para evaluar los posibles efectos ambientales de un proyecto, antes de que se lleve a cabo. Este proceso busca prevenir o minimizar los impactos negativos y promover el desarrollo sostenible. Hay algunos pasos determinantes en el proceso de evaluación del impacto ambiental:

1. **Identificación de Impactos Potenciales:** Se identifican y describen los posibles impactos ambientales asociados con el proyecto propuesto. Esto incluye el análisis de los aspectos ambientales de las actividades planificadas.
2. **Evaluación de la Importancia de los Impactos:** Se evalúa la magnitud y la importancia de cada impacto identificado. Algunos impactos pueden ser considerados significativos, mientras que otros pueden ser menores.
3. **Identificación de Medidas de Mitigación:** Se proponen medidas para prevenir, minimizar o compensar los impactos ambientales negativos. Estas medidas pueden incluir cambios en el diseño del proyecto, la implementación de tecnologías más limpias o la adopción de prácticas operativas más sostenibles.
4. **Evaluación de Alternativas:** Se consideran y evalúan diferentes alternativas para el proyecto, si las hay, con el objetivo de seleccionar la opción ambientalmente más sostenible.
5. **Participación Pública:** Se fomenta la participación activa de la comunidad y otras partes interesadas en el proceso de toma de decisiones. La retroalimentación de la sociedad puede influir en el diseño del proyecto y ayudar a identificar posibles problemas ambientales.
6. **Informe de Impacto Ambiental (IIA):** Se elabora un informe que resume los hallazgos de la evaluación del impacto ambiental. Este documento proporciona información detallada sobre los impactos ambientales previstos, las medidas de mitigación propuestas y las alternativas consideradas.
7. **Toma de Decisiones:** La información recopilada durante el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental se utiliza para tomar decisiones informadas sobre la viabilidad y la aceptabilidad ambiental del proyecto. Esto implica la evaluación de los riesgos y beneficios ambientales.

8. **Seguimiento y Evaluación Posterior:** Una vez que el proyecto está en marcha, se lleva a cabo una monitorización continua para asegurarse de que se implementen las medidas de mitigación y evaluar el impacto real en comparación con las predicciones realizadas durante la Evaluación de Impacto Ambiental.

La Evaluación de Impacto Ambiental es un instrumento fundamental para garantizar que el desarrollo económico se realice de manera sostenible, teniendo en cuenta la preservación del medio ambiente y el bienestar de las comunidades afectadas. Su implementación varía en diferentes países y se rige por normativas y legislaciones ambientales específicas.

3.1.- Metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) consiste en un proceso objetivo que nos permite hacer la evaluación de las cargas ambientales relativas a un proceso, actividad o producto, realizando la identificación y cuantificación del uso de energía y materia, y emisiones al ambiente, con el fin de especificar el impacto de esa utilización de recursos y emisiones y cuyo objetivo es la evaluación y puesta en funcionamiento de tácticas de perfeccionamiento ambiental¹¹⁵.

Debe tenerse en cuenta que el ACV ha de contener el ciclo íntegro del proceso, actividad o producto a evaluar: fases extractivas y de procesamiento, traslado y reparto, utilización, reaprovechamiento y conservación, reciclaje y última disposición.

Para cada etapa del ciclo de vida se analizan los siguientes aspectos implicados:

- *Adquisición de materiales y componentes.* Debe tenerse en cuenta el proceso extractivo en el medio natural, capacidad energética, impactos generados por los anteriores, traslado y almacenamiento...
- *Fabricación.* Debe considerarse tanto la producción (tienen lugar impactos ambientales en los procesos de modificación, ensamblaje y verificación, además de los residuos producidos en ellos) como el embalaje (la repercusión de los impactos de embalaje a nivel global en la economía es muy alta, debiendo explorar opciones ecológicas para embalar).
- *Distribución.* El traslado, almacenamiento y distribución generan impactos importantes en el ambiente (se emite polución, ruidos...), que deben ser tomados en consideración.
- *Utilización.* Suele ser un aspecto que se ha revisado en profundidad, si bien es aquí donde se generan los impactos ambientales más importantes (gastos energéticos, producción de residuos...).

¹¹⁵ Instituto Superior del Medio Ambiente, ISM, <http://www.ismedioambiente.com> , accedido en marzo 2023.

- *Fin de vida.* Se trata de una etapa significativa ya que provoca un análisis de las etapas previas; véase ilustrativamente el sector del automóvil¹¹⁶, donde se considera un ítem que se menciona concretamente en diferentes textos legislativos que disponen como se deben gestionar los residuos de un automóvil cuando termina su vida útil.
- *Reutilización.* Cada vez es más importante comprender que los residuos pueden ser recursos o materias primas para otros procesos productivos

En la figura 19 se esquematiza de forma resumida lo comentado en el párrafo anterior:

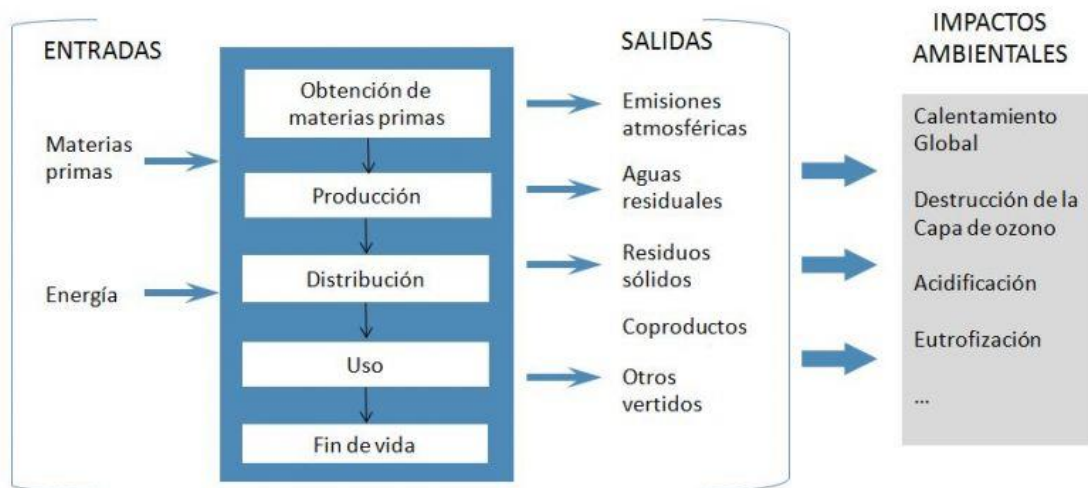


Figura 19: Procesos durante el ciclo de vida e impactos ambientales generados.

Fuente: <https://www.construction21.org/espana/community/pg/pages/view/549/> (accedido en marzo 2023)

En lo referente al marco normativo del ACV, hay que mencionar al organismo no gubernamental ISO (International Organization for Standardization) como responsable de promover las normas internacionales para la normalización de la gestión ambiental (serie ISO 140XX). Dentro de esas normas se encuadran las relativas al ACV.

Dichas normas son, evidentemente, voluntarias. A la hora de preparar su elaboración se organizan TC – Comités Técnicos (Technical Committee), SC - Subcomités (Sub-Committees) y WG (Working Groups).

¹¹⁶ Environment Agency, “Application of Life Cycle Assessment to Investigate Options for Disposal and Processing of End of Life Vehicles in 2015”, UK, ISBN 1857059751, 2002.

El Comité Técnico TC-207, Subcomité SC5 está a cargo de la normalización del ACV, con un total de 11 normas publicadas y 2 normas que se encuentran en periodo de desarrollo actualmente.

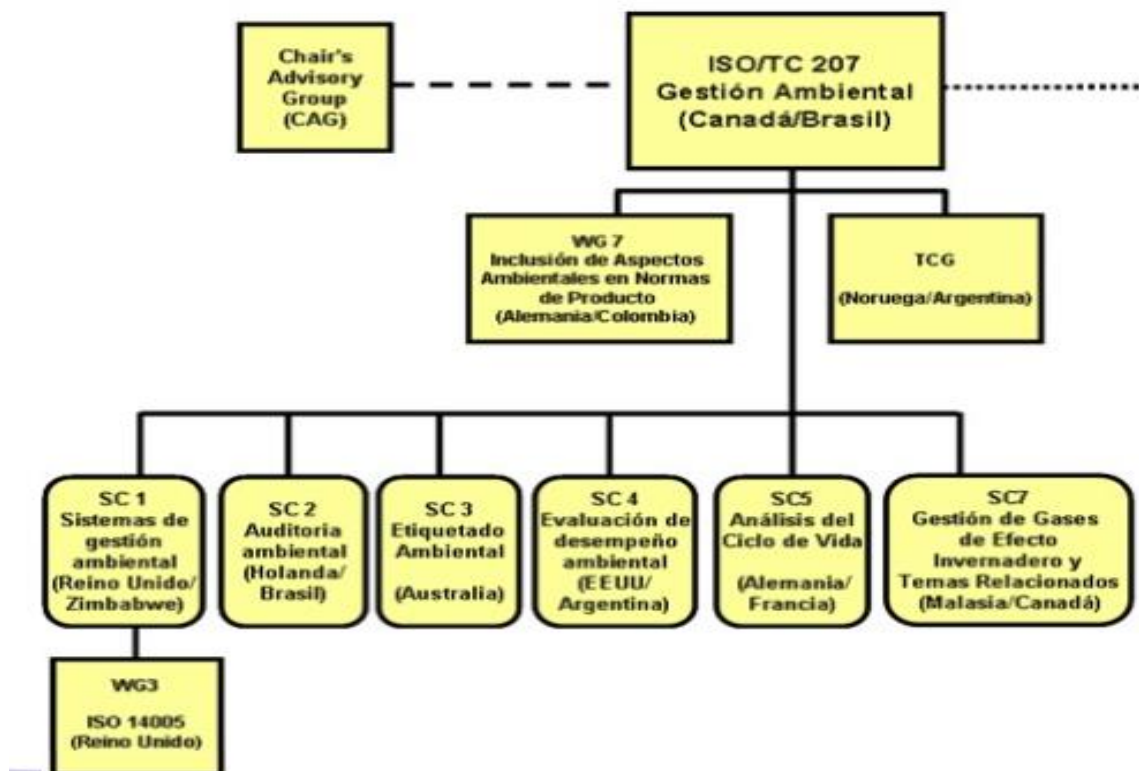


Figura 20: Organigrama del Comité Técnico TC-207.
Fuente: ISO¹¹⁷ (accedido en marzo 2023)

Las normas principales que se mencionan cuando se ejecuta un ACV son:

- *Norma UNE-EN ISO 14040:2006* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia. Dicha 2ª edición de la Norma ISO 14040 (la primera data del año 1998), conjuntamente a la Norma ISO 14044:2006, suprime y sustituye a la Norma ISO 14041:1998, ISO 14042:2000 e ISO 14043:2000, todas sometidas a revisión técnica en su día.
- *Norma UNE-EN ISO 14044:2006* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices.

¹¹⁷ ISO (International Standard Organization), *Standards Catalogue, ISO/TC 207/SC 5, Life Cycle Assessment*, www.iso.org, accedido en marzo 2023.

En la norma UNE-EN ISO 14040 (Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia), se considera que el Análisis de Ciclo de Vida es una metodología que analiza tanto los aspectos medioambientales como los impactos ambientales probables durante el ciclo de vida de un producto, por medio de:

- Compilación del inventario de entradas y salidas que son representativas del sistema del proceso o producto estudiado;
- Evaluación de posibles impactos ambientales que están vinculados con entradas y salidas que han sido registradas;
- Estudio de resultados de las etapas anteriores de análisis del inventario y evaluación de impacto en función de lo que pretende el estudio¹¹⁸.

Aunque la totalidad de los ACV se componen de fases similares, el grado de concreción no siempre es igual en cada uno, puesto que son función fundamentalmente del propósito a cubrir¹¹⁹. Esto genera 3 clases de ACV diferente:

- *ACV conceptual*. Se trata del ACV con mayor simplicidad. Es un análisis fundamentalmente cualitativo, con el objetivo fundamental de identificar los posibles impactos que posean mayor significancia. Usa datos básicos
- *ACV simplificado*. Se trata del siguiente en nivel de dificultad. Funciona aplicando el método del ACV para ejecutar un análisis selectivo (teniendo en cuenta únicamente valores generales y englobando el Ciclo de Vida someramente), acompañado de un resumen (concentrándose en las fases más relevantes) así como un análisis de cuán fiables son las conclusiones obtenidas
- *ACV completo*. Corresponde al tipo más complicado. Se trata de ejecutar un análisis en profundidad del inventario e impactos, cualitativamente y también cuantitativamente.

¹¹⁸ ISO (International Standard Organization) 14040:2006, *Environmental Management –Life cycle assessment. Principles and framework*. International Organization for Standardization (ISO).

¹¹⁹ Haya E., “*Análisis de Ciclo de Vida*”. Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental. EOI Escuela de Organización Industrial. 2016.

En función de los pasos que integran el ciclo de vida, lo general es tener distintos límites del sistema durante la realización del ACV¹²⁰, resultando los más frecuentes los que se comentan a continuación, que son los que se encuentran habitualmente:

- *De la puerta a la puerta (Gate to Gate)*: solamente se tienen en cuenta las tareas (fase de fabricación) de la compañía a la que se está analizando.
- *De la cuna a la puerta (Cradle to Gate)*: se tiene en cuenta el proceso que parte de la extracción y adecuación de recursos y finaliza en la fase de fabricación de la compañía.
- *De la puerta a la tumba (Gate to Grave)*: examina la fase de fabricación de la compañía y engloba hasta que se gestionan los residuos que genera el producto.
- *De la cuna a la tumba (Cradle to Grave)*: engloba desde la adecuación de recursos hasta que se gestionan los residuos (reciclado u otras metodologías). Estos serán los límites de los ACV desarrollados en la presente tesis.
- *De la cuna a la cuna (Cradle to Cradle)*: tiene en cuenta el ciclo de vida íntegro, ya que abarca desde la adecuación de recursos hasta que el producto, una vez terminada su utilización, es reinsertado en un proceso de fabricación igual o análogo.



Figura 21: Alcance del ACV.

Fuente: <https://es.slideshare.net/StefhanieQuiroz/norma-tecnica-colombiana-iso-14040-49688070> (accedido en marzo 2023)

¹²⁰ Guinée J.B., Heijungs R, Huppes G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T., Rydberg T., “Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future”. Environmental Science & Technology. 45 (1), pp. 90-96, 2011.

Se debe tener en cuenta que cuando se analizan impactos asociados al Análisis del Ciclo de Vida se han de considerar los aspectos ambientales y los energéticos mediante un estudio detallado. De cara a justificar el propósito para la realización de un ACV, se ha de considerar obviamente la cuantificación de las emisiones ambientales del producto de estudio con el fin de identificar posibles oportunidades de mejora que redunden en un menor impacto ambiental y en una reducción del gasto de recursos durante el completo ciclo de vida del producto¹²¹. No obstante, en cualquier caso, dependiendo del propósito específico y los límites establecidos para cada ACV en particular puede requerirse un distinto nivel de detalle con respecto a los datos recogidos. Varios propósitos típicos son:

- *Desarrollo de un producto.* En el caso de desarrollo de productos con ACV, se tratará de desarrollar un diseño que repercutirá en el proceso medioambiental, existiendo muchas opciones para la elección de materiales y recursos. El uso de ACV en un desarrollo de producto es crítico ya que cualquier decisión relativa a los materiales y recursos afectará a las siguientes fases del ciclo de vida de producto. Es por ello que la mayor brevedad que se aplique eficientemente el ACV en la etapa de diseño, menor será el impacto del producto en el medioambiente. Esto será de vital importancia en la búsqueda de alternativas sostenibles válidas para las próximas generaciones¹²².
- *Mejora de producto.* En este caso el ACV es menos complejo que en el caso anterior al disponerse ya de las características esenciales del producto. Por tanto, habrá que poner el acento en la recopilación de datos, enfocándose en los materiales y recursos que produzcan la mayor afectación del producto. Los resultados obtenidos permitirán comparar diversos productos de categoría equivalente evaluando el impacto en el medio ambiente generado por cada uno de ellos. Asimismo, se recomienda efectuar una evaluación de la mejora de las distintas opciones identificadas de cara a conseguir una optimización de los resultados¹²³.

¹²¹ Ibrahim Menoufi K.A., “*Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art*”. Treball de final de master. Màster en Ciències Aplicades a l'Enginyeria, Escola Politècnica Superior, Universitat de Lleida, 2011.

¹²² Klöpffer W., “*Life-Cycle based methods for sustainable product development*”. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8:157, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02978462>.

¹²³ Azapagic A., Clift R., “*Life cycle assessment as a tool for improving process performance: A case study on boron products*”. The International Journal of Life Cycle Assessment, 4:133, 1999. <https://doi.org/10.1007/BF02979447>

- *Marketing*. El marketing es el proceso de comunicar un producto de características que coinciden con las necesidades y expectativas del cliente para ciertos niveles de requisitos de calidad. Como el nivel de conciencia ambiental está aumentando, cada vez es mayor la atención que se presta por parte del consumidor a las propiedades ambientales de bienes y servicios. En el caso de realización de un ACV con el propósito de marketing ambiental, el tipo más relevante de este tipo de marketing se denomina etiquetado ecológico (Eco-etiquetado). La etiqueta ecológica es un emblema que se concede a ciertos productos, los cuales cumplen una relación de requerimientos de tipo ecológico y por ello se estima que poseen un impacto medioambiental más pequeño que productos similares en categoría. El eco-etiquetado informa y estimula tanto a los consumidores, a escoger productos y servicios con un menor impacto sobre el medio ambiente, como a los fabricantes mediante la compra de productos con eco-etiquetas. Existen 3 clases de eco-etiquetas: tipo I, tipo II y tipo III.

Las eco-etiquetas tipo I consisten en un certificado emitido por una tercera parte en base a unos requisitos de carácter voluntario y que deben satisfacer varios criterios. Se otorgan etiquetas a los productos que son preferibles a nivel ambiental en lugar de otros productos semejantes teniendo en cuenta requisitos de ciclo de vida¹²⁴. El objetivo de los programas de etiquetado ambiental tipo I es reducir los impactos ambientales asociados a los productos, identificando aquellos que cumplen con los criterios de un programa específico Tipo I. La certificación asegura que el producto cumple con criterios ambientales y con las características funcionales; es creíble, fiable y facilita la elección del consumidor.

Las Etiquetas Ecológicas Tipo II son enunciados, símbolos o gráficos que describen características ambientales del producto. Son autodeclaraciones que hacen los propios fabricantes. Para ello se puede emplear la Norma ISO 14021¹²⁵, aunque ésta no define los pictogramas específicos asociados a los aspectos ambientales a distinguir, dificultando por ello su reconocimiento por consumidores.

¹²⁴ ISO (International Standard Organization) 14024:2018, *Environmental Labels and Declarations–Type I environmental labelling-Principles and procedures* International Organization for Standardization (ISO).

¹²⁵ ISO (International Standard Organization) 14021:2016, *Environmental Labels and Declarations–Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling)*. International Organization for Standardization (ISO).



Figura 22: Espiral Möbius, ejemplo de eco-etiqueta tipo II. Indica que el producto se debe depositar en un punto de recogida selectiva por ser reciclable.

Fuente: <https://sp.depositphotos.com> (accedido en marzo 2023)

Las etiquetas ecológicas de tipo III o EPD consisten en enunciados medioambientales que proporcionan datos cuantitativos específicos fundamentados en indicadores¹²⁶. Las eco-etiquetas tipo III vienen definidas en la ISO 14025. Proporcionan datos standard a partir del análisis del ciclo de vida de un proceso, servicio o producto. Son sometidas a verificación por parte de una 3^{ra} entidad autónoma, si bien no son imperativamente sometidas a certificación. Estas declaraciones ambientales son todavía poco utilizadas, aunque poseen la ventaja de que han sido desarrolladas principalmente por la industria y por tanto se ajustan perfectamente a la misma. Las declaraciones ambientales tipo III se caracterizan por ser creíbles, objetivas y fiables, informativas, comparables a mediante Análisis del Ciclo de Vida, entendibles, sin barreras comerciales, proporcionan beneficios en el mercado (mejora continua) y actualizables.

¹²⁶ ISO (International Standard Organization) 14025:2006, *Environmental Labels and Declarations–Type III environmental declarations-Principles and procedures* International Organization for Standardization (ISO).

3.2.- **Ámbito general y Etapas de un ACV**

No existe una metodología única para llevar a cabo el ACV, pero las principales etapas en las que se puede dividir el ACV, de acuerdo a la norma ISO 14040:2006 son:

- **Definición de Objetivos y Alcance.** Se presentan la justificación por la que se lleva a cabo el análisis y se define el alcance donde en el cual se establece el grado de detalle requerido.
- **Análisis de Inventario.** Es en esta etapa donde se identifican y cuantifican la totalidad de inputs (gasto de materias primas y otros elementos) y los outputs (vertidos, emisiones...) susceptibles de generar impacto a lo largo del ciclo de vida. Los datos que se obtengan aquí son el inicio para evaluar impactos del ciclo de vida.
- **Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV).** En esta etapa son asociados los inputs y outputs elegidos en el inventario con los potenciales impactos sobre materias primas, ecosistema y salud humana, de cara a catalogar e interpretar la trascendencia de los impactos causados.
- **Análisis de los Resultados.** La interpretación es la unión de lo obtenido en el Análisis de Inventario y en la Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida con la finalidad de extraer, según la finalidad y ámbito de aplicación fijados, resoluciones que posibiliten decidir las actuaciones pertinentes por parte de los interesados o responsables correspondientes.



Figura 23: Fases de un ACV.
Fuente: ISO 14040:2006

La orientación al ciclo de vida y los métodos referenciados en las normas ISO 14040 y 14044 son capaces de interactuar con diversos mecanismos para la gestión medioambiental: auditorías ambientales¹²⁷; y estudios de impacto ambiental, frecuentemente utilizados.

Del mismo modo se complementan con otras normas en las que se detallan todos los aspectos relativos al cálculo de la huella de carbono de los productos, así como requerimientos que a la hora de evaluar pueden identificar aquellos procesos que hacen aumentar de manera sustancial la huella de carbono durante el ciclo de vida del producto. Esto permite a las empresas establecer directrices para la disminución de emisiones empleando actuaciones concretas en los puntos más significativos e incrementar el rendimiento en el proceso de fabricación del producto. La huella de carbono aporta una comunicación fiable a los usuarios a la vez que les reporta una información que constituye el valor añadido del producto en sí frente a la competencia.

Cabe igualmente mencionar que la orientación al ciclo de vida es compatible con sistemas para la gestión como el EFQM, que lo incluye en los subcriterios asignados al criterio agente o facilitador de Procesos, productos y servicios¹²⁸.

Por último, hay que mencionar que el análisis del ciclo de vida lleva incluido un enfoque holístico que es aplicable en el día a día puesto que ayuda a implementar la forma en la que los comportamientos que tenemos contribuyen a desarrollar una forma de vivir que lleve implícita una responsabilidad de tipo medioambiental. Ejemplos correspondientes a este último punto pueden fácilmente encontrarse en actos tan sencillos como el reciclaje de envases de plástico, cartones o vidrios; la compra y utilización de productos más respetuosos con el medio ambiente (biodegradables, reciclables, baja huella de carbono, ecológicos, con etiqueta ecológica, etc...); el consumo moderado de agua en nuestros hogares...

¹²⁷ Herrera Orozco I., “Análisis de Ciclo de Vida de Sistemas Energéticos”, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), 2012.

¹²⁸ Suárez Redondo E.M., “Análisis estructural del modelo EFQM de Excelencia: el papel mediador de la gestión por procesos y la planificación estratégica”. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Administración de Empresas y Marketing, 2017.

3.2.1.- Definición de Objetivo y Alcance

Esta primera etapa explica el propósito principal del estudio, los límites del sistema, tanto físicos como temporales, y define con precisión la medida base que servirá de referencia a los inputs y outputs, además de las posibles reglas de asignación de cargas.

Para definir bien estos límites y acotar el ACV, deberán desarrollarse los siguientes conceptos:

- *La unidad funcional:* se trata de la medida a la que irán referenciados todos los inputs y outputs de la configuración. Esto permitirá comparar de manera objetiva los impactos generados, y tendrá gran relevancia en el caso de que se realicen análisis para comparar productos con idéntica función¹²⁹. La unidad funcional puede tratarse de una de tipo físico o de tipo funcional.
- *El sistema que se estudiará:* conjunto de procesos que realizan una función definida. El sistema se representa mediante un diagrama de procesos que incluye los flujos de producción y traslado de las piezas del producto y recursos naturales asociados, así como las etapas del ciclo de vida del producto ya fabricado.
- *Límites del sistema:* es necesario establecer los límites del sistema pues analizar todos los procesos sería una tarea interminable, por ello las etapas que se suelen excluir son las que tengan menor peso o importancia. Del mismo modo, tienen que determinarse varios términos: situación en el tiempo, a nivel geográfico, así como capacidad tecnológica. Tiene gran importancia el aspecto tecnológico puesto que fijará los métodos de los que se extraerán los datos, acogiéndose a datos estándar del país o a la mejor opción disponible globalmente.

La determinación del propósito del estudio tiene que ser sencilla y estar alineada con el uso al que se destina, incluyendo: identificación del ejecutor del análisis, motivos de cara a la ejecución de dicho análisis, calidad de los datos que se obtendrán, la finalidad que se prevé para el análisis, la utilización que se le va a dar a los valores obtenidos y el destino del estudio (tipo de informe, así como su difusión).

¹²⁹ Lechón, Y., Cabal H., Lago C., de la Rúa C., Sáez R.M., Fernández M., “Análisis del ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte. Fase I. Análisis del Ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina”. Energía y Cambio Climático, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente. Ministerio de Educación y Ciencia. CIEMAT. 2015.

El alcance del ACV ha de ser especificado después de la definición del objetivo del mismo. Dicho alcance definirá los límites del estudio y determinará los procesos singulares que contendrá el ACV.

También incluirá, como se ha mencionado anteriormente, el establecimiento de la unidad funcional, los requerimientos para asignar cargas de clase medioambiental, clases de impacto para evaluación, método para extraer conclusiones, así como clases y orígenes de información y requerimientos de calidad de dichos datos.

Se debe tener en cuenta que se trata de una fase muy importante de la metodología ACV porque aquí es donde se determina el enfoque exacto a seguir. Sin embargo, tanto el objetivo como el alcance pueden modificarse durante el curso del estudio una vez se vaya disponiendo de información. Las reglas dadas por los estándares son intencionalmente flexibles para permitir que se definan una variedad de posibilidades en el objetivo y el alcance¹³⁰.

La asignación de cargas (flujos de materiales, energía, emisiones...) a la unidad de referencia es realizada por medio de la relación causal. Según dicho principio, las cargas son asignadas al producto que las ocasiona, o en su caso al producto que justifica la existencia de la tarea. En el caso de no fuera factible su aplicación, existe la opción de emplear diversas metodologías. Entre los más importantes de dichos métodos se encuentra el que radica en que la adición de inputs y outputs de los sistemas de los cuales se ha realizado asignación sea la misma que la adición de inputs y outputs previamente a haberse asignado.

Por otro lado, cabe mencionar que la elección de una metodología para asignar dependerá de si la al evaluar el ciclo de vida se realiza se tiene en cuenta la perspectiva atribucional o de consecuencia.

¹³⁰ Curran M.A., “*Overview of Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment*”. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment, 2016.

El *ACV de atribución* muestra las cargas medioambientales que se relacionan con la configuración estudiada, utilizando valores concretos para un proceso unitario o valores medios con factores de asignación de cara a distribuir las cargas para todos los co-productos¹³¹. La medida de la unidad de referencia no compromete los datos obtenidos, puesto que se encuentran conectados linealmente¹³². Se suelen incluir la totalidad de fases. Un supuesto del ACV de atribución es la consideración de que no existen límites para la demanda y fabricación de bienes, de modo que dicha demanda siempre puede ser aumentada con carácter indefinido en función de los requerimientos que se indiquen.

El *ACV de consecuencia* analizan las consecuencias ambientales de una modificación en la configuración de estudio; la modificación puede consistir en incremento o decremento en la demanda del propósito del análisis o en un cambio asociado al proceso, que implicaría el uso de información marginal¹³³.

3.2.2.- Análisis de Inventario

El Inventario del Ciclo de Vida (ICV) lleva asociado la recolección de la información requerida de cara a satisfacer el propósito y ámbito de aplicación del ACV. Consiste en identificar y evaluar los inputs (recursos naturales, requerimientos energéticos, etc.) y outputs (vertidos, desechos, etc.) en todas las fases del ciclo de vida del producto. La información tenida en cuenta tiene que relacionarse de una forma directa con la unidad de referencia escogida en la etapa anterior.

Asimismo, la información recabada aquí es el origen de la Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida. Si el inventario de ciclo de vida no está bien hecho, no se dispone de cimientos sólidos de cara a la evaluación de impactos ambientales o incluso posibles progresos. El grado de concreción de los valores obtenidos tendrá influencia en la totalidad del estudio.

¹³¹ Schmidt J. H., “System delimitation in agricultural consequential LCA: Outline of methodology and illustrative case study of wheat in Denmark”. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, pp. 350-364, 2008.

¹³² Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G., Rydberg T., Schmidt W.P., Suh S., Weidema B.P., Pennington D.W., “Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications”. *Environment International*, v. 30, pp. 701-720, 2004.

¹³³ De la Rúa C., “Desarrollo de la herramienta integrada “Análisis de Ciclo de Vida – Input Output” para España y aplicación a tecnologías energéticas avanzadas”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 2009.

Sin embargo, en el caso de que no sea factible poder obtener datos con la mayor precisión posible, esto podría afectar al entorno del estudio, pero no debería poner en tela de juicio el fundamento teórico del análisis.

Para facilitar esta tarea es necesario recabar datos del fabricante del producto estudiado y cuando esto no sea posible, se puede recurrir a bases de datos. Dichas bases de datos están incorporadas en los softwares que ejecutan los análisis de ciclo de vida. Debe tenerse en cuenta que puede utilizarse información que viene de una sola base de datos o de varias de ellas. La mayor parte de los programas informáticos tienen la opción de modificar las bases de datos disponibles y generar otras no existentes. Se detallan a continuación las principales:

- *ETH-ESU 96*. Base de datos de energía. Contiene datos sobre emisiones de generación energética primaria, refinería y distribución, adquisición de recursos minerales, fabricación de productos semi-manufacturados, materiales auxiliares y de operación, provisión de servicios de transportes, tratamiento de residuos, construcción de infraestructuras y la conversión de energía y transmisión.
- *BUWAL 250*. Datos de: plástico, vidrio, papel, cartón, celulosa, papel de embalaje, aluminio, acero, vertido de RSU, incineración de RSU, tratamiento de RSU en Suiza, generación de electricidad y producción de energía térmica. Contiene datos de emisiones de la fabricación de recursos, generación energética, fabricación de materiales semi-manufacturados y transporte.
- *Ecoinvent*©. Contiene los datos de más de 2.500 materiales y procesos. Los inventarios han sido estudiados y diseñados dentro de la ejecución del proyecto Ecoinvent 2000¹³⁴, generando la base de datos considerada como más exhaustiva y con datos más fiables; esta base de datos está disponible prácticamente en la totalidad de programas de ACV. La información se basa mayoritariamente en los datos del tejido industrial alemán y suizo, pero son extrapolables a la totalidad de Europa.
- *Resto de bases de datos*. Se citan aquí otros ejemplos de menor importancia y/o más antiguas como Data archive, Idemat, Industry data, Franklin, IVAM.

¹³⁴ Weidema B., “Ecoinvent database version 3 – the practical implications of the choice of system model”. The ecoinvent Centre, St. Gallen, Switzerland, 2016.

Los resultados que se derivan de un inventario proporcionan el ICV o Inventario del Ciclo de Vida que aporta información acerca de los flujos elementales de entradas y salidas, desde el medio ambiente y hacia él, de todos los procesos unitarios intervinientes en el estudio. La recopilación de datos, fijados los límites del sistema, para cada proceso unitario corresponden a entradas de energía, materias primas etc., productos, subproductos y residuos, emisiones al aire y al terreno.

Los pasos para realizar cuentas partiendo de la obtención de los valores deben también validar dichos valores, así como comprobar su relación en procesos singulares y en el flujograma al que va referenciado la unidad funcional.

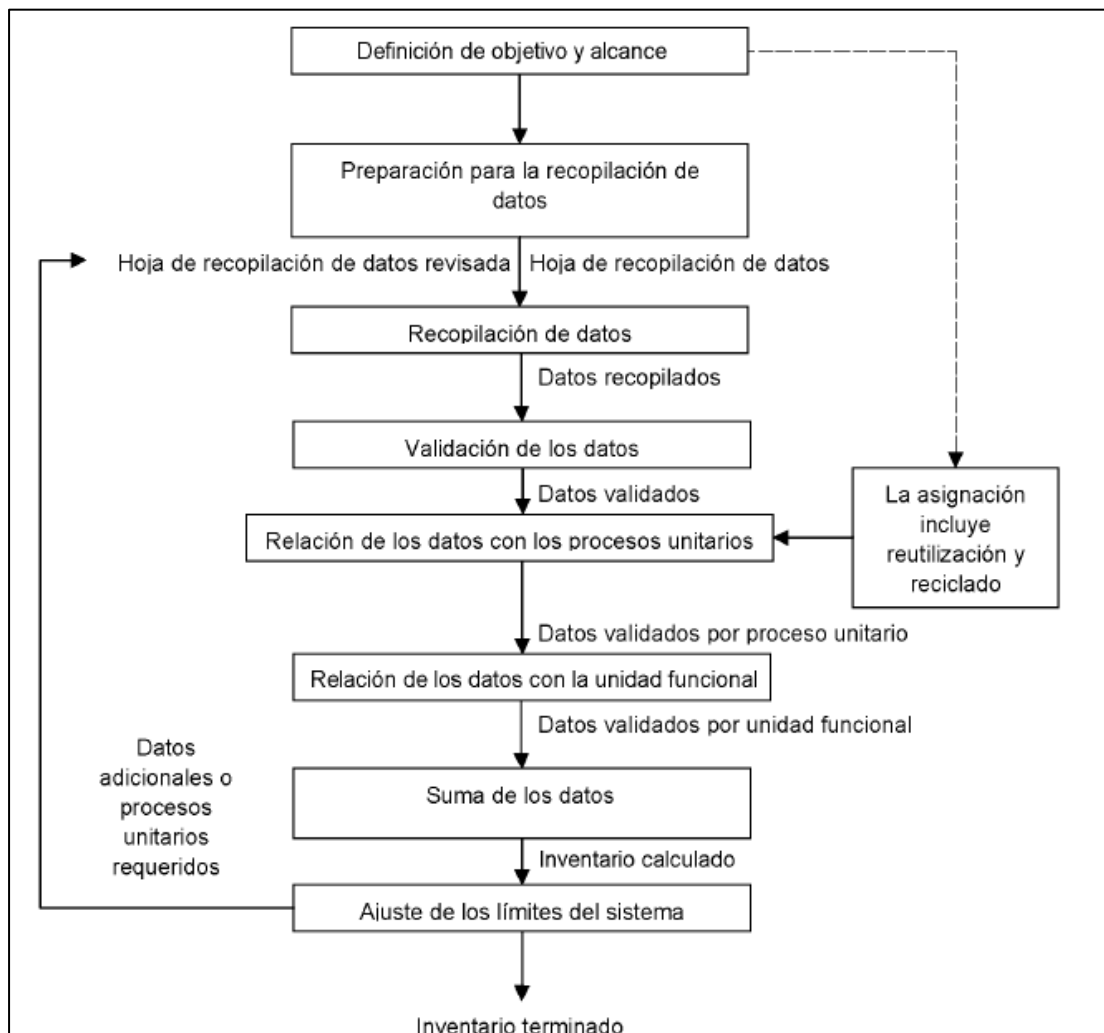


Figura 24: Pasos abreviados para analizar el inventario.
Fuente: ISO 14044

3.2.3.- Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

La Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV) consiste en analizar y evaluar los impactos producidos por las cargas ambientales identificadas en el análisis del inventario.

En la EICV y según la norma ISO 14044, deben escogerse categorías de impacto e indicadores para cada categoría de cara a señalar los aspectos ambientales enlazados al producto o proceso estudiado; las metodologías para caracterizarlos son las que vinculan los valores de los inventarios a los indicadores de categoría por medio de los denominados factores de caracterización, que se mencionan más adelante en el presente trabajo.

Un indicador de categoría consiste en la medida cuantificada de una categoría de impacto de EICV¹³⁵. La categoría de impacto muestra los efectos ambientales provocados por procesos, productos o sistemas.

Con este análisis del impacto es obtenido el impacto potencial del cambio climático por emisiones y captura de gases de efecto invernadero del proceso, producto o sistema de manera que la masa del gas de efecto invernadero, emitido o capturado, es multiplicada por el factor de calentamiento global a cien años¹³⁶ con medida en Kg CO₂equiv.

Esta etapa del ACV, se puede dividir en cuatro fases:

- *Clasificación.* Fase en la que tiene lugar la correlación de las distintas cargas ambientales del inventario con diferentes categorías de impacto atendiendo a la clase de consecuencia ambiental que se prevé: acidificación, eutrofización, agotamiento del ozono, etc.

¹³⁵ Niembro García I.J., “Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: revisión y prospectiva”. 12th International Conference on Project Engineering, pp. 1182, 2008.

¹³⁶ Parra R., “Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales”. Revista Boliviana de Química, v.27 n.2. 2010.

- *Caracterización.* Lo que pretende esta fase es conseguir indicadores de categoría de impacto partiendo de cargas ambientales ya catalogadas. Son usados factores de caracterización, lo que significa que se emplean térmicos equivalentes que posibilitan relacionar las distintas cargas ambientales de categorías de impacto iguales a una medida única, atendiendo a consecuencias que se pueden cuantificar. Después de llevar a cabo la caracterización, es conseguido el perfil ambiental. Se puede afirmar que la caracterización consiste en calcular cómo contribuye potencialmente un elemento singular observado en el análisis de inventario a una consecuencia de tipo ambiental.

A modo ilustrativo, al considerar la acidificación, deberían tenerse en cuenta las cargas ambientales originadas por las emisiones que aportan a dicho efecto (NO₂, SO₂...). De cara a evaluar el efecto total de la acidificación la totalidad de emisiones deben estar en la misma unidad. Para la acidificación, se escoge como medida el SO₂, y todo lo demás es nombrado como equivalentes de SO₂. De esta manera, de cara a llevar a cabo la medida de cuánto contribuye en acidificación, es utilizado un factor de caracterización que se conoce como potencial de acidificación (AP)¹³⁷, consistente en la propiedad que posee la unidad másica contaminante para la emisión de H⁺ que absorben la radiación infrarroja comparándola con la propiedad del SO₂.

Para calcular cómo contribuye parcialmente cada elemento se multiplica el potencial de acidificación por la masa de dicho que elemento que se emite al aire.

$$\text{Contribución global para acidificación} = \Sigma (AP_i \cdot m_i)$$

AP_i: Potencial de acidificación del componente i

m_i: Masa de componente i que se emite al aire

Las unidades se indican en Kg de SO₂ equivalentes.

Hay que comentar que estos factores de caracterización son obtenidos por medio de la utilización de patrones que cuantifican en base a investigaciones científicas para todos los procesos ambientales.

¹³⁷ Lamana N., Hernández A., “Análisis del Ciclo de Vida – Ciudades para un Futuro más Sostenible”. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid-Universidad Politécnica de Madrid, 2005.

Esta fase de caracterización, al igual que la anterior de clasificación, serían etapas obligatorias de acuerdo con la ISO 14040 en la evaluación de impacto del ciclo de vida, mientras que las siguientes que se citan a continuación serían opcionales.

- *Normalización.* Los valores ya sometidos a caracterización son normalizados fraccionándolos por el valor concreto o esperado de cada categoría de impacto en una zona y un instante de tiempo específicos, o en función del área económica donde se ubica la tarea de estudio. De este modo se obtiene un valor relativo del impacto ambiental asociado al producto, actividad o servicio considerado.

La finalidad de esta fase es entender mejor la magnitud relativa para cada resultado del indicador del sistema del producto estudiado, resultado de utilidad para verificar si existen incoherencias e informar sobre la importancia relativa de los resultados del indicador. En la actualidad existe una gama de referencias de normalización que permite al usuario elegir aquellas ajustadas a un propósito específico. Estas nuevas posibilidades dan la oportunidad de escoger; la pregunta es cuándo y cómo aplicar dichas referencias específicas¹³⁸.

- *Agrupación.* Se trata de asignar categorías de impacto en varios grupos de acuerdo a lo especificado en el propósito y ámbito de aplicación. Existen las siguientes sistemáticas:
 - Estructurar categorías de impacto en una base nominativa (véase medidas de espacio a nivel total, comunitario o local).
 - Organizar categorías de impacto de acuerdo a una relación jerárquica (véase relevancia elevada, normal o reducida).

¹³⁸ Stranddorf H., Hoffmann L., Schmidt A., “*Impact categories, normalization and weighting in LCA*”. Environmental News No.78, Danish Ministry of Environment, Environmental Protection Agency. 2005.

- *Ponderación.* Se trata de ponderar las distintas categorías de impacto entre ellas. Es posible ejecutarse cuantitativa o cualitativamente; en el caso de que se ejecute de forma cuantitativa han de hallarse factores de ponderación para las distintas categorías de impacto que hagan factible conseguir un único indicador de calidad medioambiental de carácter global¹³⁹.

Se trata de la fase con mayor grado de subjetividad, puesto que se busca la integración de los parámetros monetarios y comunitarios generados por todos los impactos ambientales en un único valor. Aun así, existen casos en los que debe acometerse igualmente.

Se debe tener en cuenta las desigualdades que existen a la hora de ponderar y normalizar, ya que la normalización proporciona una medida que compara las distintas clases de categorías de impacto ambiental, por el otro lado cuando se pondera se otorgan datos en valor relativo para las distintas categorías de impacto atendiendo a la importancia que se le concede a cada una de dichas categorías en particular.

La importancia de la fase de ponderación radica en que permite expresar la preferencia relativa de una organización o grupo de partes interesadas basada en políticas, metas u objetivos, y opiniones o creencias personales o grupales. También permite garantizar que el proceso sea visible, documentable y reportable, así como verificar que la importancia relativa de los resultados se basa en el estado del conocimiento sobre estos problemas. La ponderación puede considerarse como un paso cualitativo y cuantitativo que no se basa necesariamente en la ciencia, pero sí a menudo en valores políticos o éticos¹⁴⁰.

Los métodos de ponderación han sido desarrollados por diferentes instituciones basadas en diferentes principios¹⁴¹. Algunos de ellos son los siguientes:

¹³⁹ Antón Vallejo M.A., “*Utilización del Análisis del Ciclo de Vida en la Evaluación del Impacto Ambiental del Cultivo bajo Invernadero Mediterráneo*”. Tesis doctoral, Programa de doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.

¹⁴⁰ Lindeijer E., “*Normalisation and Valuation*”, Part VI of the SETAC Working Group Report on LCA Impact Assessment, IVAM Environmental Research, University of Amsterdam, The Netherlands. 1996.

¹⁴¹ Finnveden G., “*Valuation methods within LCA—where are the values?*” The International Journal of Life Cycle Assessment 2 (3), pp. 163 – 169, 1997.

- Métodos proxy: en este enfoque se indican algunas medidas de cantidad que señalan el impacto medioambiental ambiental completo. Este enfoque puede aplicarse al consumo de energía, al consumo de espacio y al desplazamiento de material.

- Monetización: es un método de ponderación que se lleva a cabo a través de preferencias expresadas, donde se pregunta a las personas sobre sus preferencias. Por ejemplo, preguntando a las personas sobre su disposición a pagar por mantener el ambiente seguro y preservado, o si preferirían aceptar el medio ambiente sometido a degradación.

El método de monetización también se puede describir con las premisas del utilitarismo (los valores se miden por la agregación de las preferencias humanas) Además, los valores de calidad ambiental pueden ser sustituidos por otros productos básicos.

- Distancia al objetivo: los factores de ponderación están relacionados con un objetivo. Este objetivo puede ser decidido por las autoridades nacionales o locales, dentro de una empresa, etc.

Por lo tanto, dicho objetivo puede consistir en estándares ambientales, objetivos de calidad ambiental o políticos... Los factores de ponderación se usan en este caso con el fin de valorar volúmenes críticos de emisiones al aire, suelo, agua o ambiente de trabajo.

- Enfoque de panel: en este método, se le pide a un grupo de personas que otorgue rangos a diferentes categorías de impacto y daño. Por lo tanto, la importancia relativa de las categorías de impacto y daño se derivan de un grupo de personas a través de encuestas. Este grupo de personas es preferible para estar compuesto por expertos científicos, gobiernos u organismos internacionales.

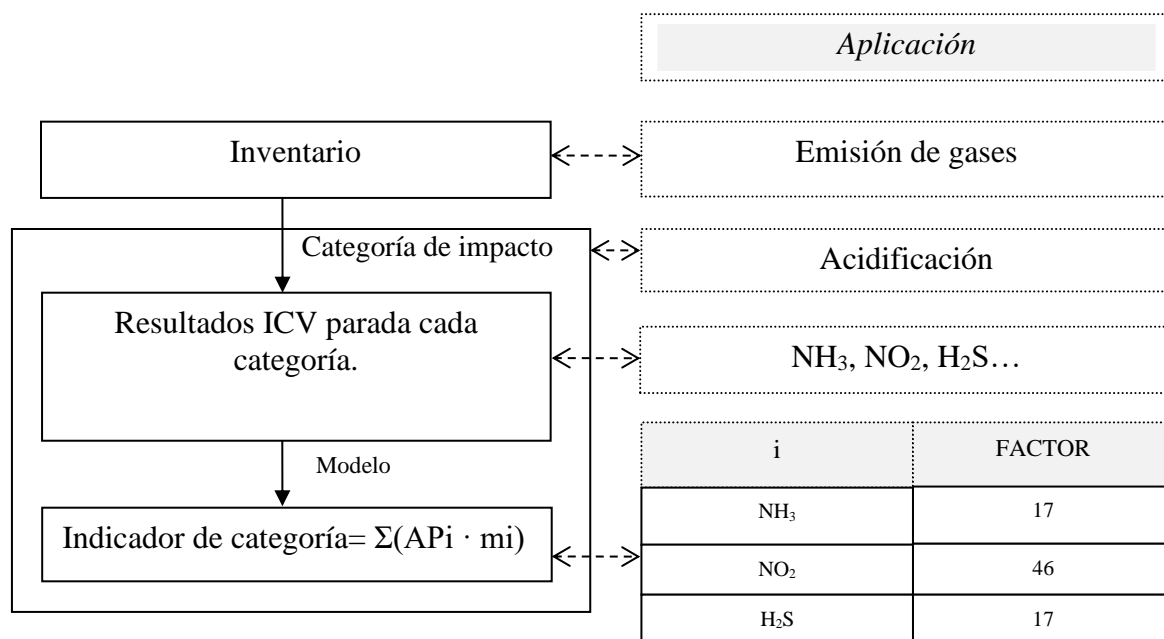


Figura 25: Etapas de clasificación y caracterización de EICV para una categoría de impacto siguiendo un ejemplo esquemático para la acidificación.
 Fuente: Aranda, A., Zabalza, I. (2010) ¹⁴².

Una vez revisadas las fases correspondientes a la etapa de evaluación de impacto del ciclo de vida, se observa que hay muchos métodos de evaluación en un ACV (dichos métodos serán comentados en mayor profundidad en un capítulo más adelante). Todos los métodos poseen indicadores o categorías de impacto que son particulares de dicho método en cuestión.

Asimismo, las instituciones u organismos de mayor relevancia en este campo también aportan sus consideraciones en lo relativo a agrupaciones y clasificaciones de categorías de impacto; así, por ejemplo, se puede citar que la SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) engloba las categorías de impacto en tres grupos principales¹⁴³: Consumo de recursos naturales (R), Impactos al ecosistema (E) y Daños a la salud (S).

A continuación, se describen las categorías de impacto de mayor relevancia y utilizadas en este trabajo:

¹⁴² Aranda, A., Zabalza, I., “*Ecodiseño y análisis de ciclo de vida*”. Universidad de Zaragoza, 2010.

¹⁴³ Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). “*Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice*”, 1993.

- Agotamiento de los recursos abióticos: Son los recursos que se encuentran alrededor de los organismos con vida y que unidos a ellos componen el sistema ambiental. Incorporan la totalidad de recursos “sin vida” susceptibles de explotación por parte del ser humano, incluyendo entre los mismos obviamente los correspondientes a energía.

La categoría de impacto “agotamiento de recursos abióticos” no tiene una definición concisa, debido a que es dependiente en un alto grado del que lo usa, sus competencias y posibilidades para tiempos posteriores. La evaluación tiene lugar atendiendo a la definición de desarrollo sostenible. Existen categorías, como, por ejemplo, acidificación y calentamiento global, que despuntan sobre el agotamiento de recursos abióticos motivado por la subjetividad que sobre ellas influyen¹⁴⁴.

Se suele aceptar una definición basada en la disminución de recursos naturales, modelizado mediante la ecuación:

$$AR = \sum F_i x m_i \text{ [Ecuación 5]}$$

En el que AR se trata del indicador de agotamiento de recursos abióticos, m_i expresa la cantidad de recurso usado en m^3 , kg o MJ, y F_i es el factor de caracterización del recurso correspondiente. Esta ecuación ha sido objeto de constante evolución o modificación.

En la práctica se calculaba el agotamiento correlacionando lo utilizado y la cuantía global de provisiones de la materia en cuestión. En este caso F_i se presentaba como la inversa de la reserva (kg^{-1}), resultado AR adimensional. En otras ocasiones se presentaba F_i siendo el inverso del tiempo calculado para tener disponible el recurso, continuando la misma tasa extractiva (a^{-1}). No se tiene en consideración la dimensión de la reserva. AR vendría expresado en $kg \cdot a^{-1}$.

El software Team desarrollado por la empresa Ecobilan¹⁴⁵ junta los dos factores anteriores en uno solo ($kg^{-1} \cdot a^{-1}$):

¹⁴⁴ Steen B., “Abiotic Resource Depletion Different perceptions of the problem with mineral deposits”. Int. J. LCA, 11 vol. especial1, pp. 49 – 54, 2006.

¹⁴⁵ Ashby M., “Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice”. Elsevier, pp. 72-73, 2013.

$$Fi = \frac{1}{(Ri \cdot Yi)} \text{ [Ecuación 6]}$$

siendo Ri la dimensión de los reservorios del recurso i (kg), Yi los años que habrá disponibilidad del mismo (a^{-1}). Eso quiere decir AR se expresará en a^{-1} .

Más adelante, se dio la recomendación de considerar también la tasa de decrecimiento o incremento del recurso¹⁴⁶ haciendo el cálculo por medio del factor de agotamiento abiótico ADF ($kg \text{ eq. Sb} \cdot kg^{-1}$).

$$AR = \sum ADF_i \times m_i \text{ [Ecuación 7]}$$

indicándose AR mediante kg equivalentes de Sb en calidad de recurso de base, obteniendo la siguiente expresión para el factor de agotamiento abiótico ADF:

$$ADF_i = \frac{DR_i}{(R_i)^2} \cdot \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}} \text{ [Ecuación 8]}$$

donde R_i son las reservas del recurso i en kg, DR_i la tasa extractiva del componente i en kg/año, R_{ref} los reservorios del recurso base (Sb) en kg, DR_{ref} la tasa extractiva del recurso de base en kg/año.

En la siguiente tabla 2, se muestran ejemplos de factores de agotamiento abiótico para la caracterización de algunas sustancias. Este factor de agotamiento abiótico vendría expresado en kg de Sb equivalente por kg de sustancia. Cabe destacar que el factor correspondiente al Sb sería 1, mientras que habría sustancias con factores de elevado valor como la plata, petróleo o gas natural, en contraposición por ejemplo al magnesio, calcio o sodio (con valores bajos).

¹⁴⁶ Guinée J. B., Heijungs, R., "A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment". *Environmental toxicology and chemistry*, 14(5), pp. 917-925, 1995.

Sustancia	ADF, [kg _{Sb} eq/kg _{sustancia}]
Antimonio, Sb	1
Azufre, S, en suelo	0,000358
Calcio	7,08E-10
Carbón, en suelo	0,00363
Cloro	4,86E-8
Cobre Cu, mineral	0,00194
Fósforo	0,0000844
Gas natural	0,32
Hierro Fe, mineral	8,43E-08
Magnesio	3,73E-09
Manganeso Mn, mineral	0,0000138
Petróleo, en suelo	0,436
Plata Ag, mineral	1,84
Plomo Pb, mineral	0,0135
Potasio, K, como K ₂ O, en suelo	3,13E-08
Sodio	8,24E-11

Tabla 3: Ejemplos para factores de agotamiento abiótico ADF para la caracterización de algunas sustancias.

Fuente: Guinée J.B. (2002)¹⁴⁷

En función de la unidad de medida que se tome, se generará un determinado valor de agotamiento de unos recursos abióticos. Es común trabajar con 2 categorías de impacto al efecto, una con referencia al Sb y consiguiendo de esta forma kg_{Sbeq} y otra relacionada con el agotamiento de combustibles fósiles, indicado en MJ. Esta última referencia aporta datos importantes para la cuantificación del consumo energético de la configuración mediante la fórmula que resulta de multiplicar el poder energético de los recursos tomados de la naturaleza por sus reservorios de energía.

- *Uso del Suelo*: Se trata de una de las categorías de impacto más complejas y que más importancia tiene a la hora de establecer la sostenibilidad de una actividad determinada. Por dicho motivo, no parece haber uniformidad a la hora de designar indicadores. Existen estudios que demuestran que pérdida de hábitats naturales es debida a la explotación del medio agrario, así como a la difusión cada vez mayor de las zonas metropolitanas e industriales¹⁴⁸.

¹⁴⁷ Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppés G., de Koning A., Wegener A., Suh S., Udo de Haes H., Bruijn H., Duin R.V., Huijbregts M.A.J., "Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 2002.

¹⁴⁸ United Nations Environmental Program, *Annual Evaluation Report 2003*, 2003.

En este sentido, los indicadores más desarrollados están relacionados con la biodiversidad, cambios en la calidad del suelo, fertilidad del suelo, ciclos hidrológicos...

Las principales evaluaciones de esta categoría¹⁴⁹ están referidas por tanto a la rivalidad por el suelo (medición de área trabajada, m²/año), disminución de biodiversidad (medida en datos estadísticos en función de la disponibilidad de familias de vegetación), disminución de la funcionalidad de soporte vital (medida en valores correspondientes a fabricación de origen primario neta) o desecación.

- *Cambio Climático*: El cambio climático es la modificación integral climatológica del planeta. Su aparición se debe a motivos de origen natural y asimismo a la actividad de origen humano; es generado en distintos hitos temporales y afectando a la totalidad de variables asociadas al clima (lluvias, temperaturas, nubes...). La expresión "efecto invernadero" (Global Warming, en inglés) se aplica a la contención del poder calorífico solar en las capas atmosféricas del planeta por causa de una serie de acumulación gaseosa en la atmósfera (esta radiación que se retiene es una radiación infrarroja térmica). Sin la existencia de dichos gases la existencia actual no se concebiría, puesto que la Tierra tendría temperaturas excesivamente bajas. Dichos gases serían por ejemplo el vapor de agua, CO₂, N₂O, CH₄ (metano) y CFCs (clorofluorocarbonos), emitidos por la actividad industrial, agrícola y la quema de combustibles fósiles. Dicha actividad industrial ha incrementado la presencia de los gases en más de un treinta por ciento con respecto a épocas preindustriales, cuando el medio natural tenía la función de mantener el equilibrio de las emisiones¹⁵⁰.

CO₂ es utilizado como medida típica asociada al Global Warming, por lo que el impacto de los distintos componentes que influyen en el calentamiento global se valora atendiendo a la aptitud para la absorción e irradiación el flujo calorífico de la Tierra comparada con la aptitud para la radiación del dióxido de carbono (las unidades del indicador serían por tanto kg de CO₂ equivalentes, kg_{CO₂eq}).

¹⁴⁹ Garraín Cordero D., “Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida”. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción. Universidad Jaume I, 2009.

¹⁵⁰ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2013: The Physical Science Basis”. Working group I Contribution to the fifth assessment report, 2013.

El cambio climático tiene la facultad de ocasionar consecuencias perjudiciales en el medioambiente, bienestar humano y recursos físicos. El indicador tradicionalmente utilizado es el CCI (Climate Change Indicator), que indicará la medida relativa respecto a las consecuencias originadas por un kg de CO₂ de acuerdo a:

$$CCI = \sum GWP_i \cdot m_i \text{ [Ecuación 9]}$$

donde m_i representa la masa de la sustancia indicada en kg y GWP_i representa el potencial de calentamiento global, un factor creado de cara a realizar la comparación entre emisiones de distintos gases con potencial de provocar efecto invernadero. Es la correlación que mide cómo se contribuye a absorber el calor que resulta de emitir 1 kg de gas susceptible de provocar efecto invernadero frente a la emisión con la misma equivalencia de CO₂ en un periodo T (usualmente 20, 100 o 500 años). Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$GWP_{Ti} = \frac{\int_0^T a_i \cdot c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} \cdot c_{CO_2}(t) dt} \text{ [Ecuación 10]}$$

donde a_i representa el calentamiento generado por el incremento de la cantidad de un gas i en $W \cdot m^{-2} \cdot kg^{-1}$, y $c_i(t)$ representa la medida del gas i en el tiempo t , en $kg \cdot m^{-3}$. Los datos que corresponden al CO₂ van en el denominador del cociente.

Los datos de GWP se publican cada cierto tiempo en el organismo IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - Intergovernmental Panel on Climate Change). GWP será función del tiempo de integración. La selección del intervalo dependerá por la clase de consecuencias que quieran analizarse. El largo plazo emplea 100 y 500 años. El corto plazo emplea de 20 a 50 años.

Sustancia		GWP20	GWP100	GWP500
Dióxido de carbono,	CO ₂	1	1	1
Metano,	CH ₄	72	25	7.6
Óxido de nitrógeno,	N ₂ O	289	298	153
CFC-11,	CCl ₃ F	6.730	4.750	1.620
Halón 1301,	CBrF ₃	8.480	7.140	2.760
Tetrafluoruro de carbono,	CF ₄	5.210	7.390	11.200

Tabla 4: Factores para la caracterización de GWP expresados en kg CO₂-kg-1.

Fuente: IPCC (2007) ¹⁵¹

¹⁵¹ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “*Climate Change 2007: The Physical Science Basis*”. Working group I, 2.10.2 Direct Global Warming Potentials, 2007.

- Agotamiento de la capa de Ozono: La capa de ozono constituye la zona atmosférica que dispone de más cantidad de esta sustancia, la cual a través de reacciones fotoquímicas retiene una porción elevada de la radiación UV recibida por la Tierra¹⁵².

El ozono permanece desde tiempos muy antiguos en una situación estable pero con un estado activo, puesto que existe una producción y destrucción constante para mantener su tasa uniforme en la zona atmosférica (las denominadas reacciones Chapman de formación-destrucción del ozono estratosférico). Esta situación de estabilidad se ha modificado con la entrada en las capas atmosféricas de gases sintéticos denominados los clorofluorocarbonos (CFCs), debido a la eliminación del ozono por parte del cloro contenido en estos gases. Los CFCs son disociados en contacto con la radiación UV dejando libre a un átomo de cloro, el cual se integra en sustancias inertes conocidas como almacenamientos de cloro. Dichas sustancias se mueven por la totalidad de las capas atmosféricas. Las circunstancias específicas de la atmósfera en los polos, en especial en el hemisferio meridional, permiten que se formen nubosidades en la estratosfera donde los almacenamientos de cloro experimentan reacciones químicas que hacen que el cloro se libere, y proceda a destruir al ozono.

Esta disminución en la capa de ozono debido al mecanismo comentado en el párrafo anterior produce un aumento de la radiación UV-b, lo cual desemboca en un incremento de los impactos relacionados con la salud humana (provoca que la gente enferme), entorno natural (descenso en fabricación agraria) así como los recursos naturales (degeneración de materias).

Para esta categoría se utiliza el ODI¹⁵³ (Ozone Depletion Indicator) o indicador del agotamiento de la capa de ozono, calculado multiplicando la adición de los potenciales de agotamiento de ozono (ODP) de distintos compuestos y la masa en kilogramos para ellos, indicado en 1 kg de efecto de CFC-11. La ecuación que corresponde al presente indicador es calculada de la siguiente forma:

$$ODI = \sum_i ODP_i \times m_i \text{ [Ecuación 11]}$$

¹⁵² Kriner A., Castorina J.A., Cerne B., “El adelgazamiento de la capa de ozono: algunos obstáculos para su aprendizaje”. Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias, Vol. 2, N° 2, pp. 136-154, 2003.

¹⁵³ Aguayo F., Peralta M.E., Lama J.R., Soltero V.M., “Ecodiseño. Ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C)”. RC Libros, 2011.

donde ODP_i es el Factor de potencial agotamiento de ozono para la sustancia i expresado en $\text{kg}_{\text{CFC-11 eq}}/\text{kg}_{\text{sustancia}}$ y m_i masa de gas de efecto invernadero i en kg.

El concepto de ODP fue introducido por Wuebbles¹⁵⁴ en el año 1988. Consiste en el cociente de la descomposición del ozono en situación de equilibrio por causa de las emisiones emitidas cada año (caudal de una cantidad del elemento i , emitido a la atmósfera) y la descomposición del ozono en situación de equilibrio por causa de una cantidad idéntica de CFC-11:

$$ODP_i = \frac{d[O_3]_i}{d[O_3]_{\text{CFC-11}}} \quad [\text{Ecuación 12}]$$

La Organización Meteorológica Mundial OMM (en inglés WMO - World Meteorological Organization) publica periódicamente¹⁵⁵ estimaciones para los distintos ODPs de diferentes sustancias, con tiempo de integración sin límite debido a que son potenciales con estabilidad temporal. No obstante, la intensidad del impacto vendrá determinada por la situación de contaminación de la atmósfera en el instante y sitio donde se producen las emisiones. De cara a considerar la influencia regional para las emisiones, se constituyen tres niveles (bajo, medio, alto) que corresponden a regiones de bajo, medio y alto nivel de contaminantes en la atmósfera.

Sustancia		ODP
CFC-11	CFCl_3	1
Bromuro de metilo	CH_3Br	0,7
Halón 1201.	CHBrF_2	1,4
Halón 1301.	CBrF_3	17,2
Tetracloruro de carbono	CF_4	1,2

Tabla 5: Potenciales de agotamiento de ozono en $[\text{kg}_{\text{CFC-11 eq}}/\text{kg}_{\text{sustancia}}]$.
Fuente: Reglamento CE n° 1005/2009¹⁵⁶

Se debe mencionar que, aunque el ODP es parecido al GWP, hay gran desigualdad entre ellos, ya que los ODPs se calculan para situaciones de estabilidad y los GWPs en distintos marcos de tiempo, como vimos anteriormente.

¹⁵⁴ Wuebbles D.J., “*Relative effects on stratospheric ozone of halogenated methanes and ethanes of social and industrial interest*”. UNEP, Nairobi (Conference 19-10-1988), 1988.

¹⁵⁵ World Meteorological Organization, WMO, “*Scientific assessment of ozone depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project*”, Report no. 56. Geneva. 2014.

¹⁵⁶ Parlamento europeo y consejo de la Unión Europea, *Reglamento (CE) no 1005/2009 del parlamento europeo y del consejo de 16 de septiembre de 2009 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono*. 2009.

- Formación oxidantes fotoquímicos: Consiste en la constitución de elementos que son susceptibles de reaccionar (fundamentalmente ozono, O₃) debido a las alteraciones producidas por la radiación del Sol en algunas sustancias presentes en la atmósfera (principalmente compuestos orgánicos volátiles-VOCs y los distintos óxidos de nitrógenos-NO_x, contaminantes de la actividad humana). Dichos componentes resultan dañinos para seres humanos y el medioambiente, así como zonas agrarias. El ozono es perjudicial para los seres vivos, se fija una tolerancia para exponerse a él de 0,1 ppm¹⁵⁷.

La radiación del Sol forma radicales libres que pueden iniciar las para la constitución de una niebla que puede verse y que recibe el nombre de smog fotoquímico¹⁵⁸.

La formación de ozono fotoquímico cuando se emiten componentes a las capas atmosféricas es calculada con el teorema de trayectorias UN-ECE¹⁵⁹. Su representación se lleva a cabo mediante el factor Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (Photochemical Ozone Creation Potential, POCP, expresado en inglés), cuyas unidades son kg equivalentes de etileno / kg de emisiones. El intervalo temporal se ajusta a 120 horas y el marco terrestre oscila a nivel de localidad y de continente.

Para calcular el indicador de formación de oxidantes fotoquímicos (POI) es usado el POCP asociado a la sustancia, que se define en base a la relación entre la modificación de la cantidad de ozono causada por las emisiones de ese componente y la modificación de la cantidad de ozono causada por las emisiones de etileno.

El indicador se obtiene mediante la ecuación:

$$POI = \sum_i POCP_i \times m_i \text{ [Ecuación 13]}$$

donde $POCP_i$ es el Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico de la sustancia i en kg C₂H₄/kg sustancia, m_i es la masa de la sustancia i emitida en kg.

POCP se expresa mediante la siguiente fórmula:

¹⁵⁷ Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo INSHT, *Fichas internacionales de Seguridad Química. Ozono (ICSC:0068)*, abril 2009.

¹⁵⁸ Schwela D.H., Goldammer J.A., Morawska L.H., Simpson O., “*Health guidelines for vegetation fire events*”. Geneva: WHO, 1999.

¹⁵⁹ United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds*. Geneva, 1991.

$$POCP_i = \frac{a_i/b_i}{a_{C_2H_4}/b_{C_2H_4}} \text{ [Ecuación 14]}$$

siendo a_i la modificación en la cantidad de ozono por causa de las emisiones de i ; b_i es lo emitido de sustancia i para el periodo estimado. El denominador del cociente posee la misma fórmula en relación con el compuesto base, etileno, C_2H_4 .

La generación de oxidación fotoquímica es expresada en kg de etileno, C_2H_4 , equivalentes. Debe tenerse en cuenta que los POCP son variables dependiendo de la cantidad de partida de NO_x admitida, ya que ésta afecta a la generación de foto-oxidantes. Distintas variables: la tipología de organizaciones presente, así como las infraestructuras de comunicación... tendrán influencia en la presencia de NO_x .

Sustancia		POCP
Acetaldehído	C_2H_4O	0,527
Acetileno	C_2H_2	0,168
Acetona	C_3H_6O	0,178
Benceno	C_6H_6	0,189
Butano	C_4H_{10}	0,41
Buteno	C_4H_8	0,959
Etano	C_2H_6	0,082
Etanol	C_2H_6O	0,268
Etileno	C_2H_4	1
Metano	CH_4	0,007
Metanol	CH_3OH	0,123
Propano	C_3H_8	0,42
Propileno	C_3H_6	1,03
Tolueno	C_7H_8	0,563

Tabla 6: Medidas de factores de Potencial Creación de Ozono Fotoquímico empleados en caracterizar varios componentes, [kg C_2H_4 /kg sustancia].
Fuente: Linfords L.G. (1995)¹⁶⁰

- Acidificación: La contaminación de la atmósfera producida por las emisiones de las plantas de producción de energía, vehículos, apartados de calefacción, etc... se juntan con la humedad presente en el ambiente para formar H_2SO_4 y HNO_3 , que alteran los compuestos de las gotas de agua en las capas atmosféricas, originando la lluvia ácida¹⁶¹ al precipitar.

¹⁶⁰ Linfords, L.G., Christiansen K., Hoffman L., Virtanen Y., Juntilla V., Leskinen A., Hanssen O.J., Ronning A., Ekvall T., Finnveden G., Weidema, B.P., Ersboll A.K., "LCA-Nordic Technical Reports No 10 and Special Reports, No 1-2". Temanord, 1995.

¹⁶¹ Garcés L.F., Hernández M.L., "La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local". Revista Lasallista de Investigación, vol. 1, núm. 2, pp. 67-72, 2004.

La acidificación consistirá por tanto en que estos ácidos que resultan de la emisión de óxidos de nitrógeno y sulfuro se depositan en las capas atmosféricas, suelos y aguas (tanto subterránea como superficial), lugares en los que es factible que cambie el pH del entorno, afectando a animales y vegetales, produciendo pérdida forestal y pudiendo influenciar a los componentes que se emplean para la construcción. Los niveles protectivos serán salud humana, materias primas, ecosistema y actividad humana. Las sustancias que producen la acidificación son generalmente NO_x , SO_2 y NH_3 .

El factor caracterización para la presente categoría de impacto es denominado Acidificación Potencial (AP); dicho factor está definido con respecto a las emisiones atmosféricas y se calcula con una variación de la modelización RAINS10¹⁶², donde se explica el empleo y la manera en que se depositan los compuestos que provocan la acidificación. Su expresión se muestra a continuación:

$$AP_i = \frac{\mu_{H^+} \cdot M_{H^+}}{M_i} \text{ [Ecuación 15]}$$

donde μ_{H^+} ($\text{mol} \cdot \text{kg}^{-1}$) expresa la cantidad de iones H^+ que son factibles de producirse de forma potencial por un kg de sustancia i , M_{H^+} ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$) la masa equivalente de un mol H^+ y M_i la masa equivalente de la sustancia i . AP se expresa entonces en kg SO_2 equivalentes / kg de sustancia.

Para calcular el indicador de la presente categoría se emplea por tanto la ecuación descrita a continuación:

$$AI = \sum_i AP_i \times m_i \text{ [Ecuación 16]}$$

donde AI es el indicador de acidificación en kg de SO_2 equivalentes, m_i es la masa en kg de la sustancia i y AP_i expresa el potencial de acidificación.

Es observado que la presente categoría de impacto depende en gran medida de la zona territorial, puesto que una alta tasa de mineralización y desmitificación reducirán la aportación de sustancias acidificantes. La presencia de compuestos con aniones acompañando a los H^+ reducirá su aportación (NO_x , NH_3).

¹⁶² Alcamo J., Shaw R.W., Hordijk L., "The RAINS Model of Acidification: Science and Strategies in Europe". IIASA Executive Report. IIASA, Laxenburg, Austria: ER-91-018, 1991.

Sustancia		AP
Ácido Clorhídrico	HCl	0,0274
Ácido fluorhídrico	HF	0,05
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0,059
Ácido sulfúrico	H ₂ SO ₄	0,020
Amoníaco	NH ₃	0,059
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	0,022

Tabla 7: Medidas de factores de Acidificación Potencial global empleados en caracterizar varios componentes, [kg SO₂ eq/kg sustancia].

Fuente: Gorrée M. (2002)¹⁶³

- *Eutrofización*: Consiste en la ganancia desmesurada de aportes nutritivos en el ecosistema. Este fenómeno engloba impactos causados por excesivas tasas de macronutrientes en el entorno (provocados por lo emitido a la atmósfera y los vertidos a las aguas y a las tierras), sobre todo de las distintas partes de nitrógeno y fósforo. Debido a ello, es producido un desarrollo de biomasa en el ecosistema marino, lo cual genera una disminución de la cantidad de oxígeno por causa del gasto por disgregación de dicha biomasa (algas), lo cual se favorece en periodos con más tasa de radiaciones del Sol, pudiendo modificar las condiciones de agua de manera que no sea apta para consumo humano. El citado desarrollo es medido en base a la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y una cifra alta señala la existencia de un estado anaerobio producido por bacterias que emiten CH₄, H₂SO₄ y NH₃ cuando causan descomposición

Los niveles protectivos abarcados por la presente sistemática serían el medioambiente, la ocupación de los seres humanos y las materias primas.

De cara a calcular globalmente el indicador que corresponde a la presente categoría son usados los potenciales de eutrofización o EP y empleada la siguiente ecuación:

$$EI = \sum_i EP_i \times m_i \text{ [Ecuación 17]}$$

donde *EI* es el indicador de eutrofización en kg de PO₄³⁻ equivalentes, *m_i* se refiere a la masa en kg del componente *i* y *EP_i* indica el potencial de eutrofización.

¹⁶³ Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. de, Duin, R. van, Huijbregts, M.A.J. "Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Ila: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background". Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002.

El cálculo de EP se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$EP_i = \frac{v_i/M_i}{v_{ref}/M_{ref}} \text{ [Ecuación 18]}$$

donde v_i ($\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) representa la posible aportación a eutrofización de un mol de componente i , v_{ref} ($\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) la posible aportación a eutrofización de un mol del componente de referencia (PO_4^{3-}), M_i la masa molar de la sustancia i ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) y M_{ref} la masa molar de referencia ($\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$). EP se expresa entonces en kg PO_4^{3-} equivalentes / kg de sustancia.

Los potenciales de eutrofización EPs se basan en la composición química media de organismos acuáticos¹⁶⁴, $\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$; esta composición se asume que se trata de la biomasa global que los representa. En este punto, sólo se clasifican como emisión eutrofizante las correspondientes a N y P, considerando sin límites las aportaciones de los demás nutrientes.

La existencia en medio acuático de C no orgánico, N y P posibilita que crezcan las microalgas ($\text{C}_{106}\text{H}_{263}\text{O}_{110}\text{N}_{16}\text{P}$). Este fenómeno se representa mediante la ecuación de Stumm:



En el momento que se emite material orgánico que es susceptible de degradarse, el O_2 que se necesita de cara a degradarse es susceptible de medirse en base a la DQO (demanda química de oxígeno). Es establecido que para que 1 mol de biomasa se degrade se necesitan 138 moles de O_2 . Es decir, si la aportación a eutrofización, v_P , de un mol de fósforo es 1, entonces la aportación de un mol de nitrógeno, v_N , es de 1/16 y la DQO, v_{O_2} es 1/138. La acidificación es expresada como kg de PO_4^{3-} equivalentes.

En la presente categoría de impacto, el intervalo temporal no es finito y la zona de localización se sitúa bien a nivel de localidad bien a nivel de continente.

¹⁶⁴ Stumm W., Morgan, J. J., "Aquatic chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters". Wiley. 1995.

Sustancia		EP
Amoniaco	NH ₃	0,35
Amonio	NH ₄ ⁺	0,42
Dióxido de carbono	NO ₂	0,13
Fósforo	P	3,06
Nitratos	NO ₃ ⁻	0,095
Nitritos	NO ₂ ⁻	0,13
Nitrógeno	N ₂	0,42
Óxido de nitrógeno	N ₂ O	0,27
Pentóxido de fósforo	P ₂ O ₅	1,336

Tabla 8: Ejemplos para factores de Eutrofización Potencial con el fin de caracterizar varios componentes [kg PO₄³⁻eq/kg sustancia].
Fuente: Heijungs (1992)¹⁶⁵

- *Ecotoxicidad*: Esta categoría de impacto surge debido a la existencia de sustancias tóxicas que pueden incidir bien en la salud humana bien en el medio. Por ejemplo, las partículas emitidas son susceptibles de causar la presente tipología de daños.

Aplicando dicha categoría son evaluadas las consecuencias de las sustancias tóxicas que se encuentren en el medio ambiente, en los ecosistemas terrestre, acuático, y salud humana. Tiene influencia en los niveles de protección que corresponden a la salud humana, el medio ambiente y materias primas. Se debe tener en cuenta la influencia del traslado de distintas formas puesto que un contaminante no queda fijado al ambiente (estratos, mar, agua de superficie, agua en el subterráneo...), sino que suele moverse a distintos sitios en los que expande su contaminación, llegando incluso a provocar más daños en el lugar de destino.

Para calcular el presente indicador en los distintos ecosistemas han de utilizarse las ecuaciones descritas a continuación:

$$HTI = \sum_n \sum_i HTP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i \quad \text{Ecotoxicidad Humana [Ecuación 19]}$$

$$ATI = \sum_n \sum_i ATP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i \quad \text{Ecotoxicidad Acuática [Ecuación 20]}$$

$$TTI = \sum_n \sum_i TTP_{i,n} \times f_{i,n} \times m_i \quad \text{Ecotoxicidad Terrestre [Ecuación 21]}$$

donde *HTP* (*Human Toxicity Potentials*): Factor de caracterización de la salud humana que depende de la metodología empleada.

¹⁶⁵ Heijungs R., Guinée J. B., Huppes G., Lankreijer R. M., Udo de Haes H. A., Wegener Sleeswijk, A., De Goede, H. P., “*Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds*”, 1992.

ATP: Factor de caracterización para la toxicidad en el medio acuático.

TTP: Factor de caracterización para la toxicidad en el medio terrestre.

$f_{i,n}$: Fracción de componente i , trasladado desde el foco a otro área.

n : Número adimensional.

m_i : Cantidad que se emite del contaminante i .

Las unidades en las que se expresan los factores de caracterización son función, como comentamos, de la metodología empleada para caracterizarlos. En relación a dichos métodos, no existe un consenso único sobre el método a emplear.

La metodología más usada es la denominada Critical Surface Time (CST), propuesta por Audsley¹⁶⁶ para los entornos agrarios. Aquí el factor de caracterización de toxicidad humana se expresa como kg equivalentes de Pb en aire por kilogramo de sustancia, para toxicidad en medios acuáticos, kg equivalentes de Zn en agua por kilogramos de sustancia y para ecotoxicidad terrestre kg equivalentes de Zn en suelo por kilogramo de sustancia.

Otro método utilizado es el USES-LCA¹⁶⁷, donde se recogen la finalidad, la exposición y las consecuencias de los componentes tóxicos para un marco temporal no finito. Dicho método cuenta con varias actualizaciones (1.0, 2.0). En este caso, para cada sustancia tóxica los factores de caracterización de toxicidad se miden en kg equivalentes de 1,4-diclorobenceno/kg de componente.

Sustancia		HTP (kg _{eq} Pb _{aire} kg ⁻¹)	ATP (kg _{eq} Zn _{agua} kg ⁻¹)	TTP (kg _{eq} Zn _{suelo} kg ⁻¹)
Aire				
Aldehído	Sin especificar	0,0087		
Arsénico	As	9.000	0,0078	0,75
Benceno	C ₆ H ₆	0,012	0,012	0,012
Cadmio	Cd	19.000	79	3,14
Cobalto	Co	12.900		0,08
Cobre	Cu	145	0,66	0,14
Cromo	Cr III, Cr VI	3.700	0,39	0,08
Estaño	Sn	9		
Formaldehído	CH ₂ O	0,0099	0,0099	0,0099
Mercurio	Hg	46.000	196	5,94

¹⁶⁶ Audsley J., "Harmonization of Environmental Life Cycle Assessment". European Commission DG VI Agriculture. Final Report Concerted Action AIR3-CT94-2028, 1997.

¹⁶⁷ Van Zelm R., Huijbregts M. A., van de Meent D., "USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model". The international journal of life cycle assessment, 14(3), pp. 282-284, 2009.

Monóxido de carbono	CO	0,00014		
Níquel	Ni	370	0,12	0,35
Óxidos de azufre	SO _x como SO ₂	0,0075		
Óxidos de nitrógeno	NO _x como NO ₂	0,002		
Partículas	Sin especificar	0,0075		
Plomo	Pb	2.300	1,28	0,13
Selenio	Se	64.000		
Zinc	Zn	27	0,076	0,33
Suelo				
Arsénico	As	0,7	0,24	2,3
Cadmio	Cd	1,46	240	9,6
Cobalto	Co	1		0,26
Cobre	Cu	0,009	2	0,42
Cromo	Cr III, Cr VI	0,29	1,2	0,26
Mercurio	Hg	3,6	600	18,300
Níquel	Ni	0,029	0,36	1,100
Plomo	Pb	0,6	3,9	0,410
Zinc	Zn	0,0007	0,23	1,000
Agua				
Aceites	Sin especificar		0,13	
Arsénico	As ³⁺ , As ⁵⁺	1,5		
Cadmio	Cd ⁺⁺	3,2	520	
Cobalto	Co I, Co II, Co III	2,2		
Cobre	Cu ⁺ , Cu ⁺⁺	0,022	5,2	
Cromo	Cr III, Cr VI	0,62	2,6	
DOB5	Demanda Oxígeno Bioquímico	0,022	0,00013	
Estaño	Sn ⁺⁺ , Sn ⁴⁺	0,0015		
Fenoles	C ₆ H ₅ OH	0,052	15,4	
Fluoruros	F-	0,045		
Fosfatos	PO ₄ ³⁻ , HPO ₄ ⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻ , H ₃ PO ₄ como P	0,0000032	0,01	
Mercurio	Hg ⁺ , Hg ⁺⁺	7,8	1.300	
Níquel	Ni ⁺⁺ , Ni ³⁺	0,062	0,79	
Plomo	Pb ⁺⁺ , Pb ⁴⁺	0,86	5,2	
Selenio	Se II, Se IV, Se VI	10,9		
Zinc	Zn ⁺⁺	0,0032	1	

Tabla 9: Valores de factores de caracterización de ecotoxicidad con el fin de caracterizar varios componentes, [$\text{kg}_{\text{eq}} \text{Pb}_{\text{aire}}, \text{Zn}_{\text{agua}}, \text{Zn}_{\text{suelo}}/\text{kg sustancia}$].

Fuente: Jolliet (1996)¹⁶⁸

¹⁶⁸ Jolliet O., Crettaz P., "Critical Surface-Time 95, a Life Cycle Impacts Assessment methodology including exposure and fate". Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Institute of Soil and Water management, 1996.

- *Producción de Residuos líquidos y sólidos*: El objetivo de la presente categoría consiste en valorizar la proporción de residuos producida las tareas incluidas en el ciclo de vida a analizar, diferenciando entre desechos sólidos y líquidos.

- *Energía Consumida*: Se trata de energía consumida por un determinado material o proceso y referido al ciclo de vida. Se incluyen recursos naturales, producción, traslado, utilización, procesamiento último de desechos. El gasto energético global se considera una parte muy importante en el impacto del ciclo de vida, y así debe ser tratado.

- *Emisiones de Metales Pesados*: La existencia de metales pesados en grandes cantidades genera consecuencias perjudiciales en los organismos. Esta categoría de impacto está relacionada con la ecotoxicidad, si bien el método para calcularla es simple y los componentes fundamentales considerados son cromo, vanadio, cadmio, molibdeno, manganeso, potasio y sodio.

- *Desecación*: No se establecen propuestas para medir esta categoría de impacto en la mayoría de los métodos de evaluación. Se le asigna como unidad funcional los metros cúbicos (m³) y una escala geográfica local.

- *Radiaciones*: Se consideran los efectos de las radiaciones ionizantes en la salud de los seres humanos y en el medio ambiente. Existen modelos para caracterizar desarrollados por Dreicer¹⁶⁹ para los daños en los seres humanos, con indicadores referidos a eficiencia humana para exposición relativa al uranio 235 (U²³⁵), o Garnier-Laplace¹⁷⁰ para la evaluación del riesgo de nivel de cribado ecológico, con indicadores referidos a unidades tóxicas comparativas para ecosistemas (CTU_e).

- *Olor*: No se conocen hasta la fecha publicaciones de análisis que relacionen una categoría referida al olor en los ACV. Se ha considerado asignar el impacto del olor a las categorías asociadas al bienestar de los seres humanos o modificaciones del ecosistema, de tal manera que las repercusiones sobre el bienestar se detallen y todas las contribuciones se adicionen en él con unidades DALY.

¹⁶⁹ Dreicer M., Tort V., Manen P., “*Externalities of Energy, Vol. 5. Nuclear*”, Centre d’étude sur l’Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN), edited by the European Commission DGXII, Science, Research and Development JOULE, Luxembourg, 1995.

¹⁷⁰ Garnier-Laplace J., Alonzo F., Adam-Guillermin C., “*Establishing relationships between environmental exposures to radionuclides and the consequences for wildlife: inferences and weight of evidence*”. SAGE, ICRP, 2013.

En base a ello, es factible implementar potenciales de olor o factores para caracterizar del mismo modo que para otras categorías como ecotoxicidad o acidificación. De esta manera podrían compararse los valores obtenidos con los correspondientes al componente base. Dichos factores se calcularían partiendo de la reacción de los humanos a un determinado compuesto oloroso. La reacción en cuestión será función de propiedades relativas a la cualidad sensitiva específica del olor medido: concentración, intensidad, carácter, tono hedónico. El efecto combinado de estas propiedades puede relacionarse con el nivel de incomodidad provocado por los olores.

- *Ruido*: Se trata de uno de los principales inconvenientes en relación con los estándares de bienestar de los seres humanos; su incidencia es mayor en los grandes núcleos de población e industriales debido a la presencia de gran cantidad de medios de transporte, maquinaria e infraestructura industrial. El ruido que se produce en las ciudades es producido en gran medida por los medios de automoción. Los análisis efectuados hasta la fecha se han centrado en cuantificar, predecir o estimar la tasa de individuos expuestos a distintos umbrales de ruido; ha habido pocas investigaciones relativas a mostrar la relación de un determinado ruido con su impacto concreto en los seres humanos.

Para medir el efecto del ruido producido por el desplazamiento de medios de automoción el estudio más relevante es el correspondiente a Müller-Wenk¹⁷¹, el cual ha planteado un método de cara a realizar la cuantificación de las consecuencias del ruido sobre el bienestar humano en magnitudes de medición DALY (años de vida que se pierden por fallecimiento temprano más los años que se viven con minusvalía de grado y durabilidad concretas) e incorporarlo en los ACV. Dicho método puede hallar con facilidad el aumento de afectaciones producidas al aumentar la tasa de inicio de la circulación y la obtención de DALY, por medio de valores determinados. Se trata de un método provechoso de cara a la obtención de impactos en la categoría de ruido de manera general, con independencia de la trayectoria tomada; es aplicable a áreas espaciales, tipo países. Sin embargo, la metodología puede ser mejorada en lo que respecta a la utilización de modelos obsoletos para emisión ruidosa, así como la utilidad de tener en cuenta otras consecuencias para el bienestar de los seres humanos.

¹⁷¹ Müller-Wenk R., "A method to include LCA road traffic noise and its health effects", International Journal of Life Cycle Assessment 9 (2), pp. 76-85, 2004.

3.2.4.- Interpretación de Resultados

En esta etapa son explicados los valores obtenidos y se establecen conclusiones alineadas con el propósito del análisis. Combina lo obtenido en el análisis de inventario (ICV) junto a la evaluación de impacto (EICV). Esta etapa posibilita averiguar cuál es la etapa del ACV del proceso, producto o sistema de estudio donde son producidas las cargas ambientales fundamentales, de manera que sea posible discernir cuáles son los puntos que pueden o deben mejorarse. En el caso de que se estén comparando productos diferentes, es posible averiguar el que ofrece una óptima conducta medioambiental.

La etapa para interpretar un ACV abarca las partes descritas a continuación, conforme a la norma ISO 14040:2006:

- Identificación de aspectos significativos. Se trata de ubicar los componentes que tengan efectos más relevantes, de cara a una potencial mejoría de los mismos. Pueden emplearse métodos como el análisis de contribución, el análisis de la influencia y la evaluación de las anomalías.
- Evaluación: comprobación de los estudios para la robustez, perceptibilidad y conexión. Consiste en verificar que todos los datos importantes tienen disponibilidad, garantizando la coherencia de los datos y determinando el peso de las alteraciones de las premisas, metodologías y valores en los datos finales.
- Conclusiones, limitaciones y recomendaciones. Consiste en establecer algún tipo de conclusión, conocer las restricciones y llevar a cabo advertencias de cara a los destinatarios planificados por el ACV

Hay que mencionar también la idea de revisión crítica, añadido por la norma ISO 14040:2006, especialmente para el caso de ACV donde tengan lugar afirmaciones de comparación. La finalidad de la revisión crítica es verificar que las metodologías empleadas para el ACV son coherentes con ISO 14040, tecnológicamente aptos, con valores adecuados y lógicos en relación al propósito del análisis, una interpretación que refleje las limitaciones identificadas y un informe que resulte transparente y coherente.

Pueden distinguirse varias clases de revisión crítica:

- Revisión por expertos de carácter interno. Dichos expertos deben estar familiarizados con ISO 14040 y contar con destreza tecnológica; debe preparar o revisar el informe de revisión del ACV, incluyendo dicho informe en el estudio del ACV.
- Revisión por experto externo. Este experto debe ser autónomo con respecto al ACV, conocer ISO 14040 y contar con destreza tecnológica; debe preparar o revisar el informe de revisión del ACV, incluyendo dicho informe en el estudio del ACV.
- Revisión por grupos de interés. Para esta clase, la persona que contrata el análisis elige un consultor técnico especializado de cara a liderar el equipo que efectuará la revisión formal.

3.2.5.- Métodos para evaluación de un ACV

Existe un gran número de metodologías para evaluar el impacto del ciclo de vida. Cada metodología dispondrá de sus propios indicadores, categorías de impacto, factores para la caracterización...de modo que cualquiera de ellas llevará a distintos valores con idéntica configuración estudiada, dependiendo del punto de vista que se emplee.

Una importante diferencia que existe en las metodologías que evalúan impacto radica en la alternativa de realizar el análisis de la consecuencia final del impacto ambiental (endpoint) o en su caso analizar los efectos intermedios (midpoint). Las categorías de impacto ambiental intermedias están más cercanas a la intervención ambiental, de manera que los métodos para calcular asociados se adaptan más fuertemente a esa actuación y proporciona unos datos más completos acerca de forma y localización de la afectación al medio ambiente. Por otro lado, las categorías de impacto finales representan variables que influyen en el ecosistema, por lo que elegir las se justificaría en casos aplicables a escala global; se traducen en lo que se denomina áreas de protección. En la actualidad, no se ha alcanzado el consenso científico necesario para implementar su uso¹⁷², usándose normalmente categorías de impacto intermedias.

¹⁷² Hertwich E., “*The Areas of Protection in Life Cycle Impact Assessment, Epilog*”. Global LCA Village, pp. 1-2, 2002.

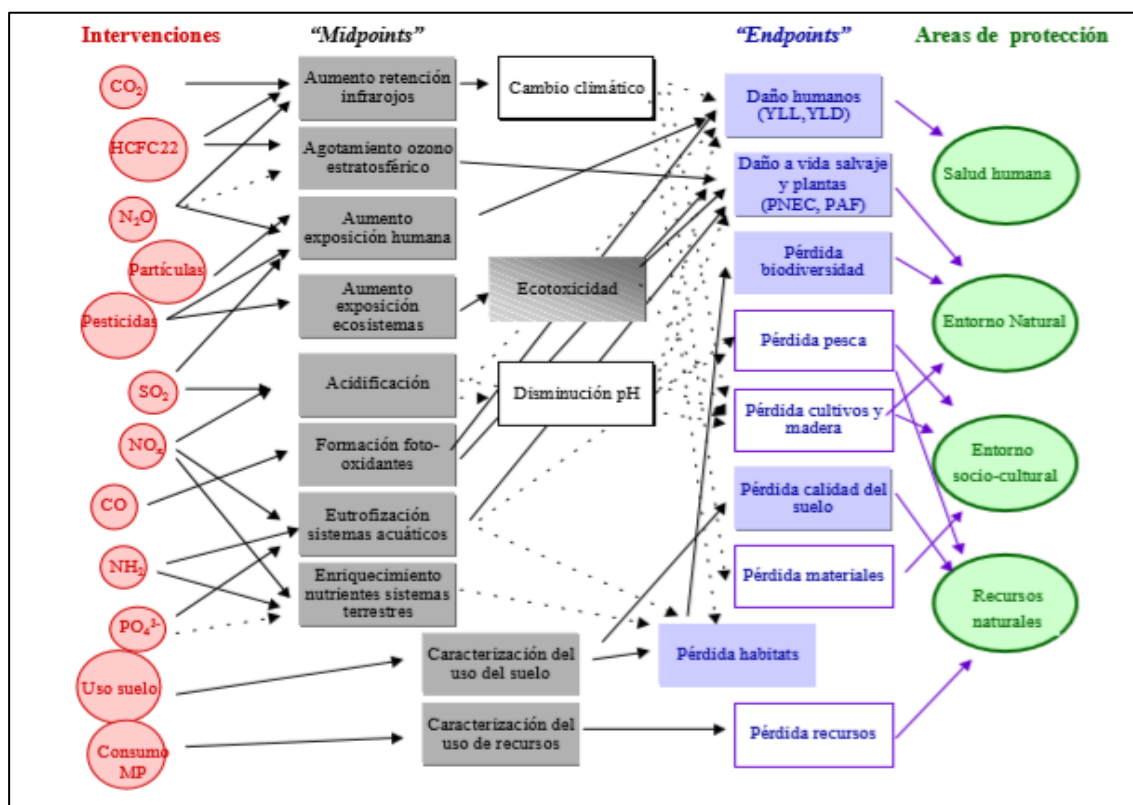


Figura 26: Flujos de relación en intervenciones ambientales, impactos de efectos intermedios (midpoints), impactos de efectos finales (endpoints) y áreas de protección.

Fuente: Udo de Haes H. (1999)¹⁷³.

Según lo expuesto anteriormente, los métodos en un ACV podrían clasificarse en aquéllos con enfoque Midpoint (CML-IA, EDIP 2003, TRACI...), aquéllos con enfoque Endpoint (Eco Indicador 99, EPS 2000, Eco Scarcity, JEPIX...), aquéllos con aproximación combinada de las dos anteriores (RECIPE, LIME, Impact 2002 +, LUCAS...) y otros métodos no englobados en las categorías anteriores (MEEup, BEES, Ecological Footprints, USEtox, EDP, IPCC, Cumulative Exergy Demand, Cumulative Energy Demand, Emery Analysis, Cumulative Exergy Consumption, CEENE...)

También podrían valorarse otras clasificaciones como las relativas a métodos con indicador único (Cumulative Exergy Demand, Cumulative Energy Demand, Ecological Footprints, Greenhouse Gas Protocol, Ecosystem Damage Potential, Impact 2002 +, IPCC, USEtox...); métodos para cuantificar la huella hídrica (Hoekstra et al 2012, Boulay et al 2011, Motoshita et al 2011, Pfister et al 2010, Ecological Scarcity 2006...); métodos desarrollados en Norteamérica (BEES, TRACI...); métodos desarrollados en Europa (CML-IA, RECIPE, ILCD 2011, EPS 2000...).

¹⁷³ Udo de Haes H., Jolliet O., Finnveden G., Hauschild M., Krewitt W., Müller-Wenk R., "Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment". The International Journal of Life Cycle Assessment 4 (2), 66, 1999.

No obstante, en todas las metodologías utilizadas en la presente tesis se calculan los valores globales tomando en consideración la caracterización, normalización y ponderación; dichas etapas generan un listado de indicadores, representados mediante marcas representativas de lo que contribuye cada categoría de impacto en la carga medioambiental.

En términos generales se va a considerar una clasificación basada en métodos de ACV que evalúan el aspecto ambiental y métodos que evalúan el aspecto energético.

Los métodos para evaluar medioambientalmente presentarán diferencias, como comentado anteriormente, debido a las perspectivas de modelo y categorías de impacto basadas en midpoint, endpoint o combinaciones para ambas; también se deberá atender a otros puntos como son los factores de caracterización, normalización y ponderación, así como su zona de aplicación y productos incluidos.

Se pasa a continuación a comentar las principales y más representativas de las metodologías existentes.

- CML-IA

Se trata de una metodología de enfoque de punto medio (midpoint), elaborada en 2011 por un grupo de investigación de la Universidad de Leiden y que propone una serie de categorías de impacto y también las indicaciones con el fin de caracterizar la fase de evaluación de impacto. Esta metodología del CML-IA no incluye la normalización¹⁷⁴.

Propone una serie de categorías de impacto obligatorias (baseline) y otras opcionales, en función de su frecuencia de uso en Análisis de Ciclo de Vida de productos y procesos.

Las categorías de impacto baseline incluirían: Cambio Climático, Agotamiento de Recursos Abióticos, Agotamiento del Ozono Estratosférico, Ecotoxicidad Terrestre, Toxicidad Humana, Acidificación, Formación de Oxidación Fotoquímica, y Eutrofización.

¹⁷⁴ Guinée J. B., “*Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards*”. The international journal of life cycle assessment, 7(5), pp. 311-313, 2002.

La caracterización se basa en factores medios globales y europeos. La normalización en CML es optativa para ACV simples, no así en aquellos ACV con gran grado de detalle donde es prácticamente obligatoria.

Todo indicador basal dispondrá de puntuaciones de normalización calculadas para los contextos más frecuentes: planeta Tierra en 1990, 1995 y continente europeo en los Países Bajos en 1997. Los datos normalizados están disponibles para los Países Bajos (1997-1998), Europa Occidental (1995) y el planeta Tierra (1990, 1995 y 2000)¹⁷⁵, la Unión Europea sola (EU25) y con Suiza, Islandia y Noruega EU25+3).

- EDIP-2003 (Environmental Design of Industrial Products)

Este método con enfoque de punto medio (midpoint) se implementó durante 1996 por el Instituto para el Desarrollo de Producto de la Universidad Técnica Danesa¹⁷⁶; la primera edición fue EDIP-1997.

Las categorías de impacto consideradas son: Agotamiento de la capa de Ozono, Eutrofización Terrestre, Eutrofización Acuática, Cambio Climático, Formación de Ozono Fotoquímico, Acidificación, Toxicidad Humana, Ecotoxicidad y Ruido.

La versión EDIP-2003 incorpora mejoras en los factores de caracterización; dichas mejoras son relativas a la inclusión de factores de caracterización dependientes de la ubicación, además de los genéricos incluidos por defecto, de manera que se tengan en cuenta las diferencias de los impactos causados por emisiones en diferentes países.

Se dispone de factores de normalización a nivel mundial y europeo para el año 1995. Se emplea ponderación¹⁷⁷. Se consideración de aplicación global para categorías como agotamiento de la capa de ozono y cambio climático.

- TRACI (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts).

Método con enfoque basado en el punto medio (midpoint) creado por la EPA.

¹⁷⁵ Huijbregts M. A. J., Breedveld L., Huppes G., De Koning A., Van Oers L., Suh S., “Normalisation figures for environmental life-cycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)”. Journal of Cleaner Production, 11(7), pp. 737-748, 2003.

¹⁷⁶ Institute for Product development at the Danish Technical University, <http://www.dtu.dk>, accedido en marzo 2023.

¹⁷⁷ Bellekom S., Potting J., Benders R., “Feasibility of applying site-dependent impact assessment of acidification in LCA”, The International Journal of Life Cycle Assessment 11 (6), pp. 417 – 424, 2006.

La EPA (Agencia de Protección Ambiental, Environmental Protection Agency) estadounidense tenía la intención de colaborar con las evaluaciones de impactos del diseño de procesos y de prevenir la polución.

Las categorías de impacto asociadas son: Agotamiento de la capa de Ozono, Formación de Smog, Acidificación, Eutrofización, Cambio Climático, Salud Humana (cáncer, no cáncer y criterios de contaminantes), Ecotoxicidad y Agotamiento de Combustibles Fósiles. Dichas categorías de impacto han sido seleccionadas y caracterizadas de acuerdo a la documentación desarrollada por la EPA¹⁷⁸.

Los factores de normalización se basan en las emisiones y recursos anuales de los EE. UU. para el año 1999. No se ha desarrollado ponderación específica para esta metodología. El área geográfica que mejor se ajusta a la validez de este método es, obviamente, los EE. UU.

- GHG Protocol (Greenhouse Gas Protocol)

Se conoce como protocolo de gases de efecto invernadero y se implementó por parte del WRI (Instituto de Recursos Mundiales) y el WBCSD (Consejo Mundial Empresarial del Desarrollo Sostenible), en cooperación con firmas, administraciones y asociaciones ambientales de ámbito global. Se trata de una metodología normalizada para la gestión emisiones para gases de efecto invernadero.

El GWP o potencial de calentamiento global a 100 años constituye una medición de base de cara a indicar los parámetros de radiación de tiempo con integración de las consecuencias provocadas por los gases de efecto invernadero, con un horizonte temporal de 100 años. La totalidad de emisiones es calculada por medio del inventario de productos, agregando las emisiones de todos ellos en unidades de CO₂-eq.

La utilidad de este método radica en que permite confeccionar inventarios de GEI; facilita y disminuye costes de inventario; da datos para planificar maniobras para dirección y disminución; aporta claridad al método de contabilización¹⁷⁹. Este método no incluye sin embargo normalización ni ponderación.

¹⁷⁸ National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, “*Exposure Factors Handbook*”, Environmental protection agency (EPA), USA, agosto 1997.

¹⁷⁹ Bhatia P., Ranganathan J., World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), “*The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard*”. 2004.

• Eco Indicador 99

Método con enfoque de punto final (endpoint), implementado por una asociación mundial de especialistas en ACV, fundamentalmente holandeses¹⁸⁰. El objetivo es indicar la carga medioambiental global para un producto por medio de un solo dato.

La función de daño expresa la correlación del impacto y el daño al bienestar de los seres humanos o medioambiente mediante evaluación de impactos últimos. El fundamento básico consiste en unir varias categorías de impacto en 3 regiones de daño:

- Agotamiento de recursos naturales.
- Daño a la calidad del medioambiente.
- Daño al bienestar de los seres humanos.

Para el propósito de obtener un factor de impacto individualizado en toda emisión o materia prima, se ponderan cruzadamente las 3 regiones de daño.

Las categorías de impacto que se incluyen en el presente método consisten en las siguientes: Cambio climático, Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación, Eutrofización, Daños sobre las vías respiratorias, Carcinogénicos, Radiación ionizante, Ecotoxicidad, Utilización del suelo, Recursos minerales y Recursos fósiles.

Son dadas 3 variantes para los factores de ponderación, que se identifican como Igualitaria, Individualista y Jerárquica, desarrolladas atendiendo a la admisión de distintos grupos de supuestos de partida¹⁸¹.

De cara a obtener el Eco Indicador 99 son requeridas 3 actuaciones:

1. Inventario de emisiones principales, obtención de recursos y utilización del terreno de la totalidad de sistemas incluidos en el Ciclo de Vida del producto.
2. Obtención de daños provocados por dichos caudales al bienestar de los seres humanos, a la calidad del medioambiente y a los recursos.
3. Ponderar las 3 categorías de daño.

¹⁸⁰ Pré Consultants, “*The Eco-indicator 99 – A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers*”, 2000.

¹⁸¹ Vivancos Bono JL., Collado Ruiz D., Bastante Ceca MJ., Gómez Navarro T., Capuz Rizo S., “*Análisis de diversas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida*”, Departamento Proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia, 2005.

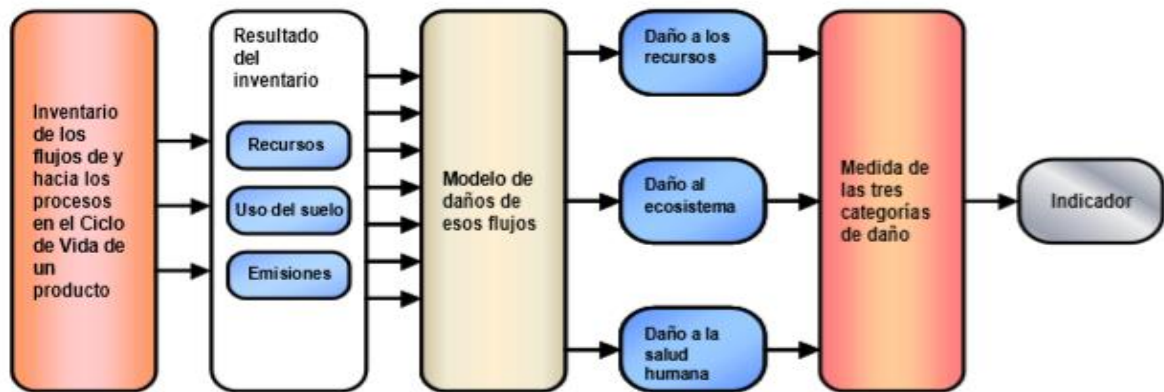


Figura 27: Procedimiento general de cálculo del método Eco Indicador 99.

Fuente: Goedkoop M. (1999) ¹⁸².

- EPS 2000 (Environmental Priority Strategies in product design)

La metodología EPS 2000 (Environmental Priority Strategies) se implementó por parte del IVL (Swedish Environmental Research Institute) en el año 1991, a raíz de una petición de la firma sueca de automóviles Volvo. Se basa en metodologías de evaluación de economía del medioambiente, esto es en la estimación de la afectación y en su correlación económica mediante la unidad ELU (Environmental Load Unit).

Se trata de un método de punto final (endpoint) donde es factible caracterizar y ponderar, pero no se permite normalizar.

Se consideran las categorías de daño especificadas a continuación: Esperanza de vida, morbilidad y sufrimiento grave, Molestia severa, Participación de las especies en extinción, Capacidad de producción de cultivos molestos, Capacidad de producción de madera, Capacidad de producción de pescado y carne, Capacidad de generar cationes básicos, Capacidad de producción de agua, Agotamiento en las reservas de elementos, Agotamiento de las reservas de fósiles y Agotamiento de las reservas minerales.

Dichas categorías son clasificadas en cuatro niveles: Capacidad de producción ecológica, Salud humana, Biodiversidad y Recursos abióticos.

¹⁸² Goedkoop M., Spriensma R., “*The eco-indicator 99. A damage oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report*”, Pré Consultants B.V., 1999.

El método se basa en los principios de causalidad y de precaución¹⁸³.

- Eco Scarcity

Introducida y desarrollada en Suiza en los años 90, esta metodología de punto final (endpoint) dispone de categorías especificadas de acuerdo a objetivos políticos. Considera las categorías de daño descritas a continuación: Efectos Respiratorios, Agotamiento de la Capa de Ozono, Formación de Oxidantes Fotoquímicos, Emisiones Aéreas, Emisiones Superficiales Acuáticas, Emisiones Radiactivas, Cáncer causado por radio nucleidos emitidos al mar, Emisiones en Aguas Subterráneas, Emisiones al Suelo, Residuos Municipales para rellenar terreno, Residuos Peligrosos (almacenados bajo tierra), Residuos Radiactivos, Consumo de Agua, Consumo de Grava, Fuentes de Energía Primarias, Disruptores Endocrinos, Pérdidas de Biodiversidad.

Estas categorías de daño, determinadas como comentamos de acuerdo con objetivos políticos, son particulares para cierta región o país, lo que facilita que los Eco puntos se calculen en base a la legislación propia y a la agenda política de dicho entorno.

La caracterización y la normalización son calculadas basándose en cifras de Suiza del año 2004; estos datos fueron actualizados en la nueva versión del año 2006¹⁸⁴. La ponderación se efectúa mediante el método de distancia al objetivo establecido por las metas políticas medioambientales suizas.

¹⁸³ Steen B., “A systematic approach to environmental strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics”. Centre for Environmental Assessment of Products Materials Systems. Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning. 1999.

¹⁸⁴ Frischknecht R., Steiner R., Jungbluth N., “The Ecological Scarcity method, Eco factors 2006, a method for impact assessment in LCA”, Federal Office for the Environment (FOEN), Switzerland, 2006.

• RECIPE

En su desarrollo participaron una gran cantidad de empresas del sector de estudios de ACV. Esta metodología está fundamentada en otras anteriores como Eco Indicador 99 y CML 2002. Junta los puntos de vista de modelo de endpoint y de midpoint.

Las categorías asociadas al modelo del punto medio son las siguientes: Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación terrestre, Eutrofización marina, Eutrofización en agua dulce, Formación de oxidantes fotoquímicos, Formación de partículas, Cambio climático, Toxicidad humana, Ecotoxicidad terrestre, Ecotoxicidad en agua dulce, Ecotoxicidad marina, Radiación ionizante, Utilización del suelo agrícola, Utilización del suelo urbano, Transformación del suelo natural, Agotamiento del agua, Agotamiento recursos minerales y Agotamiento de recursos fósiles.

Para el modelo del endpoint se tienen en cuenta las tres siguientes categorías enfocadas en la protección del medioambiente: Daños a la salud humana, Daños a la Ecodiversidad, Daños a la disponibilidad de recursos.

Para caracterizar y normalizar se tomó de medida el año 2000 incluyendo datos correspondientes a la totalidad de Europa. La ponderación es desarrollada a través de un panel de enfoque.

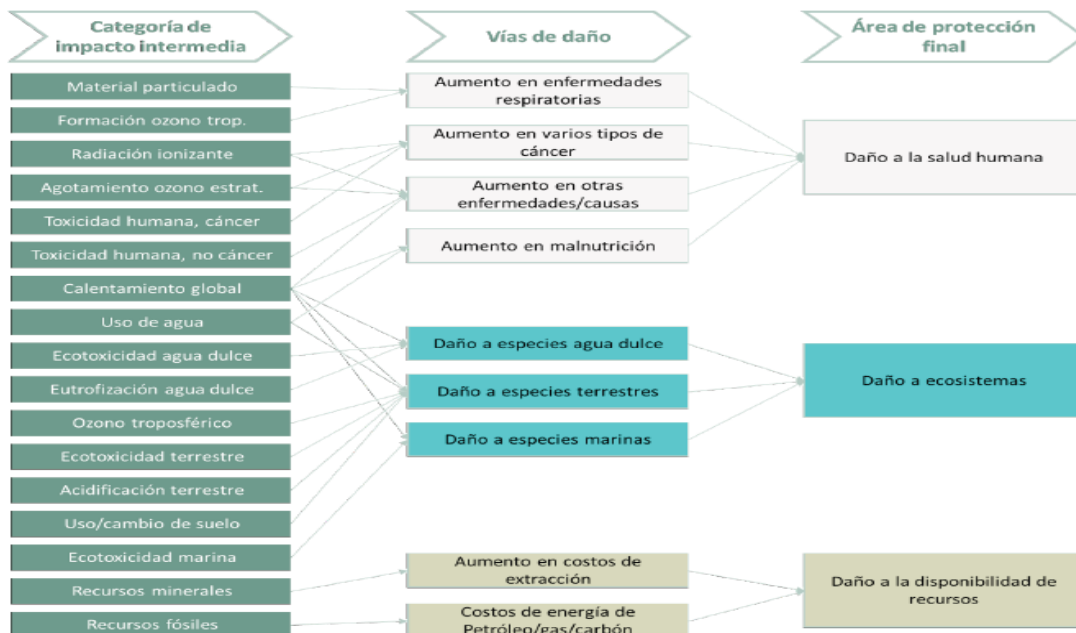


Figura 28: Estructura de cálculo de impactos Recipe 2016.

Fuente: Unilever (accedido en oct. 2019) ¹⁸⁵.

¹⁸⁵ Unilever, “Análisis de ciclo de vida de detergentes”, <https://www.unilever.es/>, accedido en oct. 2019.

• LIME

Este método fue desarrollado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón¹⁸⁶ para cuantificar los impactos ambientales provocados por los incidentes con cargas medioambientales. Agrupa el punto de vista del modelo de punto final y medio.

Son tenidas en cuenta las categorías de impacto de punto medio descritas a continuación: Calentamiento global, Agotamiento de la capa de ozono, Acidificación, Formación de oxidantes fotoquímicos, Contaminación del aire regional, Químicos tóxicos para humanos, Químicos ecotóxicos, Eutrofización, Uso del suelo, Vertedero de residuos, Recurso y consumo. Se consideran las siguientes categorías de daño de punto final: Catarata, Cáncer de piel, Otro cáncer, Enfermedad respiratoria, Estrés térmico, Enfermedad infecciosa, Hipoalimentación, Causalidad de desastres, Producción agrícola, Producción forestal, Producción pesquera, Pérdida de uso de la tierra, Consumo de energía, Costo del usuario, Ecosistema terrestre, Ecosistema acuático. Esas categorías de daño de punto final se agrupan en 4 niveles protectores: Salud humana, Bienestar social, Producción primaria neta y Biodiversidad.

Los factores de caracterización se basan en perfiles ambientales japoneses. Los valores de normalización expresan el daño potencial en base a las condiciones ambientales japonesas. La ponderación se realiza utilizando métodos de monetización.

• LUCAS

Metodología desarrollada por CIRAIG¹⁸⁷. Se considera como un método que agrupa los puntos de vista asociados a modelo de punto final y de punto medio. La razón detrás del desarrollo de esta metodología fue el aumento de los estudios de ACV en las industrias canadienses. Estos estudios fueron utilizando las metodologías de impacto del ciclo de vida ampliamente conocidas basadas principalmente en valores promedio para otras regiones además de Canadá (como los valores medios europeos). Por ello, surgió la necesidad de desarrollar una metodología que fuera específica para el territorio canadiense y en 2005 se desarrolló la Metodología LUCAS.

¹⁸⁶ METI: Ministry of economy, trade and industry, Japan, <http://www.meti.go.jp>, accedido en oct. 2019.

¹⁸⁷ Interuniversity Reference Center for the Life Cycle Assessment Interpretation and Management of Products, Processes and Services, École Polytechnique de Montréal, Montreal, Quebec, Canada, <http://www.ciraig.org>, accedido en marzo 2023.

Las categorías de impacto de puntos medios incluidos en este método son: Cambio climático, Agotamiento del ozono, Acidificación, Smog fotoquímico, Efectos respiratorios, Eutrofización acuática, Eutrofización terrestre, Ecotoxicidad, toxicidad humana, Agotamiento de recursos abióticos y Uso de la Tierra.

Los factores empleados para caracterizar fueron adaptados de los ya existentes en metodologías como EDIP 2003, Impact 2002+ y TRACI. Los factores de normalización están determinados por la relación del impacto por unidad de emisión dividido por el impacto global de la totalidad de componentes contribuyendo a la categoría de impacto específico, por persona y año. La ponderación no se usa en esta metodología. La validez regional es para Canadá.

- Impact 2002+

Esta metodología franco-suiza de evaluación de impacto del ciclo de vida plantea un desarrollo posible para un enfoque mixto de punto final / medio, vinculando la totalidad de valores obtenidos en el inventario de ciclo de vida (corrientes principales y resto de actuaciones) por medio de catorce categorías de midpoint a cuatro categorías de daño (endpoint).

Los Factores de Daño Humano son obtenidos en sustancias carcinogénicas y no carcinogénicas, empleando fracciones para la ingesta, mejores estimaciones de factores de dosis-respuesta, así como severidades. La transferencia de contaminantes al alimento humano ya no se basa en encuestas de uso, ahora se base en las tasas de fabricación agropecuaria. Lo emitido a la atmósfera es susceptible de comparación y se tiene en cuenta la intermitencia de la lluvia. Tanto la toxicidad humana como los factores de efecto de ecotoxicidad están basados en contestaciones estándar más que en hipótesis más tradicionales. Otras categorías de punto medio se adaptan de las metodologías de caracterización existentes (CML 2002 y Eco-indicator 99). Todos los resultados del punto medio son indicados en unidades de un compuesto base y se relacionan con las 4 categorías de daños: salud humana, calidad del medioambiente, cambio climático y recursos. Es factible que se normalice con enfoque en el punto medio o final¹⁸⁸.

¹⁸⁸ Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., “*IMPACT 2002+:* A new life cycle impact assessment methodology”, The International Journal of Life Cycle Assessment 8: 324. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>, 2003.

- **BEES** (Building for Environmental and Economic Sustainability)

Metodología implementada por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST)¹⁸⁹. En esta herramienta se une la evaluación de impacto del ciclo de vida y el coste del ciclo de vida (Life Cycle Costing - LCC).

En la parte de evaluación del impacto se evalúa el impacto ambiental asociado al producto estudiado. Se consideran las siguientes categorías de impacto: Calentamiento global, Acidificación, Agotamiento de combustibles fósiles, Calidad del aire interior, Alteración del hábitat, Ingesta de agua, Criterios de contaminantes del aire, Smog, Ecotoxicidad, Eutrofización, Agotamiento del ozono y Salud humana. La caracterización y la normalización se aplican en base a los valores promedio de EE. UU. La ponderación puede ser realizada por definición del usuario o por conjuntos de ponderación ya existentes, desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental (EPA).

En la parte de LCC, el rendimiento económico es expresado empleando la metodología de costo de ciclo de vida medio de la ASTM¹⁹⁰ que abarca los costes de inversión preliminar, sustitución, explotación, conservación y arreglo, así como disposición. Los valores obtenidos correspondientes a actuación medioambiental y financiera se combinan para dar la medida de rendimiento general utilizando el estándar ASTM para Análisis de Decisión de Múltiples Atributos¹⁹¹. Esta medida general constituye el peso relativo de los factores ambientales y económicos.

- **Ecological Footprints**

La huella ecológica se ha convertido en la principal medida global de la demanda de la humanidad sobre la naturaleza, específicamente sobre el uso de la tierra. Expresa la dimensión tanto del área terrestre como marina productiva, desde el punto de vista biológico, que la actuación de los seres humanos necesita de cara a generar los activos que utiliza y asimilar los residuos resultantes empleando la tecnología predominante y la gestión de recursos. Estas medidas se comparan con el área terrestre y marítima disponible.

¹⁸⁹ NIST: The National Institute of Standards and Technology, www.nist.gov, accedido en oct. 2019.

¹⁹⁰ ASTM: American Society for Testing and Materials, <https://www.astm.org/>, accedido en oct. 2019.

¹⁹¹ American Society for Testing and Materials (ASTM), “*Standard practice for applying the analytic hierarchy Process to Multi Attribute Decision Analysis (MADA) of investments related to buildings and building systems*”, ASTM designation E 1765-95, West Conshohocken, PA, USA, 1995.

La huella ecológica se ha utilizado comúnmente para evaluar la presión humana en un contexto geográfico, por ejemplo, en el nivel de naciones, regiones o ciudades. En el análisis de la metodología, se consideran cinco tipos de ocupación directa de la tierra: tierras de cultivo, pastos, bosques, área edificada y área hidroeléctrica, y dos tipos de ocupación indirecta: combustibles fósiles y energía nuclear. Todos estos siete factores están expresados en hectáreas globales (estandarización basada en la productividad), que son normalizados a las hectáreas disponibles de producción biológica en la actualidad¹⁹².

- USEtox

La metodología USEtox se ocupa del desarrollo de modelos de caracterización para impactos humanos y ecotóxicos. USEtox se desarrolló dentro del marco de trabajo del proyecto de iniciativa del ciclo de vida SETAC / PNUMA. Uno de los objetivos de esta iniciativa era la mejora y establecimiento de metodologías recomendadas para la evaluación de impacto del ciclo de vida que fueran accesibles en todo el mundo, así como la elaboración de directrices para las diferentes categorías de impacto y el desarrollo de conjuntos de factores de caracterización consistentes. En este contexto, se concluyó que los distintos métodos para la evaluación del impacto de ciclo de vida existentes no aportaban resultados de caracterización de toxicidad consistentes para las diferentes sustancias, además del número limitado de sustancias cubiertas.

Debido a lo anterior, y sabiendo que los indicadores de toxicidad asociados a las consecuencias para la salud humana y calidad del sistema ecológico son necesarios de cara a evaluar el ciclo de vida tanto independiente como comparativa, y también de cara a la clasificación de sustancias químicas según características peligrosas, USEtox fue desarrollada para abordar estos requisitos. Las actividades desarrolladas incluyen una programación fácil de usar para la ejecución de modelos de caracterización, una mejora en la incorporación de los metales al inventario, un aumento de la documentación disponible e inclusión de modelos de ecotoxicidad terrestre y marina¹⁹³.

¹⁹² Huijbregts M., Hellweg S., Frischknecht R., Hungerbühler K., Jan Hendriks A., “*Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products*”, *Ecological Economics* 64, pp. 798 – 807, 2008.

¹⁹³ Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M., Jolliet O., Juraske R, Koehler A., Larsen H.F., Manuele Margni M.M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D., Hauschild M.Z., “*USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment*”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 pp. 532–546, 2008.

- EDP (Eco sistema Damage Potential)

Esta metodología fue creada en el Instituto Federal Suizo para la Tecnología (ETH)¹⁹⁴. El Potencial de daño del sistema ecológico (EDP) es una metodología que trata con categorías específicas de impacto del ciclo de vida. Está especificado con el fin de incrementar los factores de caracterización genéricos en la ocupación terrestre, transformación en la tierra y biodiversidad. La ventaja principal de este método específico es la posibilidad de calcular los daños de series complejas de transformación de tierras, ocupación de tierras y restauración de la tierra teniendo en cuenta el tiempo de restauración virtual o factual de la misma. Esto significa que el daño de la transformación de la tierra es mayor para los tipos de uso de la tierra que son difíciles de restaurar y necesitan un desarrollo extremadamente largo¹⁹⁵ (por ejemplo, bosque primario).

- ILCD (International Reference Life Cycle Data System)

El Sistema Internacional para la Referencia en Datos de Ciclo de Vida (ILCD) es en realidad una base común para datos y estudios de ciclo de vida consistente, robusta y de aptitud garantizada. Se menciona aquí porque dichos datos y estudios respaldan a otras herramientas como Ecoetiquetado, Ecodiseño o Huella de Carbono. También proporciona orientación técnica para estudios detallados de Análisis del ciclo de vida y proporciona una base científica para derivar criterios específicos del producto, guías y herramientas simplificadas¹⁹⁶. Está basado y cumple con los estándares ISO 14040 y 14044. El público objetivo principal de esta guía es el profesional de ACV, así como expertos técnicos en el sector público y privado que se ocupan del apoyo en la toma de decisiones relacionadas con los productos, los recursos y la gestión de residuos.

- Huella hídrica

Se define como un indicador de carácter ambiental que representa el volumen completo de agua dulce usado en la producción de los bienes y servicios que generalmente se consumen. Se trata de una variable imprescindible que informa sobre el agua que vale elaborar un producto.

¹⁹⁴ The Swiss Federal Institute of Technology, www.ethz.ch, accedido en marzo 2023.

¹⁹⁵ Koellner T.,Scholz W.R., “Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment, Part 1: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change”, The International Journal of Life Cycle Assessment 12 (1) pp. 16 – 23, 2007.

¹⁹⁶ European Commission, *ILCD handbook: General guide for life cycle assessment – provisions and action steps*, first edition, Institute for Environment and Sustainability. 2010.

Los métodos que se emplean de cara a calcular la huella hídrica pueden resumirse en aquéllos que son dependientes de la carencia de agua y en aquéllos que analizan los daños provocados al ecosistema o a la salud humana.

Son métodos de punto final (endpoint) basados en la publicación Boulay et al (2011)¹⁹⁷.

Uno de los objetivos fundamentales de los métodos de huella hídrica es cuantificar impactos producidos por la escasez de agua. La utilización del agua en un lugar y condiciones concretas es posible que haga que se convierta en un recurso sin disponibilidad por haberse acabado o por la disminución de su aptitud. La falta de disponibilidad de agua para el hombre perjudica su salud.

En el método de Boulay se evalúan los caudales que entran y salen de agua, al igual que su aptitud y abundancia, para cuantificar la disminución de la funcionalidad de ella y presentar datos por regiones. El indicador es la escasez de agua (WSI, del inglés Water Scarcity Indicator). Dicho indicador de escasez abarca aguas subterráneas y superficiales obteniendo el consumo de agua y disponibilidad de los valores de la metodología WaterGAP¹⁹⁸.

Otros métodos de huella hídrica comúnmente empleados son los correspondientes a Hoekstra¹⁹⁹, basado en una relación de consumo y disponibilidad evaluando la parte de agua con disponibilidad que se ha consumido (huella hídrica azul) y el agua disponible completa, y a Motoshita²⁰⁰, enfocado en la salud humana con las categorías de daños asociados a enfermedad infecciosa debido a la escasez de agua en uso doméstico y daños por la escasez de agua en medios agrícolas, cuantificándose en Daly/ Kcal desnutrición. Existen también otros métodos, pero de menor importancia.

¹⁹⁷ Boulay A.M., Bulle C., Bayart J.B., Deschenes L., Margni M. “*Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health*”. Environmental Science & Technology N°45, pp. 8948-8957, 2011.

¹⁹⁸ Alcamo J., Döll P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner B., Rösch T., Siebert S., “*Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability*”. Hydrological Sciences Journal, 48(3), pp. 317-337. 2003

¹⁹⁹ Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M., Chapagain A.K., Mathews R.E., Richter B.D. “*Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprint versus Blue Water Availability*”. PLUS ONE N°7(2): e32688. DOI:10.1371, 2012.

²⁰⁰ Motoshita M., Itsubo N., Inaba A. “*Development of Impact Factors on Damage to Health by Infectious Diseases Caused by Domestic Water Scarcity*”. International Journal LCA N°16, pp. 65-73, 2011.

Por otra parte, y dejando a un lado ya los métodos de evaluación con perspectiva de medio ambiente, se pasa a continuación a detallar métodos para la evaluación desde el punto de vista energético más habituales

- CED (Demanda Acumulada de Energía - Cumulative Energy Demand)

CED es una metodología utilizada para cuantificar el uso directo e indirecto de energía en unidades de MJ durante el ciclo de vida completo del producto o proceso, incluyendo energía consumida durante las fases de extracción, fabricación, así como disposición de los materiales.

CED considera en su contexto la demanda acumulada de energía para los recursos fósiles, como la hulla, el lignito, la turba, el petróleo crudo y el gas natural, y también los recursos nucleares y otros recursos renovables, como: biomasa, agua, viento y energía solar.

Este método representa la demanda de energía, valorada como energía primaria durante el ciclo de vida completo de los productos.

La demanda acumulada de energía se ha utilizado como metodología para evaluar impactos ambientales relativos al ciclo de vida desde los años setenta (principios), pero también ha sido criticado porque se enfoca solo en la energía. Sin embargo, se considera como un parámetro de energía importante ya que tiene en cuenta todas las formas de uso de energía durante todo el ciclo de vida (renovable y no).

La importancia de CED surge del hecho de la dependencia del impacto ambiental en la demanda de energía durante todo el ciclo de vida de cualquier sistema de producto. Por lo tanto, se sugiere que CED se puede usar como un indicador de los impactos ambientales, especialmente en el caso de sistemas de producción de energía.

Por lo tanto, CED se puede utilizar como una herramienta complementaria al lado de las otras metodologías de evaluación del impacto para proporcionar el estudio con información preliminar sobre la parte crítica en el ciclo de vida de un proceso o producto que consume más energía²⁰¹.

²⁰¹ Klopffer W., “*In Defense of the Cumulative Energy Demand*”, The International Journal of Life Cycle Assessment 2 (2) 61, 1997.

- CExD (Demanda Acumulada de Exergía- Cumulative Exergy Demand)

La exergía se define²⁰² como la cantidad de trabajo obtenible cuando alguna materia se lleva a un estado de equilibrio termodinámico con los componentes comunes del entorno natural por medio de procesos reversibles.

Así pues, esta metodología evalúa la calidad de los recursos energéticos. Cuantifica el trabajo útil que puede hacerse con una cierta cantidad de energía. Los cálculos se aplican tradicionalmente para evaluar la eficiencia energética de recursos con respecto a las pérdidas de exergía. El indicador de demanda acumulada de exergía se introduce para evaluar la eliminación total de la exergía de la naturaleza con el fin de proporcionar un producto o un servicio.

El CExD es similar a la demanda acumulada de energía (CED) ya que ambos evalúan la demanda de energía en el ciclo de vida. Sin embargo, CED es usado con el fin de valorar la demanda de energía de los recursos energéticos primarios y la calidad de la energía no se tienen en cuenta. Una ventaja de CExD es que considera la calidad de la energía, ya que evalúa la calidad de los recursos energéticos. Además, los cálculos de CExD incluyen la exergía de diferentes recursos energéticos (renovables y no renovables), así como recursos no energéticos (agua, minerales y metales). Esto hace que el CExD sea un indicador de energía más integral que el CED²⁰³.

- Emergy Analysis (Análisis de Emergía)

La emergía se define como la cantidad total de un tipo de energía que es directa o indirectamente utilizado para producir un producto o servicio. Hay un tipo diferente de emergía para cada tipo de recurso de energía disponible. Al igual que la energía, la emergía se mide en relación con un nivel de referencia. En la mayoría de las aplicaciones, las medidas se expresan en las unidades de energía solar.

La principal diferencia entre el análisis de emergía (EA) y los métodos orientados a la energía mencionados anteriormente (CED y CExD) es que EA es una medida de la riqueza real en la tierra en términos de energía necesaria antes de hacer algo.

²⁰² Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., “*Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes*”. Hemisphere Publishing, New York. 1988.

²⁰³ Bosch M.E., Hellweg S, Huijbregts M., Frischknecht R., “*Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database*”, The International Journal of Life Cycle Assessment 12 (3) pp.181 – 190, 2007.

EA permite contabilizar flujos adicionales que influyen en la sostenibilidad como los residuos, la pérdida de suelo, el trabajo humano y el uso del agua. Por lo tanto, toda la energía previamente disponible para hacer algo se considera en el procedimiento de cálculo, lo que significa que el EA presenta la memoria de energía de un producto o un proceso representado por los indicadores finales²⁰⁴.

- **CExC** (Cumulative Exergy Consumption – Consumo de Exergía Acumulado)

El CExC – Consumo de Exergía Acumulado, es una forma más desarrollada del método CExD. Amplía el análisis al incluir dos formas: el Consumo de Exergía Acumulativa Industrial (ICEC) y Consumo de Exergía Acumulativa Ecológica (ECEC).

ICEC representa el consumo de exergía en sistemas industriales dentro de su ciclo de vida. Similar a CExD, su capacidad para medir el trabajo útil de materiales y los flujos de energía permite la comparación entre recursos. Se considera que proporciona información sobre daños a corto plazo y dentro de una escala local.

ECEC cuantifica las implicaciones, considera problemas a más largo plazo y representa el consumo de exergía en el trabajo y capital, pérdida de exergía debido al impacto de las emisiones y exergía consumida en ecosistemas para crear los bienes y servicios del sistema ecológico consumidos por actividades industriales²⁰⁵.

- **CEENE** (Extracción Acumulativa de Energía del Entorno Natural- Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment)

La extracción acumulativa de exergía del entorno natural (CEENE) es una metodología similar a CExD, pero con algunas diferencias. Ejecuta la misma evaluación de recursos energéticos y no energéticos (agua, minerales y metales). Pero además de esto, CEENE evalúa el uso de la tierra. Además, mientras CExD evalúa la exergía que se elimina de la naturaleza y se transfiere al sistema tecnológico, CEENE representa la exergía total de la que el sistema natural está privado²⁰⁶. Por lo tanto, CEENE es una herramienta integral a utilizar con otros métodos de evaluación del impacto.

²⁰⁴ Ulgiati S., Odum H.T., Bastianoni S., “*Emergy use, environmental loading and sustainability. An emergy analysis of Italy*”, Ecological Modelling 73, pp. 215-268. 1994.

²⁰⁵ Ukidwe N.U., Bakshi B.R., “*Industrial and ecological cumulative exergy consumption of the United States via the 1997 input-output benchmark model*”, Energy 32, pp. 560-1592, 2007.

²⁰⁶ Dewulf J., Bosch M.E., De Meester B., Van Der vorst G., Van Langenhove H., Hellweg S., Huijbregts M., “*Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a Comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource Accounting*”, Environmental Science and Technology, 41, pp. 8477-8483, 2007

- MEEup (Method for the Evaluation of Energy using Products)

La metodología MEEup, desarrollada en Holanda, está especialmente orientada para evaluar el nivel de conformidad de la energía utilizando productos con los criterios que los hacen elegibles para la aplicación de medidas de la Directiva 2005/32/CE²⁰⁷ que establece requerimientos para el diseño ecológico con aplicación a los productos que usan energía.

Las categorías cubiertas son: consumo de energía, consumo de agua, materiales en uso, generación de desechos (a vertedero e incinerador), generación de desechos peligrosos, emisiones al aire y emisiones al agua. Las categorías de impacto son caracterizadas en base a la legislación y los tratados pertinentes de la UE e internacionales. La normalización y ponderación no están especificadas para esta metodología.

Una vez finalizada la revisión de los métodos de evaluación de ACV más usuales, como paso previo a la presentación de resultados experimentales y conclusiones acerca de los mismos, se describirá la herramienta computacional utilizada para la realización del ACV, que será la que proporcione los datos con los que analizar el comportamiento medioambiental de cada configuración estudiada.

²⁰⁷ European Commission, “*Methodology study Eco design of energy using products*”, MEEup methodology Report, 2005.

3.3.- Herramienta computacional utilizada

En la actualidad se dispone de un elevado número de softwares para la realización de Análisis de Ciclo de Vida; en la elección de un determinado de software influirán lógicamente el grado de detalle necesario para el estudio y la facilidad de uso de la herramienta.

Existen herramientas que permiten ejecutar Análisis de Ciclo de Vida simplificados (véase Eco-It²⁰⁸, Ec-Scan, KEPI, ...) Sin embargo, para la realización de un Análisis de Ciclo de Vida fiable y riguroso, se utilizan softwares como SimaPro y Gabi; también existen softwares libres como OpenLCA.

Los estudios de Análisis de Ciclo de Vida realizados en esta tesis han sido ejecutados con el software SimaPro 9.0.0, creado por la firma holandesa PréConsultants. Dicha empresa es un referente en el campo de la sostenibilidad, al haber desarrollado el método Ecoindicador (cuya versión actualizada es el ReCiPe). La herramienta SimaPro permite llevar a cabo un ACV íntegro utilizando diferentes metodologías de evaluación de impacto con el fin de calcular los impactos²⁰⁹, y de acuerdo a lo recomendado por la norma ISO 14040:2006. Este software se ha utilizado de forma exitosa por parte de usuarios de más de 60 países.

Una de las ventajas de esta herramienta computacional consiste en su gran base de datos donde se incluyen proyectos que aglutinan la totalidad de los inputs y outputs, así como entradas de distintos compuestos, unidades de medición y citas bibliográficas de varios autores con información de materiales, sistemas energéticos, metodologías de evaluación de impacto... También permite al usuario crear su propia base de datos.

Los procesos se dividen en 7 categorías: energía, materiales, transporte, fabricación, uso, residuos y tratamiento. Cabe destacar que el sistema de indicadores de calidad de los datos muestra conformidad con norma ISO 14040:2006 y a través de este sistema son evaluados en cuanto a aptitud los datos introducidos.

²⁰⁸ Alonso M., “*El Análisis de Ciclo de vida y sus principales softwares como herramientas de cálculo*”, Revista digital INESEM, 2015.

²⁰⁹ Goedkoop M., Oele M., Schryver A., Vieira M., Hegger S., “*SimaPro Database Manual. Methods library*”, PRé Consultants: Amersfoort, The Netherlands, 2010.

Con la búsqueda de la mayor cantidad de datos necesarios en la ejecución del estudio, el inventario del ciclo de vida (ICV) es preparado. SimaPro calcula la evaluación de impacto para toda etapa o sub-etapa del modelo. Asimismo, facilita la recepción de resultados mediante gráficas, tabulado y esquema árbol.

La configuración de la base de datos de SimaPro se establece en 3 secciones:

Datos del Proyecto: Datos particulares del proyecto que se está realizando.

Datos de Biblioteca (BBDD): Datos de recurrencia en el proyecto de aplicación.

Datos Generales: Datos ordinarios de apoyo para la totalidad de bibliotecas y proyectos, incluyendo factores de conversión y principales sustancias.

Para la etapa de evaluación de impacto, SimaPro posee los métodos de evaluación de impacto más reconocidos, los cuales emplean la técnica de caracterización para calcular la aportación asignada de una sustancia a una categoría de impacto en concreto. Varias de estas metodologías emplean técnicas de evaluación del daño, ponderación o normalización.

En la primera fase de *Objetivo y Alcance*, se presenta la explicación con multitud de datos para añadir la finalidad del proyecto, la unidad funcional y otra serie de especificaciones. Es aquí donde se localizan las bibliotecas con las bases de datos. En dichas bases de datos, los datos de inventario del ciclo de vida son los más actuales y son recabados del área geográfica donde tiene lugar el proyecto. Todos los documentos relativos a las fuentes de datos, la exactitud de dichos datos y las premisas correspondientes tienen una especial relevancia. En cuando a las bases de datos, mencionar que SimaPro dispone de multitud, pero la más reseñable es Ecoinvent en la edición 3. También incluye otras como US LCI, LCA Food DK, EU & DK Input Output Database, ELCD v2.0...

La siguiente fase se asigna al *Inventario*, formado por:

Procesos: componente indivisible del modelo. Se trata de módulos que cuelgan del árbol del proyecto e incluyen información ambiental relacionada con la naturaleza. Asimismo, también dispone de información económica

Etapas del Producto: Este elemento no posee información ambiental; no obstante, describe el producto y su ciclo de vida: montaje y desmontaje, contexto de destino último, reaprovechamiento y ciclo de vida. Aporta el conocimiento organizacional.

Descripción del sistema: Una lista con los distintos sistemas de los que disponen las bases de datos.

Tipos de residuos: Una lista de las sustancias con tratamiento para el final de su vida dentro de las bases de datos.

Parámetros: En el presente punto es posible añadir parámetros generales o para un proceso concreto para ejecutar un análisis de sensibilidad y posibles escenarios.

La fase posterior se centra en el *Análisis de Impacto*, donde existe una lista de distintas metodologías de impacto de las que existe disponibilidad. Existe una opción para crear métodos propios.

La última fase, correspondiente a la *Interpretación de resultados*, incluye discusión de lo obtenido en el análisis de inventarios y de la evaluación de impacto. Se trata del punto relevante a partir del cual exponer las deducciones y próximas resoluciones según el objetivo y alcance que se han establecido. Facilita la delimitación de la fase del ciclo de vida donde se producen las mayores cargas medioambientales del producto y es por eso por lo que aporta una recomendación acerca de cuáles son los puntos del sistema en donde se pueden enfocar las mejoras. En el caso de que se estén comparando productos es factible discernir el que tiene una conducta medioambiental más eficiente.

3.3.1.- Metodologías empleadas en SimaPro

Las características de las metodologías destinadas al análisis de impacto para el programa informático SimaPro 9.0 se detallan en apartados anteriores, pero a continuación se desarrollan más específicamente para analizar su contexto particular en esta herramienta.

Caracterización: Los compuestos que aportan a una categoría de impacto fijada se multiplican por el factor de caracterización que indica la aportación específica del mencionado compuesto. El resultado final de esta clase de operaciones es señalado mediante un indicador de la mencionada categoría de impacto.

Análisis de Daños: Se trata de un avance con el fin de evaluar los diferentes impactos. Es llevado a cabo utilizando métodos de punto final: EPS2000, Ecoindicador99.

Lo que pretende el Análisis de Daños consiste en la agrupación de una multitud de indicadores de categoría impacto en una categoría de área de protección o de daños. En esta fase, es factible añadir categorías de indicadores de impacto utilizando una unidad común. Véase al efecto que en el método Ecoindicador99, la totalidad de categorías de impacto que se refieren a la salud humana son expresadas en años de vida ajustados por discapacidad: unidad DALY.

Normalización: La presencia de varias metodologías implica que los valores que se consiguen por los indicadores de categoría de impacto deban compararse en base a un valor de referencia. Entre las referencias con mayor uso se encuentra la carga ambiental promedio anual en un país entre el número de habitantes de dicho país. No obstante, la referencia es susceptible de ser elegida a voluntad.

Ponderación: Varios métodos permiten ponderar las categorías de impacto, eso implica que los valores de la categoría de impacto son multiplicados por factores de ponderación, para posteriormente sumarse y conseguir una puntuación individual o total. La ponderación es susceptible o no de utilizarse en valores normalizados ya que existen metodologías (por ejemplo, EPS), donde no hay fase de normalización.

A continuación, se presentarán los resultados y conclusiones sobre los sustratos y recubrimientos seleccionados, así como los ACV de los mismos. Seguidamente se realizarán los ACV comparativos de las distintas configuraciones para determinar cuál es la configuración medioambientalmente más favorable.

4. MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO: DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

4.1.- Materiales para aplicaciones de alta temperatura en turbinas de vapor supercrítico

Como ya se ha comentado, es un hecho que el desarrollo de la tecnología de plantas de producción de energía eléctrica a partir de carbón con unidades generadoras de turbina de vapor durante las últimas décadas, así como en el futuro inmediato, ha estado y estará enfocado en mejorar la eficiencia térmica de la planta potenciando los parámetros iniciales de su medio de trabajo: presión y temperatura del vapor principal, así como temperatura del vapor de recalentamiento. El vapor USC se puede considerar como una tecnología madura de generación de vapor mediante turbina. La transición a vapor ultrasupercrítico avanzado es el siguiente paso en el desarrollo de la tecnología de centrales eléctricas de turbinas de vapor de carbón, con el fin de hacer alcanzable una eficiencia del 50%. Esta dirección en el desarrollo de la tecnología de centrales eléctricas de carbón parece ser la más prometedora en la actualidad. Se han producido y se siguen produciendo desarrollos de vanguardia en tecnología de centrales eléctricas de turbinas de vapor que emplean vapor ultrasupercrítico avanzado (A-USC) con factores de eficiencia de aproximadamente el 50% en localizaciones de la UE, EE.UU., Japón y China²¹⁰. En este contexto es básico reportar hallazgos relacionados con el desarrollo y estudios de materiales y elementos estructurales de secciones de calderas de alta T y turbinas de vapor, diseños de plantas de energía con capacidades unitarias lo más altas posible, así como aspectos económicos y ambientales del desarrollo de la planta de energía de vapor A-USC. Por ello, se muestran seguidamente cinco de los materiales más comúnmente empleados en las turbinas de vapor de las plantas supercríticas, ultrasupercríticas y ultrasupercríticas avanzadas debido a su capacidad para soportar la corrosión y la oxidación a altas temperaturas y presiones, así como a su buen comportamiento frente a los ciclos térmicos y a sus propiedades intrínsecas. Más adelante, se presentarán los recubrimientos seleccionados para hacer el ACV junto con los sustratos descritos a continuación, de los que se detalla su composición química porcentual.

²¹⁰ Rogalev N., et al., "A Survey of State-of-the-Art Development of Coal-Fired Steam Turbine Power Plant Based on Advanced Ultrasupercritical Steam Technology", Contemporary Engineering Services, Vol.7, no.34, pp-1807-1825, 2014. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2014.410191>

4.1.1.-Acero ferrítico P91

La composición típica de este tipo de acero se recoge en la siguiente tabla:

C (%)	V (%)
0,08-0,12	0,18-0,25
Mn (%)	N (%)
0,30-0,60	0,03-0,07
P (%)	Ni (%)
0,020 máx.	0,40 máx.
S (%)	Al (%)
0,010 máx.	0,02 máx.
Si (%)	Nb (%)
0,20-0,50	0,06-0,10
Cr (%)	Ti (%)
<u>8,00-9,50</u>	0,01 máx.
Mo (%)	
0,85-1,05	

Tabla 10: Composición química típica acero ferrítico P91.

Fuente: Hahn B. (2013)²¹¹.

El acero ferrítico P91, igual que el P92, es empleado en la construcción de turbinas y otros componentes de centrales eléctricas de vapor en condiciones C, SC, A-USC.

Se han realizado estudios con recubrimientos de slurry de aluminio sobre aceros ferríticos P91 en condiciones de 700 ° C y 300 bar, observándose el crecimiento de una capa de Al₂O₃ que mejora la resistencia a la oxidación²¹². Una de las principales preocupaciones del uso de este tipo de recubrimientos eran los posibles efectos nocivos sobre las propiedades mecánicas del sustrato, ya sea a través de la precipitación de fases frágiles o por grietas en el revestimiento. Por ello, se compararon las características microestructurales de los recubrimientos de aluminio en suspensión aplicados al grado 91 y el cambio en el rendimiento mecánico. Las conclusiones del ensayo de fluencia revelaron que mientras las muestras recubiertas entraron en la zona de fluencia terciaria antes que las no recubiertas, el agrietamiento del recubrimiento permaneció confinado a la superficie de la muestra. El mapeo de nanoindentación mostró un aumento de dureza en el recubrimiento y dentro de la zona de difusión de aluminio, relacionado con el tiempo de exposición, corroborando el buen comportamiento de esta configuración.

²¹¹ Hahn B., Bendick W., “Pipe Steels for modern high-output power plants. Part 1: Metallurgical principles – Long-term properties – Recommendations for use”, pp.3, Vallourec, 2013.

²¹² Hou X., et al., “Steam oxidation and mechanical performance of a ferritic–martensitic steel with slurry aluminide coating”, Materials and Corrosion pp-1-11, 2020. DOI: 10.1002/maco.202011554.

Asimismo, pruebas recientes efectuadas en este tipo de acero P91 para incrementar en eficiencia desde el punto de vista energético aumentando la temperatura para el funcionamiento del vapor hasta 650 °C han utilizado conceptos de ingeniería novedosos tales como un diseño optimizado para un sistema de doble tubería revestida para su uso en plantas de energía ultra-supercríticas avanzadas ²¹³. El enfoque desarrollado en este estudio utiliza una combinación de un algoritmo de optimización y simulación de elementos finitos basado en la reducción de la tensión del aro en la interfaz capa superior / capa adhesiva generada por las tensiones térmica y mecánica. Esto permite determinar las dimensiones óptimas y las propiedades del material del sistema.

²¹³ Guo X.F., et al., “*Optimisation and thermo-mechanical analysis of a coated steam dual pipe system for use in advanced ultra-supercritical power plant*”, International Journal of Pressure Vessels and Piping 186, 2020.

4.1.2.-Acero ferrítico P92

La composición típica de este tipo de acero se recoge en la siguiente tabla:

C (%)	N (%)
0,07-0,13	0,03-0,07
Mn (%)	Ni (%)
0,30-0,60	0,40 máx.
P (%)	Al (%)
0,020 máx.	0,02 máx.
S (%)	Nb (%)
0,010 máx.	0,04-0,09
Si (%)	W (%)
0,050 máx.	1,50-2,00
Cr (%)	B (%)
<u>8,50-9,50</u>	0,001-0,006
Mo (%)	Ti (%)
0,30-0,60	0,01 máx.
V (%)	Zr (%)
0,15-0,25	0,01 máx.

Tabla 11: Composición química típica acero ferrítico P92.

Fuente: Hahn B. (2013).

El acero ferrítico P92 es uno de los más empleados en la construcción de turbinas y otros componentes de las centrales eléctricas de vapor en condiciones críticas, supercríticas y ultrasupercríticas avanzadas debido a sus excelentes propiedades en atmósferas de oxidación y corrosión a causa del vapor de agua tanto a elevada temperatura como presión.

El uso de este tipo de acero ferrítico con distintos recubrimientos es muy habitual, en particular con recubrimientos a base de aluminio ya que constituyen una alternativa para prevenir o reducir la oxidación. Para ambientes de vapor a 650°C se ha observado la formación de óxidos protectores de alúmina con buenos resultados sobrepasando las 70000 h de exposición: en estas condiciones se forma inicialmente χ -Al₂O₃, y se transforma lentamente en α -Al₂O₃. El contenido en Al y Cr el recubrimiento ha demostrado ser clave para la evolución de la cinética de oxidación²¹⁴.

²¹⁴ Agüero A., Gutiérrez M., Muelas R., Spiradek-Hahn K., “Overview of steam oxidation behaviour of Al protective oxide precursor coatings on P92”, Surface Engineering, pp-1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/02670844.2016.1155691>

También se han utilizado en este tipo de aceros otros recubrimientos a base de aluminuros preparados mediante un proceso combinado de aluminizado a través de pack cementation y recocido posterior, con composiciones de 99% de FeAl²¹⁵. La aluminización en este caso se desarrolló para formar una capa delgada de β -FeAl sobre el acero P92. El comportamiento de oxidación de la capa y del acero P92 se probó en un flujo de vapor puro hasta 500 h a 650°C. El resultado fue que una capa inestable de óxido rico en Fe de más de 100 μm de espesor creció sobre el acero, mientras que sólo una capa de α -Al₂O₃ extremadamente delgada (<0.2 μm) y estable creció en la capa de β -FeAl que finalmente evolucionó a una fase de solución sólida de FeCr Al durante la oxidación.

Lo anterior implica grandes posibilidades de aplicar el recubrimiento de β -FeAl para proteger sistemas de tuberías de calderas y turbinas de centrales supercríticas y ultrasupercríticas contra la oxidación.

²¹⁵ Zhou Y., et al., “Low-temperature formation and steam oxidation of β -FeAl coating on P92 steel”, Corrosion Science, pp-1-11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108227>

4.1.3.-Acero ferrítico VM12

La composición típica de este tipo de acero se recoge en la siguiente tabla:

C (%)	V (%)
0,10-0,14	0,20-0,30
Si (%)	W (%)
0,40-0,60	1,30-1,70
Mn (%)	Nb (%)
0,15-0,45	0,03-0,08
Cr (%)	Co (%)
<u>11,00-12,00</u>	1,40-1,80
Ni (%)	B (%)
0,10-0,40	0,003-0,006
Mo (%)	N (%)
0,20-0,40	0,03-0,07

Tabla 12: Composición química típica acero ferrítico VM12.
Fuente: Vallourec (2013)²¹⁶.

El acero VM12 posee una estructura y propiedades similares a los aceros T / P92 a temperatura ambiente y también a temperaturas elevadas. En entornos industriales presenta un excelente comportamiento frente a la corrosión del vapor a 650°C, casi idéntico al de los aceros austeníticos. Los ensayos de soldadura y plegado a han demostrado que las recomendaciones establecidas para aceros de grado 91 y 92 grados serían similares para el VM12, especialmente para el caso de operaciones de soldadura, frío y flexión por inducción. Las propiedades de fluencia del VM12 son similares en comportamiento a los aceros T / P911 y no son tan altas como se esperaba inicialmente en comparación con aceros T / P92. Sin embargo, los resultados de los ensayos de fluencia establecen claramente una mejora frente a otros aceros con 12% Cr y la resistencia a la oxidación es comparable²¹⁷.

El VM12 ha sido empleado para plantas de energía de vapor ultra-supercríticas avanzadas de carbón. Un factor muy importante para poder mantener una alta resistencia a la fluencia durante la exposición de servicio es su microestructura estable, en particular el endurecimiento de las partículas de alta dispersión, lo cual ralentiza los procesos de recuperación y ablandamiento de la matriz.

²¹⁶ Vallourec, “VM12-SHC Technical-Datasheet”, www.vallourec.com, accedido en marzo 2023.

²¹⁷ Gabrel J., Bendick W., Vandenberghe B., Lefebvre B., “Status of development of VM 12 steel for tubular applications in advanced power plants”, Energy Materials 1:4, pp-218-222, 2007.

Se han realizado caracterizaciones cuantitativas de los precipitados en el acero VM12 después de pruebas de fluencia hasta aproximadamente 30000 h. a 625 ° C usando TEM²¹⁸.

También han sido estudiadas las propiedades del acero VM12-SHC²¹⁹ como material para calderas y generadores de vapor recuperadores de calor en estas centrales. Esto se debe a que ofrece un compromiso entre resistencia a la fluencia, a la fatiga frente a ciclos térmicos, a la corrosión y a la oxidación por vapor , así como fabricabilidad, soldabilidad y coste.

²¹⁸ Zielinska-Lipiec A., Koziel T., Czryska-Filemonowicz A., “VM12 steel for advanced power generation plants – metrology of the precipitates by electron microscopy”, Solid State Phenomena Vol. 186, pp-283-296, 2012.

²¹⁹ Byrne R.G., Jepson M.A.E., Thomson R.C., Shingledecker J.P., Siefert J.A., “The influence of weld thermal cycle simulations on the microstructure of VMH12-SHC steel”, Joint EPRI-123HiMAT International Conference on Advances in High Temperature Materials, pp-253-264, Nagasaki, Japón, 2019

4.1.4.-Acero inoxidable austenítico AISI 347H

La composición típica de este tipo de acero se recoge en la siguiente tabla:

C (%)	Mn (%)
0,04-0,10	2,0 máx.
Cr (%)	P (%)
17,00-19,00	0,045 máx.
Ni (%)	S (%)
9,00-13,00	0,030 máx.
Nb (%)	Si (%)
10C-1,0	0,75 máx.

Tabla 13: Composición química típica acero inoxidable austenítico AISI 347H.
Fuente: <https://www.sandmeyersteel.com/spanish/347-347H.html#ChemicalAnalysis>
(accedido en Julio 2021).

El AISI 347H es un acero inoxidable austenítico que dispone de un elevado contenido en C y Cr, así como un tanto por ciento de Nb que impide que precipiten carburos, previniendo de esta manera la aparición de corrosión intergranular. Este acero posee un comportamiento muy bueno cuando se utiliza en equipos sometidos a ciclos de calentamiento y enfriamiento recurrente a temperaturas que varían entre los 430°C y 880°C.

El acero AISI 347H es estabilizado con Nb y mediante tratamiento térmico se forman carburos de niobio que hacen que se incremente la resistencia a la fluencia debido a la interacción con las dislocaciones generadas por la mencionada fluencia. Porcentajes en C por encima del 0,04% le proporcionan resistencia a la rotura en ambientes de alta temperatura.

Experimentos realizados con recubrimientos de slurry de aluminio sobre acero austenítico TP347HFG han demostrado un buen comportamiento frente a la oxidación a 700°C, ambiente de vapor y condiciones de presión tanto atmosférica como supercrítica por un periodo de 3000 h de exposición²²⁰. Se constató la aparición de una fina película protectora de α -Al₂O₃, muy estable y con un crecimiento lento independiente de la presión del vapor.

²²⁰ Agüero A., Baráibar I., Gutiérrez M., Tuurna S., Toivonen A., Penttilä S., Auerkari P., “*Steam Oxidation of Aluminide-Coated and Uncoated TP347HFG Stainless Steel under Atmospheric and Ultra-Supercritical Steam Conditions at 700 °C*”, *Coatings* 2020, 10, 839, agosto 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10090839>

Este buen comportamiento de los aceros austeníticos con recubrimiento de slurry de aluminio frente a oxidación en vapor de agua pudo observarse también por ejemplo en los tipos IN-800HT y H3RC para condiciones de 1 bar y 650-700°C tras 2000 h de exposición²²¹. De igual forma se han ensayado para utilización en turbinas supercríticas recubrimientos de slurry de Al/Si sobre aceros austeníticos IN-800HT²²² y AISI 347 (este último en ambientes de 800°C durante 300h, observándose formación de Cr₃Si²²³).

Asimismo, se ha analizado el comportamiento frente a la oxidación a largo plazo en vapor ultra supercrítico, así como la morfología y composición resultante en muestras de TP347FG sin el empleo de recubrimiento. La capa de óxido del lado del vapor se investigó con microscopía electrónica de barrido y difracción de rayos X, observándose la formación de un óxido de doble capa durante la oxidación con vapor. La morfología del interior de la capa que contiene Cr se vio influenciada por la temperatura de oxidación. A temperaturas inferiores, aproximadamente del orden de 585°C, estaba formada por regiones de espinela Fe-Ni-Cr rodeadas de óxido de Fe-Cr. A temperaturas más altas, casi toda la capa interna de óxido estaba compuesta de óxido de Fe-Cr. El espesor de la capa interna de óxido no cambió significativamente con el tiempo de oxidación y temperatura para exposiciones inferiores a 30000 h.²²⁴

Otros recubrimientos como Ni-20Cr depositados mediante HVOF en AISI 347H han probado su eficacia en la reducción de la corrosión del acero en ambientes de 900°C, con un espesor del recubrimiento de 120 µm y la formación de óxidos protectores de Ni y Cr²²⁵. También se ha utilizado la técnica de HVOF para depositar recubrimientos de NiCoCrAlY en un ambiente agresivo de sales en incinerador de calor residual a 650°C²²⁶.

²²¹ Pedraza F., et al., “*Behavior of Slurry Aluminized Austenitic Stainless Steels under Steam at 650 and 700 C*”, Oxid Met, Springer Science, 2017. DOI 10.1007/s11085-017-9725-5

²²² Boulesteix C., Pedraza F., Proy M., Lasanta I., de Miguel T., Illana A., & Pérez F. J., “*Steam Oxidation Resistance of Slurry Aluminum and Aluminum/Silicon Coatings on Steel for Ultrasupercritical Steam Turbines*”, Oxidation of Metals, 87(3-4), pp 469–479, 2017. Doi:10.1007/s11085-017-9726-4

²²³ Montero X., Galetz M.C., Schütze M., Oxidation of Metals 80, 635, 2013

²²⁴ Hansson A.N., Montgomery M., “*Steam Oxidation of TP 347H FG in Power Plants*”, Materials Science Forum Vols. 522-523, pp 181-188, 2006. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.522-523.181

²²⁵ Kaushal G., Singh H., & Prakash S., “*High temperature corrosion behaviour of HVOF-sprayed Ni-20Cr coating on boiler steel in molten salt environment at 900*”, International Journal of Surface Science and Engineering, 5(5/6), 415, 2011. Doi:10.1504/ijsurfse.2011.044388

²²⁶ Muthu S.M., Anant R.V., Raghul D., Ishwarya M., Arivazhagan N., & Arivarasu M., “*Comparison of hot corrosion performance of Bare and NiCoCrAlY coated austenitic stainless steel AISI 347 in aggressive waste heat incinerator environment at 650°C*”, Surface Review and Letters, 2019. Doi:10.1142/s0218625x19501683

Debe destacarse también el empleo de este tipo de aceros en los componentes de las calderas de las plantas supercríticas, para lo cual se han ensayado recubrimientos como por ejemplo el 75Ni25Cr depositados mediante Detonation Gun en condiciones de 800°C durante 150 h, observándose un grado sustancial de protección frente a la corrosión²²⁷.

²²⁷ Gada H., Mudgal D., Parvez S., & Ahmad B., “*Investigation of High Temperature Corrosion Resistance of Ni25Cr Coated and Bare 347H SS in Actual Husk Fired Boiler Atmosphere*”, *Engineering Failure Analysis*, 104256, 2019. Doi:10.1016/j.engfailanal.2019.104256

4.1.5.-Acero inoxidable austenítico AISI 321

La composición típica de este tipo de acero se recoge en la siguiente tabla:

C (%)	Mn (%)
0,08 máx.	2,0 máx.
Cr (%)	P (%)
<u>17,00-19,00</u>	0,045 máx.
Ni (%)	S (%)
9,00-12,00	0,030 máx.
Ti (%)	Si (%)
0,700 máx.	1,0 máx.

Tabla 14: Composición química típica acero inoxidable austenítico AISI 321.

Fuente: Szubzda B. (2016)²²⁸.

El AISI 321 es un acero inoxidable austenítico de cromo-níquel-titanio que presenta un excelente comportamiento a temperaturas de hasta 870 °C. Cuenta con una buena solidez y una elevada resistencia a la corrosión al exponerse a altas temperaturas, y del mismo modo conserva su tenacidad y solidez a temperaturas bajo cero. Es un acero estabilizado semejante al tipo 304, pero con una adición de titanio de por lo menos cinco veces el contenido de carbón. Esta adición de titanio disminuye o evita la precipitación de carburos mientras tienen lugar operaciones de soldadura y en temperaturas de operación del orden de 800 a 1500 °F (427 a 816 °C). No se requiere tratamiento térmico después de la soldadura.

Gracias a sus especiales propiedades, el AISI 321 se utiliza frecuentemente para piezas soldadas en la ingeniería de aparatos químicos y la industria alimentaria. Asimismo, es usada en la industria del papel y en la tecnología nuclear. La resistencia frente a la corrosión del AISI 321 es aceptable siempre que se utilice en medios de agua natural con pequeñas concentraciones de sal y cloro y una concentración igualmente baja de ácidos orgánicos y nítricos.

Este acero posee tendencia al endurecimiento por trabajo, así como una baja conductividad térmica, por lo que su mecanizado ha de llevarse a cabo con herramientas fabricadas de metales duros.

²²⁸ Szubzda B., Antonczak A.J., Koziol P.E., Lazarek L., Stepak B, Lecka K., Szmaja A., Ozimek M., "Corrosion resistance of the AISI 304, 316 and 321 stainless steels surfaces modified by laser", IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 113, 012017, febrero 2016.

Se han realizado multitud de pruebas y experimentos con este tipo de aceros; se pueden destacar las llevadas a cabo en relación al efecto de las diferencias de temperatura bajo condiciones de fatiga térmica a alta temperatura, donde se puso de relevancia la importancia del stress multiaxial y se ajustaron modelos matemáticos para la predicción de la vida útil por fatiga²²⁹.

Asimismo, se ha investigado el efecto de recubrimientos de Al₂O₃/Fe-Al aplicados mediante pack aluminizing en sustratos de AISI 321 para la industria de concentración solar de potencia (CSP), observándose mayor integridad de superficie y menor amplitud de stress y fatiga en los sustratos recubiertos con respecto a los que no contaban con dicho recubrimiento²³⁰. El AISI 321 es ampliamente utilizado también como material de encapsulamiento para materiales de cambio de fase (PCM – Phase Change Materials) para el almacenamiento de energía térmica (TES – Thermal Energy Storage) en estos entornos de concentración solar de potencia²³¹.

El comportamiento frente a la oxidación de este tipo de sustratos con superficie nanocrystalizada ha sido evaluado en condiciones de oxígeno + 10% de H₂O a 1000°C²³², apreciándose difusión de Cr y Mn hacia el frente de oxidación lo cual hace que se forme una capa interna de óxido rico en Cr que aumenta la resistencia a la oxidación, así como una capa intermedia uniforme de óxido espinela rica en Mn que detiene el flujo de oxígeno y agua hacia la capa de Cr, reduciendo la vaporización de éste último.

En condiciones de operación ultrasupercríticas y ultrasupercríticas avanzadas se han analizado cambios de estructura y propiedades mecánicas como el creep para aceros austeníticos y uniones soldadas, observándose en todos los casos la generación de fase sigma²³³.

²²⁹ Junek L., Bystriansky J., Vlcek L., Lazarek L., Strnadel B., “*Effect of thermal cycles on the fatigue life of AISI 321 stainless steel*”, Transactions, SMiRT 19, Toronto, agosto 2007.

²³⁰ Li W., et al., “*Low-Cycle Fatigue and Fracture Behavior of Aluminized Stainless Steel AISI 321 for Solar Thermal Power Generation Systems*”, Metals 2020, 10, 1089, 2020. Doi:10.3390/met10081089.

²³¹ Zhang H., Kong W., Tan T., Baeyens J., “*High-efficiency concentrated solar power plants need appropriate materials for high-temperature heat capture, conveying and storage*”, Energy, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.07.129.

²³² Pour-Ali S., Kiani-Rashid A.R., Babakhani A., Norouzi M., Virtanen S., “*New insights into the effects of surface nanocrystallization on the oxidation of 321 austenitic stainless steel in a humid oxygen environment at 1000 °C*”, Corrosion Science Volume 147, pp. 231-245, febrero 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.11.024>.

²³³ Kuboň Z., Stejskalová Š., Kande L., “*Effect of Sigma Phase on Fracture Behavior of Steels and Weld Joints of Components in Power Industry Working at Supercritical Conditions*”, Austenitic Stainless Steels - New Aspects, 2017. Doi: 10.5772/intechopen.71569.

La presencia de fase sigma también fue observada al analizar el comportamiento mecánico y los cambios en la microestructura para dos de los aceros austeníticos más ampliamente utilizados en la fabricación de turbinas en las platas de vapor supercrítico y ultrasupercrítico (AISI 321 y AISI 347), en lo relativo a operaciones de soldadura con y sin presencia de Nb y Ti estabilizado a 700°C²³⁴.

El AISI 321 también ha sido utilizado como sustrato para probar tanto la resistencia a la corrosión como la tasa de erosión en recubrimientos de base NiCr aplicados mediante HVOF en distintos ambientes^{235 236}.

²³⁴ Guan K., Xu X., Xu H., Wang Z., “Effect of aging at 700 °C on precipitation and toughness of AISI 321 and AISI 347 austenitic stainless steel welds”, Nuclear Engineering and Design 235, pp. 2485–2494, 2005

²³⁵ Muthu S.M., et al., “Improvement in hot corrosion resistance of dissimilar alloy 825 and AISI 321 CO₂ laser weldment by HVOF coating in aggressive salt environment at 900°C”, International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 27, pp. 1536–1550, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2014-3>.

²³⁶ Zhang A. F., et al., “Effects of Erosion Rate on the Erosion-Corrosion Synergism of High Velocity Oxy-Fuel Sprayed Ni-Based Coatings”, Key Engineering Materials, vol. 373–374, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 585–588, marzo 2008. Doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.

4.2.- Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los sustratos considerados

La utilización de aceros en las plantas de generación de energía eléctrica y la exposición de dichos aceros a medios de gran agresividad en condiciones de altas presiones y temperaturas provoca que se degraden y aparezcan una serie de productos, sólidos o vapores, principalmente formados por los diferentes elementos de aleación que forman los aceros, en forma de nitruros, sulfuros, óxidos, etc... Asimismo, además de los elementos añadidos a un acero para mejorar sus propiedades, deben tenerse en cuenta las emisiones y efluentes generados por la producción del acero base y los generados por la energía usada en a la hora de fabricarlo.

Existen estudios sobre los análisis de ciclo de vida en aceros, como por ejemplo el llevado a cabo por el International Stainless Steel Forum y la Universidad de Yale²³⁷, en el que se describen las fases principales de la vida útil de este material:

- *Fase de Fabricación*: abarca la totalidad del acero inoxidable producido para productos largos y planos acabados, partiendo de las materias primas, con vistas a la manufactura.
- *Fase de Fabricación y Manufactura*: en esta fase el acero inoxidable terminado se aprovecha en distintos mercados para generar los productos finales.
- *Fase de Uso*: en la presente fase tiene lugar la utilización de los productos finales por el usuario. El acero inoxidable se mantiene a lo largo de la vida útil de un producto determinado.
- *Fase de Reciclado y Recolección*: al término de la vida útil del acero, los productos se reciclan o desechan en rellenos sanitarios.

A la hora de realizar el análisis de ciclo de vida de aceros inoxidables ha de tenerse en cuenta la capacidad de reciclaje de los mismos: hasta un reciclaje del 100% es factible. En la actualidad hasta un 70% de los aceros inoxidables se reciclan cuando finalizan su vida útil, haciendo que la producción de acero por esta vía sea ventajosa desde el punto de vista económico. Es por ello por lo que la chatarra posee un elevado valor intrínseco en este tipo de industria. Sin embargo, la durabilidad del acero inoxidable hace que disminuya la cantidad de chatarra disponible.

²³⁷ Yale University/ISSF Stainless Steel Project “Acero inoxidable y CO₂: Hechos y observaciones científicas”, pp. 3, 2009.

Las ventajas de la producción de acero inoxidable partiendo de materias primas que han sido recicladas son obvias, puesto que el consumo energético asociado al proceso será inferior y se evitarán emisiones hacia la atmósfera debido a la disposición de residuos en la fabricación. Es decir, la elevada reciclabilidad y vida útil hace que el consumo de recursos naturales y energéticos para la fabricación de aceros sea menor en comparación con otros productos producidos a partir de materiales de mayor desgaste y tasa de sustitución.



Figura 29: El ciclo de vida del acero.
Fuente: AINEnergía (Asociación de Ingenieros de la Energía)

Los aceros ferríticos y austeníticos que han sido escogidos para la presente tesis son los más utilizados en las turbinas de las centrales de producción de energía eléctrica en condiciones supercríticas y ultrasupercríticas. Dichos aceros ferríticos y austeníticos cuentan con distintos elementos de aleación en distintas proporciones, debiendo dichos componentes ser considerados en el momento de la realización de un análisis de ciclo de vida de los aceros.

En función de lo anterior se comentarán brevemente los efectos generados por los principales componentes de los mencionados aceros:

C: confiere resistencia y dureza. Se trata de un elemento que forma carburos a temperaturas elevadas. En casos relativos a aceros inoxidables con composición elevada en Cr y Ni, lo que interesa es disminuir su concentración. Estabiliza la austenita después de la deformación en frío y provoca la sensibilidad a la corrosión intergranular.

Si: confiere elevado poder desoxidante y complementa al Mn en prevenir la formación de rechupes y poros. Aumenta la resistencia de los aceros bajos en carbono y eleva de forma sensible el límite elástico, así como a la resistencia a la fatiga de los aceros, pero sin disminuir la tenacidad. Favorece la formación de la ferrita. Es empleado fundamentalmente para aleaciones resistentes al calor y refractarias para conseguir un aumento de la resistencia a la oxidación en caliente ²³⁸.

Mn: actúa como desoxidante evitando el desprendimiento de gases y la formación de rechupes y poros. También interviene en la desulfuración del acero formando MnS. Con porcentajes superiores al 10% aumenta la cantidad de austenita. Favorece el trabajo en caliente, contribuye a evitar la fragilidad de las uniones soldadas y también a aumentar la solubilidad del nitrógeno. Se estima que su influencia en los aceros con cromo es la mitad del níquel.

Cr: se trata del elemento de aleación que confiere al acero sus propiedades antioxidantes. Gracias al Cr, el acero se pasiva con una película de Cr_2O_3 que actúa como recubrimiento de la capa externa, funcionando de esta manera como agente protector frente a algunos elementos externos agresivos. A contenido más elevado en Cr, la protección frente a determinados tipos de corrosión es mayor.

Mo: aumenta la resistencia mecánica en caliente de los aceros austeníticos, así como a la resistencia a la corrosión en todos los medios, salvo en soluciones sulfúricas hirvientes.

W: mejora las características mecánicas en frío y en caliente, si bien ejerce poca influencia sobre la corrosión. Aumenta la resistencia a la fluencia en los aceros refractarios. Puede formar carburos.

V: en aceros martensíticos con contenido en Cr superior al 12% estabiliza los carburos precipitados durante el endurecimiento secundario. Puede emplearse para controlar el tamaño del grano y mejorar la templabilidad. También es agente formador de carburos.

Nb: al tener una gran avidez por el C, forma carburos de Nb que evitan la formación de carburos de Cr y por tanto la corrosión intergranular.

²³⁸ Cortés Díaz J.M., “*Aceros inoxidables y refractarios*”, Departamento Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Universidad de Sevilla, pp. 40, Sevilla, mayo 1991.

N: produce efectos análogos al C. Estabiliza la austenita y es utilizado en aceros austeníticos por razones económicas para sustituir al Ni²³⁹. Aumenta los valores del límite elástico y de la carga de rotura sin provocar sensibilidad a la corrosión intergranular hasta un límite del 0,2%. Facilita la deformación en frío y en caliente de los aceros ferríticos y austeníticos. Asimismo, reduce ligeramente la tendencia a la corrosión por picaduras en todo tipo de aceros.

Ti: al igual que el Nb, forma carburos de Ti que previenen la corrosión intergranular al evitar la formación de carburos de Cr. En algunos aceros austeníticos provoca precipitados que aumentan la resistencia en caliente. También mejora la soldabilidad de aceros ferríticos de bajo contenido en Cr y puede utilizarse para controlar el tamaño de grano en los aceros.

P: se puede considerar con un elemento perjudicial, ya que disminuye la resistencia a la corrosión y dificulta la ejecución de la soldadura. Es empleado para mejorar la maquinabilidad.

S: tiene las mismas características que el P, ya que fragiliza al acero. Del mismo modo, se utilizar para mejorar la maquinabilidad.

Co: apenas tiene influencia apreciable sobre la estructura de los aceros inoxidable; tiene aplicación en algunos aceros endurecibles por precipitación al favorecer la maduración.

Si: favorece la formación de la ferrita y de estructuras bifásicas. Se emplea principalmente en aleaciones resistentes al calor o refractarias para aumentar la resistencia a la oxidación en caliente. Sin embargo, tiende a provocar fragilidad en las soldaduras.

W: mejora las características mecánicas en frío y en caliente, ejerciendo poca influencia sobre la corrosión. Por otro lado, aumenta la resistencia a la fluencia en los aceros refractarios.

V: en aceros martensíticos con contenido en Cr superior al 12%, estabiliza los carburos precipitados durante el endurecimiento secundario. Puede emplearse para controlar el tamaño de grano, al igual que Ti y Nb, y para aumentar la templabilidad.

²³⁹ Colombier R., Colombier L., “*Aceros inoxidables, aceros refractarios*”, Urmo, pp. 41, 1968.

B: en pequeñas cantidades aumenta la forjabilidad, provocando fragilidad en las soldaduras. Mejora la resistencia a la tracción y a la fluencia en aceros refractarios, pero disminuye su resistencia a la corrosión. Como resultado de la formación de boruros de Cr y Fe, el acero pierde inoxidableidad, con lo que hay que aumentar el porcentaje de cromo. Disminuye la resiliencia y tiene aplicación en aleaciones utilizadas en la industria nuclear. El B se disuelve menos del 0,15% en ferrita, sin endurecerla; en la austenita se disuelve el 0,1%, pero su solubilidad incrementa con el contenido de C. El B se suele añadir para mejorar la templabilidad siendo el contenido habitual entre 0,0005 y 0,0013%²⁴⁰.

Al: su efecto es similar al del Si en los aceros refractarios. Mejora la resistencia a la corrosión en ambientes salinos.

Zr: es un enérgico desoxidante. Es utilizado en pequeñas cantidades como agente de aleación debido a su fuerte resistencia a la corrosión. Asimismo, es usado con frecuencia como revestimiento para combustibles de reactores nucleares.

Ni: como ya se ha visto, este elemento es de vital importancia. Al adicionar Cr a los aceros disminuye la tenacidad de los mismos; el níquel compensa esta disminución. Asimismo, el Cr induce el ferromagnetismo en el acero, que es una característica no deseada en determinadas aplicaciones; el níquel contribuye a contrarrestar dicho problema. Por otro lado, la mayoría de los recursos primarios de Ni existentes son usados con el fin de producir acero inoxidable. Si bien el Cr es el elemento esencial que confiere al acero sus propiedades inoxidables, el Ni aporta resistencia frente a la corrosión y tiene la capacidad de soportar temperaturas extremas, así como mejorar la resistencia a la tracción.

Una vez expuestas las propiedades de los diferentes elementos que componen los aceros designados, así como las proporciones en que se encuentran en cada uno de ellos, se realizará el estudio y análisis de ciclo de vida de estos. También se procederá a la realización del estudio y análisis de los aceros (sustratos) con los recubrimientos empleados. Una vez efectuado lo anterior, se estará en disposición de realizar el ACV comparativo de las distintas configuraciones, teniendo en cuenta la influencia del proceso de deposición y realizando el análisis económico correspondiente.

²⁴⁰ Valencia Giraldo A., Aristizábal Sierra R., “*Ciencia de los metales*”, Universidad de Antioquía, pp. 20-50, 2020.

El análisis se efectuará utilizando la herramienta computacional SimaPro 9.0, donde se tomará como unidad funcional 1 kilogramo de cada uno de los aceros.

La metodología utilizada en la presente tesis es el **ReCiPe**. Esta metodología es la sucesora de los métodos Eco indicador 99 y CML. Su objetivo es juntar los enfoques orientados en el problema y en el daño. El enfoque centrado en el problema, de la metodología CML, utiliza categorías de impacto que cogen el punto medio (midpoint), logrando resultados con incertidumbres reducidas; por otro lado, presenta un número elevado de categorías de impacto, por lo que los resultados que se obtienen son de difícil valoración. El enfoque orientado a daños, de la metodología Ecoindicador 99, ofrece valores únicamente en 3 categorías de impacto del punto final (endpoint), con lo que se facilita la interpretación de los resultados. ReCiPe, por tanto, aglutina ambos casos y admite tanto el punto medio orientado al problema como el punto final orientado al daño.

Los factores de caracterización que corresponden al punto medio son multiplicados por los factores de daño para obtener las cifras que detallan la caracterización del punto final.

En base a lo expuesto previamente, la presente metodología ofrece 2 clases de categorías de impacto, así como sus factores de caracterización asociados. Para el punto medio existen 18 categorías de impacto, comentadas previamente, y a para el punto final 3 categorías de impacto que son normalizadas y ponderadas en una única cuenta.

A la hora de elegir valores, se debe tener en cuenta que los mecanismos ambientales y los modelos de daño generan incertidumbre y este es el motivo de la agrupación de los distintos orígenes de incertidumbre en virtud el teorema conocido como “Teoría Cultural”, que fue explicada por Thomson durante 1990²⁴¹. En dicha teoría se observan las perspectivas “Individualista (I), Jerárquica (H) e Igualitaria (E)” las cuales no son representativas de modelos de comportamiento humano, si bien están basadas en lo expuesto a continuación:

- Individualista (I): basada en un interés a corto plazo; se trata de una visión de optimismo tecnológico referida a la capacidad de adaptación humana.

²⁴¹ Thompson M., Ellis R. and Wildavsky A., “*Cultural Theor*”, Westview Press, Boulder, Co, 1990.

- Jerárquica (H): se orienta a principios de índole político en lo que se refiere a plazos y otras cuestiones.
- Igualitaria (E): es la perspectiva más equilibrada que considera plazos con mayor duración y clases de impacto no enteramente fijadas y sin indicación al respecto.

Las ecuaciones que corresponden a las categorías de impacto se han obtenido revisando los datos disponibles en Guinée J.B. (2001)²⁴².

En lo que respecta a las categorías de impacto y factores de caracterización de esta metodología para el punto medio (midpoint), puede comentarse lo siguiente:

- *Agotamiento de la Capa de Ozono (Ozone Depletion)*: representa la destrucción de la capa de ozono estratosférica debido a las emisiones antropogénicas de las distintas sustancias que la originan (ODS) y que agotan la capa de ozono. El factor de caracterización se expresa en año/kg_{eq} de CFC-11.
- *Toxicidad Humana (Human Toxicity) y Ecotoxicidad Terrestre, Marina y Agua Dulce (Terrestrial, Marine and Freshwater Ecotoxicity)*: da una medida de la persistencia ambiental (destino) y la acumulación en la cadena alimentaria humana (exposición) así como la toxicidad (efecto) de una sustancia química. El factor de caracterización se expresa en año/kg_{equ.1,4 diclorobenceno (1,4- DCB)}
- *Radiación ionizante (Ionising Radiation)*: el factor de caracterización cuantifica el grado de exposición a dicha radiación y se expresa en año/kBq_{equ.uranio235}.
- *Formación de Oxidantes Fotoquímicos (Photochemical Oxidant Formation)*: el factor de caracterización que da una medida de la formación de oxidantes fotoquímicos. Debe recordarse que el ozono antropogénico es producido mediante reacciones en la atmósfera entre radicales OH, óxidos de nitrógeno NO_x y otros compuestos orgánicos volátiles distintos del metano NMVOC. El oxidante fotoquímico más importante es el ozono troposférico O₃ originado al emitirse NO_x y NMVOC a lo durante todo el ciclo de vida de un sistema. El factor de caracterización se expresa en año/kg_{eq} NMVOC.
- *Formación de partículas (Particle Formation)*: refleja la fracción de ingesta de partículas de tamaño PM₁₀ y el factor de caracterización es expresado en unidades de año/kg_{equ.PM10}.

²⁴² Guinée J. B., “LCA—an operational guide to the ISO-standards, part 3 scientific background”, Institute of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, NL, 2001.

- *Cambio Climático (Climate Change)*: refleja el potencial de calentamiento global (global warming) y el factor de caracterización es expresado en año/kg_{equ}.CO₂.
- *Uso del Terreno Urbano y Agrícola (Urban and Agricultural Land Occupation)*: refleja la cantidad de tierra transformada y ocupada durante un tiempo determinado. Las unidades en que se expresa son m²/año.
- *Transformación de Terreno Natural (Natural Land Transformation)*: expresa la cantidad de terreno natural ocupado y transformado a lo largo de un periodo especificado. Se expresa en m²/año.
- *Eutrofización Marina (Marine Eutrophication)*: da una explicación acerca de la persistencia ambiental en la emisión de N por los nutrientes que lo contienen y el factor de caracterización es expresado en año/kg_{equ}.N₂ de agua dulce.
- *Eutrofización de Agua Dulce (Freshwater Eutrophication)*: el factor de caracterización da una explicación acerca de la persistencia ambiental en la emisión de P por los nutrientes que lo contienen y es expresada en año/kg_{equ}.P de agua dulce.
- *Agotamiento de Combustibles Fósiles (Fossil Fuel Depletion)*: indica la cantidad de combustible fósil extraído. El factor de caracterización es el potencial de combustibles fósiles, cuya unidad es kg_{equ}. de petróleo (1 kg_{equ}. de petróleo dispone de un poder calorífico menor a 42 MJ).
- *Agotamiento de Recursos Minerales (Metal Depletion)*: es referido a la medida en que disminuye el grado de determinado mineral. El factor de caracterización es el potencial excedente de mineral y se indica en kg_{equ}. de Fe.
- *Agotamiento de Agua Dulce (Water Depletion)*: el factor de caracterización es la cantidad de consumo de agua dulce y se expresa en m³.
- *Acidificación Terrestre (Terrestrial Acidification)*: el factor de caracterización es el potencial de acidificación. Se expresa en año/kg_{equ}.SO₂.

En lo que respecta a categorías de impacto para análisis de daños que se basan en el punto final (endpoint) se comenta lo siguiente:

- *Salud Humana*: se indica como el número de años de vida perdidos/vividos con discapacidad combinados como años de vida ajustados por discapacidad (DALYs – Disability Adjusted Life Years por sus siglas en inglés). Es expresada en años.
- *Eco diversidad*: refleja la disminución de especies en una superficie definida y durante un período de tiempo concreto. Es expresada en especies·año (species·yr).

- *Disponibilidad de los recursos*: se muestra como los costes de excedentes de producción futura, en un periodo temporal concreto. Se expresa en \$ (dólares).

La normalización consiste en la conversión de los resultados obtenidos en la caracterización a unidades globales neutras, dividiendo cada uno por un factor de normalización. Mediante dichos factores se muestra el nivel en el que contribuye cada categoría de impacto a la problemática medioambiental local. La metodología ReCiPe emplea un sistema de normalización hace un recálculo de los impactos por ciudadano a nivel europeo o a nivel mundial.

En la ponderación, los resultados son multiplicados por una serie de factores de ponderación que muestran la importancia relativa de cada categoría. De igual forma, es posible agregar las categorías en un solo indicador de impacto global. Los factores de ponderación están basados en juicios de expertos, opiniones políticas y culturales, o análisis económicos. En ReCiPe se selecciona por defecto la versión *jerárquica*, que dispone de aceptación desde el punto de vista científico y político.

Como ya se ha comentado con anterioridad, los materiales escogidos para la realización de la presente tesis son comúnmente utilizados para la construcción de las turbinas empleadas en las plantas de producción de energía eléctrica en condiciones supercríticas. Por tanto, dichos materiales son sometidos a altas temperaturas de trabajo y ciclos, situación que provoca un deterioro debido a los procesos de corrosión a alta temperatura a través la formación de diferentes compuestos. Los aceros ferríticos P91, P92 y VM12, así como los aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321 han sido seleccionados debido a sus excelentes propiedades mecánicas, así como su resistencia frente a atmósferas corrosivas a alta temperatura. Mediante el proceso de ACV con el programa informático SimaPro 9.0 se realizará un análisis de ciclo de vida de dichos sustratos; también se llevará a cabo un análisis de ciclo de vida de los sustratos con los recubrimientos empleados, de cara a ejecutar posteriormente la comparativa de sustratos ferríticos y austeníticos con y sin recubrimiento, de sustratos frente a sustratos con recubrimiento, así como de sustratos frente al proceso de recubrimiento de cara a comprobar qué configuración ofrece un menor impacto medioambiental considerando los distintos indicadores de impacto del método ReCiPe. También se analizará el coste económico asociado a cada uno de los sustratos.

Las composiciones de los sustratos pueden consultarse en las Tablas 10 a 14 con los correspondientes tantos por ciento de cada elemento aleante. Debe tenerse en cuenta que se ha tomado el valor medio de aquellos componentes de los aceros en los que existe un intervalo de composiciones; asimismo, en los componentes en los que se da un valor máximo, se ha tomado dicho valor máximo. El Fe se calcula por balance.

El análisis de los sustratos seleccionados con SimaPro 9.0 ha sido ejecutado a través de la introducción de las entradas para cada uno de dichos materiales con el fin de llevar a cabo los análisis comparativos para visualizar los impactos medioambientales.

La unidad funcional elegida es 1kg. de material de cada uno de los sustratos, generándose distintos gráficos y datos que establecerán el impacto a través de diversos medios analíticos como la ponderación, evaluación del daño y contribución de los procesos involucrados.

Para comprobar la influencia sobre el medio ambiente se ha realizado un estudio comparativo mediante el método ReCiPe 2016 Endpoint y perspectiva cultural E (Igualitaria), utilizando datos a nivel mundial. La presente metodología hace posible un sencillo agrupamiento de las categorías de impacto en puntos intermedios y finales. Se obtendrán datos y gráficos correspondientes a los análisis de impacto mediante caracterización, evaluación del daño, puntuación única y puntuación única por categoría de impacto, así como a la contribución de proceso. La base de datos utilizada será la Ecoinvent 3.

Como ya se ha comentado, para cada categoría tenida en cuenta, los datos que se consiguen muestran distintas unidades como son los DALY en el caso de datos relacionadas con la salud humana, especies·yr (especies·año) respecto a la calidad del ecosistema y \$ (dólares) en el caso de los recursos.

Todos los análisis y contribuciones con puntuaciones únicas aparecen reflejadas en Pt (puntos) y Mpt (milipuntos). Se trata de una puntuación que hace referencia a la globalidad de todo el impacto asociado a los aspectos ambientales en un único valor agregado. Se obtiene mediante el cálculo en los distintos pasos comentados, con normalización y ponderación de las categorías de impacto con el fin de alcanzar un solo valor a la finalización.

4.2.1.- Análisis de Ciclo de Vida acero ferrítico P91

El Análisis de Ciclo de Vida para el acero ferrítico P91 se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad, partiendo de los valores de inventario existentes en la tabla 10 sobre la composición de elementos de dicho acero y tomando como unidad funcional 1 kg. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en el sustrato de estudio. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Como ya se ha comentado, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent y partiendo de la caracterización se alcanzan para cada categoría de impacto las proporciones que corresponden a cada una de las mismas. Dichos datos están plasmados en la Figura 30 que se muestra seguidamente.

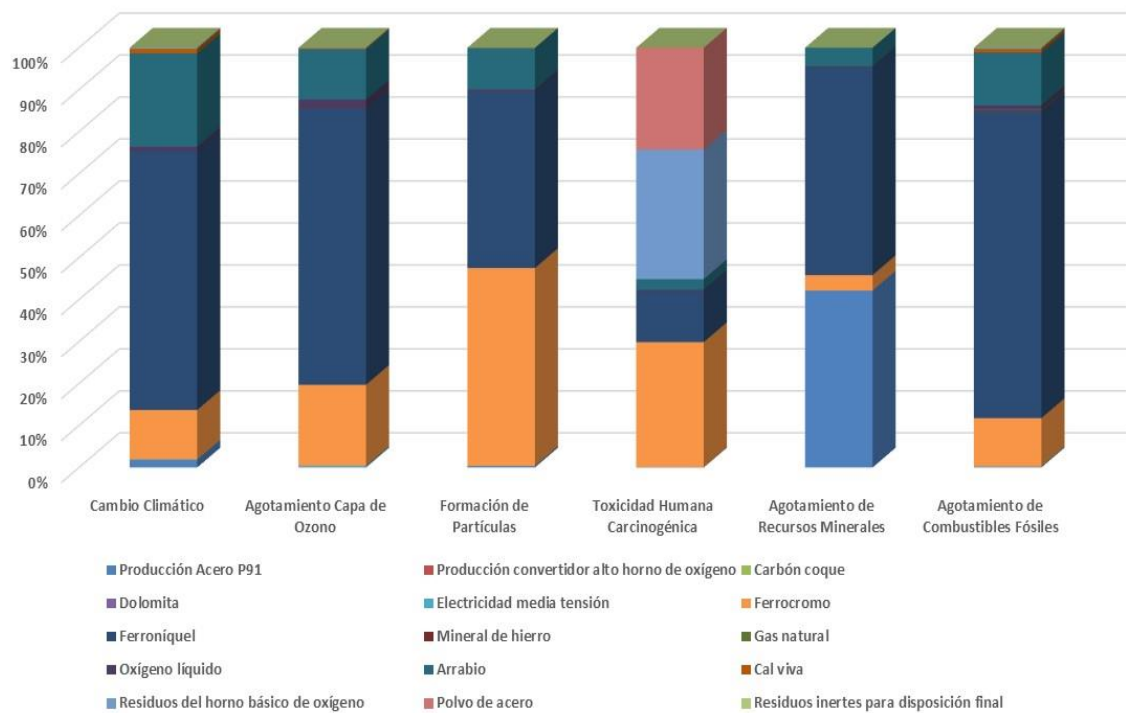


Figura 30: Análisis de impacto P91. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la mencionada figura aparecen reflejadas las categorías de impacto estudiadas correspondientes a cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, formación de partículas, toxicidad humana (carcinogénica), agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. El resto de las categorías no se consideran al tratarse de categorías con valores muy reducidos.

Los resultados ponen de manifiesto la importancia que las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo empleadas en la fabricación del acero tienen en todas las categorías de impacto señaladas. En concreto, la aleación de ferróníquel afecta en mayor medida a las categorías de cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles; mientras que la aleación de ferrocromo afecta sobre todo a la categoría de formación de partículas y toxicidad humana (carcinogénica).

En la Figura 31 mostrada a continuación, correspondiente a la evaluación del daño, se constata lo mencionado en el párrafo anterior al apreciarse que las tres áreas de daño (salud humana, ecosistemas y recursos) están afectadas en mayor medida por las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, siendo el peso de la primera mayor. Dicha aleación de ferróníquel produciría un mayor daño a los ecosistemas; por otro lado, la aleación de ferrocromo tendría su mayor porcentaje de daño referido a la salud humana.

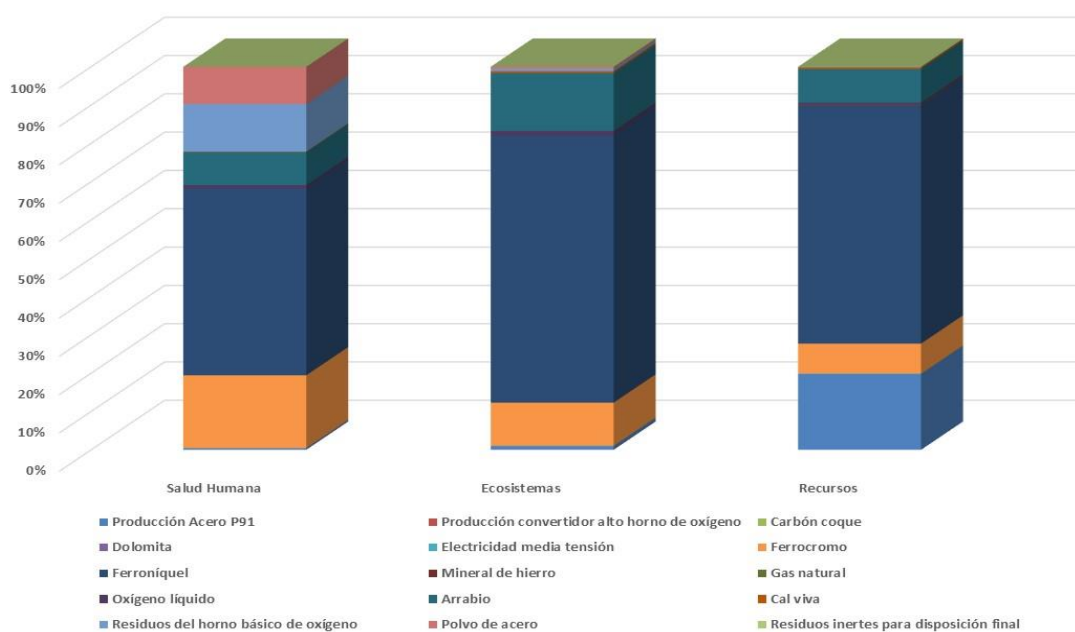


Figura 31: Análisis de impacto P91. Evaluación de daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Seguidamente, en la figura 32, se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto medio. Se observa la predominancia en la afectación a las categorías de impacto de las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, seguidas por los residuos del convertidor básico de oxígeno, el polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico y el arrabio.

Todos los procesos anteriores afectan a la toxicidad humana carcinogénica, que recibe una importante aportación del ferrocromo (del orden de casi 0,20 Pt). El ferroníquel afecta en mayor medida al cambio climático (0,11 Pt) y a la toxicidad humana carcinogénica (del orden de casi 0,08 Pt). Otra categoría de impacto que se ve afectada en menor proporción es la formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

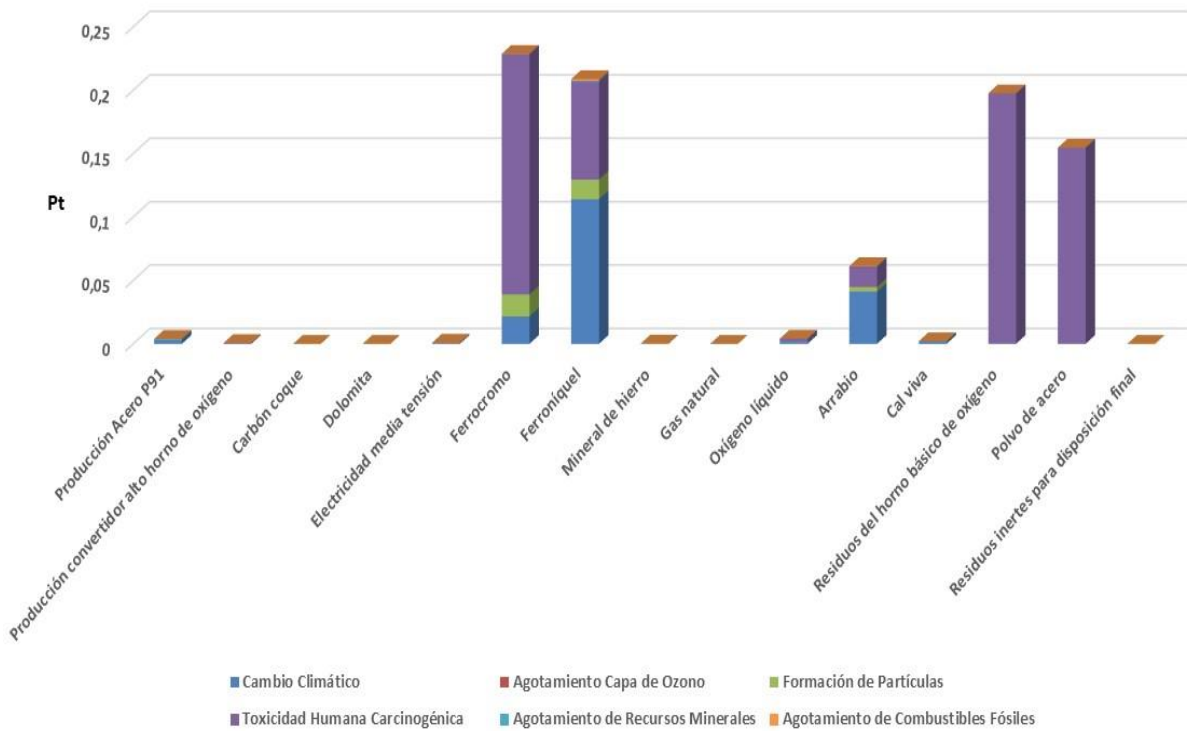


Figura 32: Análisis de impacto P91. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la siguiente figura 33 se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto final. En lo que se refiere a áreas de daño, la salud humana es el área con mayor grado de afectación por todos los materiales descritos, principalmente por el ferroníquel (del orden de unos 0,78 Pt). El área de ecosistemas es afectada en mucha menor medida, principalmente por ferroníquel (del orden de 0,10 Pt), ferrocromo y arrabio (con valores del orden de 0,02 Pt). El área de recursos, sin embargo, tiene una importancia relativa muy pequeña en comparación con las otras dos áreas, apareciendo con una leve afectación por parte del ferroníquel, pero de mucho menor valor que para las otras áreas de daño.

MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO

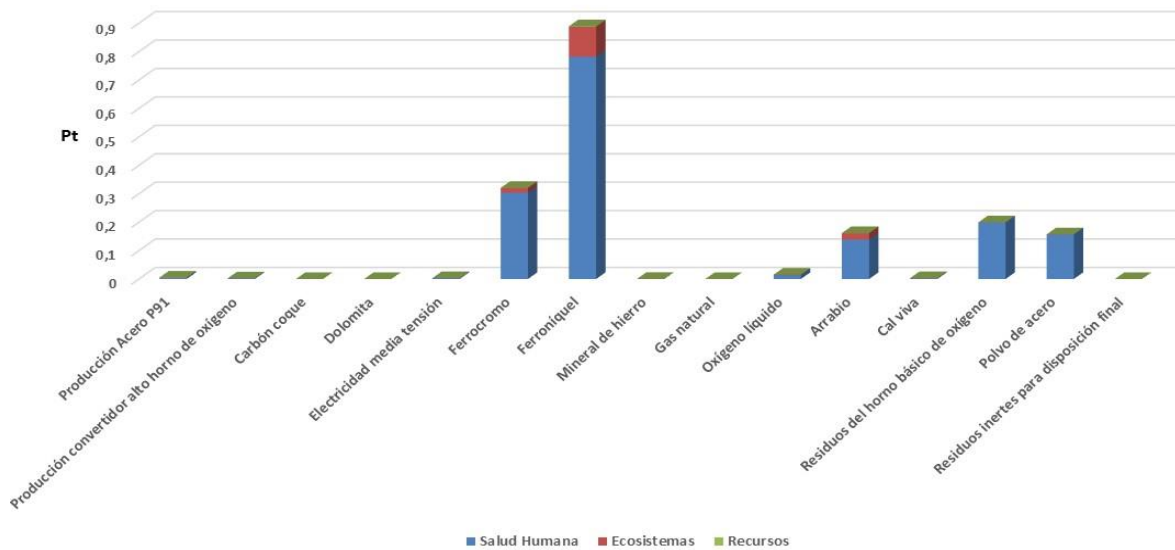


Figura 33: Análisis de impacto P91. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En cuanto a la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P91, véase abajo la figura 34 que muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución de los procesos más importantes en orden descendente de importancia partiendo de 0,3 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferrónquel.

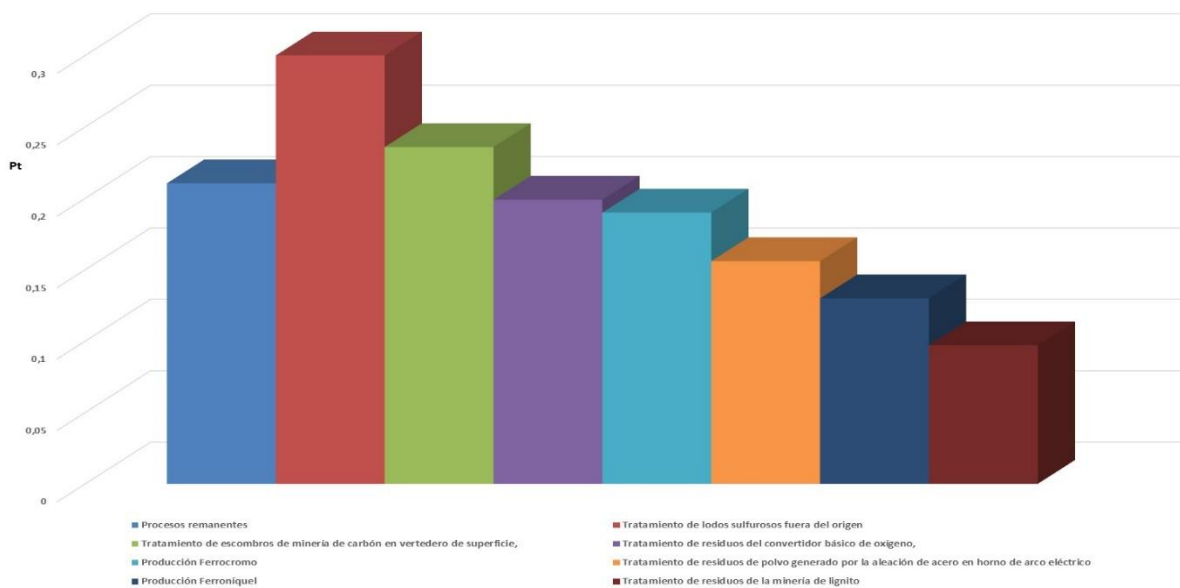


Figura 34: Contribución proceso P91. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución para la salud humana correspondiente a la figura 35 se presenta un diagrama de red para evaluación del daño (salud humana en daly), con un valor de corte del 8,5%. Este valor de corte nos a permitir observar, de manera porcentual, las mayores contribuciones de los elementos presentes en el acero de una forma representativa, así como los procesos correspondientes. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Cabe reseñar que se presentan en todos los casos los árboles de contribución para salud humana por ser los correspondientes a las categorías de impacto y áreas de daño más relevantes de entre todas las estudiadas.



Figura 35: Red P91. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Como puede apreciarse (detalle en figura 36), el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 48,8% (influencia en el mercado) y 48,6% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 18,9% tanto en influencia en el mercado como en producción. Como tercer elemento figura el arrabio, por su influencia en el mercado (8,87%) y producción (8,59%).

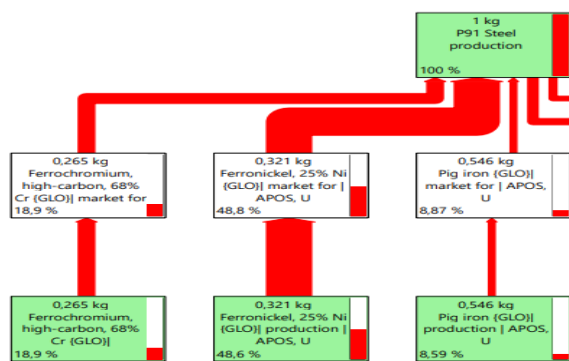


Figura 36: Detalle Red P91 para contribución a 1 kg P91. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Asimismo, la producción de ferroníquel, que es la que genera un mayor impacto, está influenciada por la producción eléctrica de alto voltaje (mercado) en un 9,93%, el calentamiento industrial que proviene del carbón en un 15,2% y la infraestructura minera para extracción del níquel-cobre a partir del mineral sulfuroso en un 13,5%. Véase la figura 37 con el detalle del diagrama de red correspondiente a esta parte.

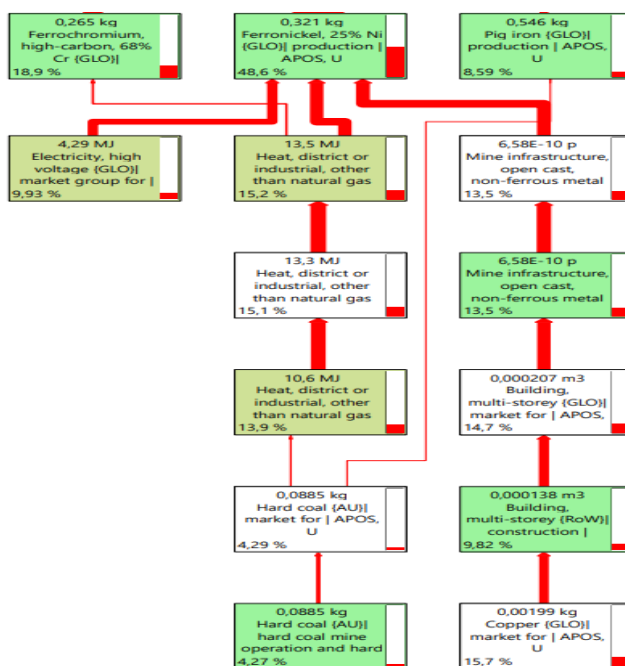


Figura 37: Detalle Red P91 para contribución a ferroníquel. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Como puede observarse en dicha figura 37, el calentamiento industrial proviene del proceso base de la extracción de carbón en la mina (contribución del 4,27%), pasando por distintos pasos que incluye su influencia en el mercado (contribución del 4,29%) hasta llegar a la producción de ferroníquel. De la influencia en el mercado también sale un trazo que establece relación con la producción de arrabio. Asimismo, dicho calentamiento industrial influencia también la producción de ferrocromo.

Por otro lado, la infraestructura minera proviene del proceso base de extracción del níquel-cobre a partir del mineral sulfuroso (contribución del 0,103%), pasando por distintos pasos que incluye la influencia en el mercado del cobre y los procesos de construcción de la infraestructura minera hasta llegar a la producción de ferroníquel.

En lo que se refiere a la influencia de la generación y tratamiento de residuos, puede mencionarse el tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, con una contribución del 17,1%, partiendo de la extracción del níquel-cobre a partir del mineral sulfuroso. También se encuentra el tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, con una contribución del 13,6%, partiendo de la extracción de carbón en la mina. Véase figura 38.

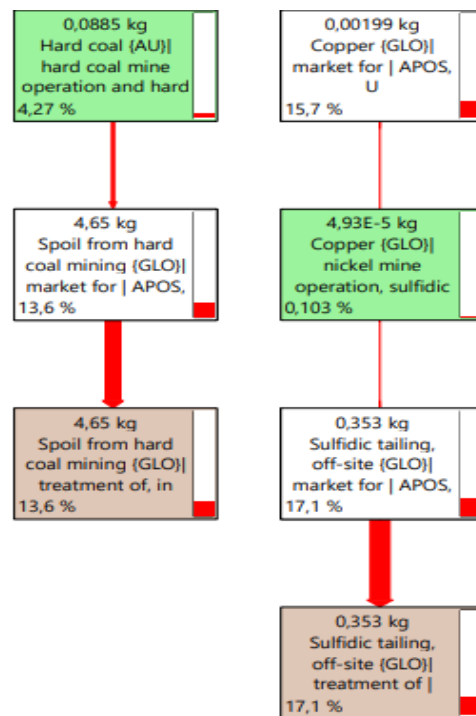


Figura 38: Detalle Red P91 para residuos de ferroníquel. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

La producción de 1 kg de acero ferrítico también produce impactos asociados a la generación y tratamiento de residuos, como puede observarse en la figura 39. Se aprecia que el tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno contribuye en un 12,5%, mientras que el tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico lo hace en un 9,69%.

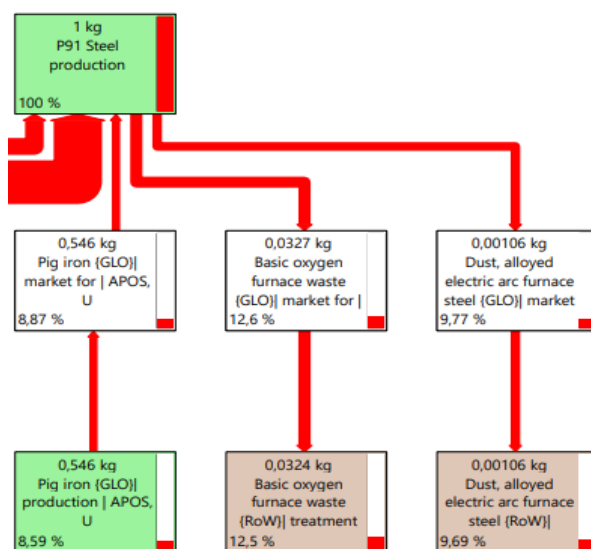


Figura 39: Detalle Red P91 para residuos de 1 kg P91. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A la vista de los resultados obtenidos, puede concluirse que para el acero ferrítico P91 son los procesos de producción de ferróniquel, ferrocromo y arrabio mediante operaciones de combustión que implican consumo eléctrico y partiendo de la materia prima extraída en la mina (materiales no ferrosos, cobre y carbón) los que generan un mayor impacto medioambiental en las distintas categorías de impacto y áreas finales de daño analizadas. Destaca el peso del ferrocromo tanto en el área de daño de la salud humana como en la categoría de impacto de formación de partículas y de toxicidad humana carcinogénica, debido a la presencia del cromo. De igual forma, es reseñable la aportación del ferróniquel al área de daño de ecosistemas y a la categoría de impacto de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono, fundamentalmente derivado de los procesos de extracción y combustión de carbón empleados. El ferróniquel también contribuye con gran peso a las categorías de agotamiento de recursos minerales y combustibles fósiles, y por consiguiente al área de daño de recursos.

El tratamiento de los residuos generados en la extracción y procesamiento de las materias primas empleadas en la producción de acero ferrítico P91 también genera una contribución a ser tenida en cuenta a la hora de hacer el análisis global de los resultados.

4.2.2.- Análisis de Ciclo de Vida acero ferrítico P92

El Análisis de Ciclo de Vida para el acero ferrítico P92 se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad, partiendo de los valores de inventario existentes en la tabla 11 sobre la composición de elementos de dicho acero y tomando como unidad funcional 1 kg. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en el sustrato de estudio. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Como ya se ha comentado, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent y partiendo de la caracterización se alcanzan para cada categoría de impacto las proporciones que corresponden a cada una de las mismas. Dichos datos están plasmados en la Figura 40 que se muestra seguidamente.

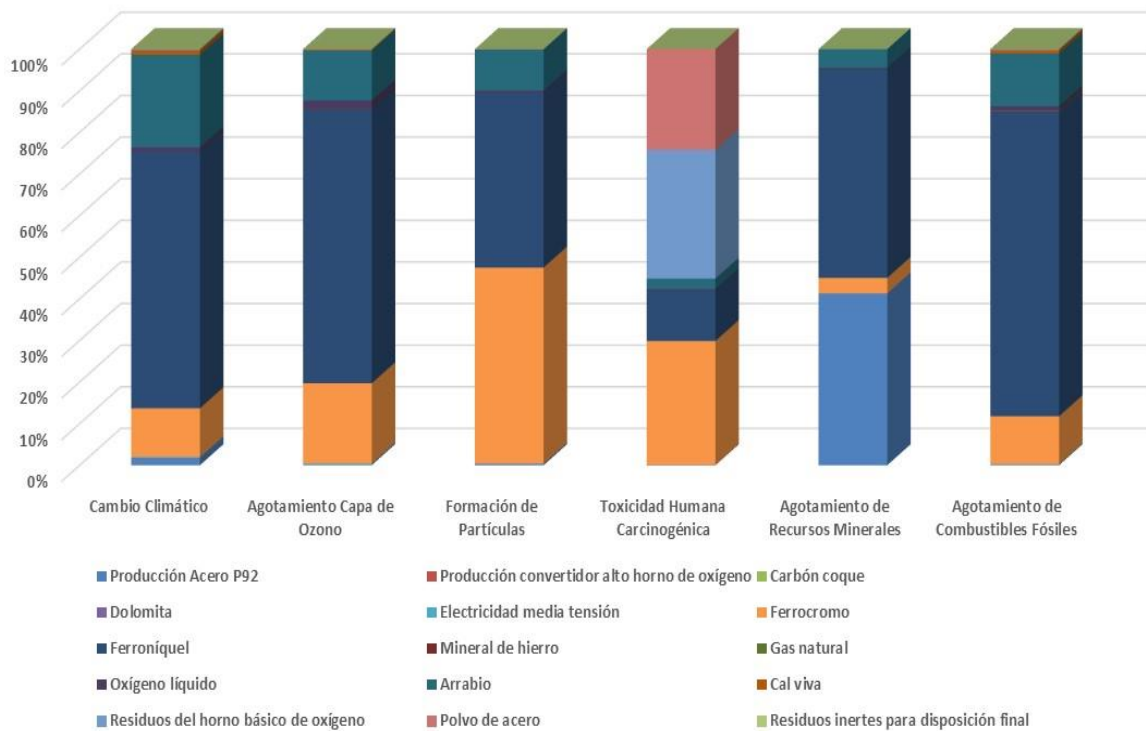


Figura 40: Análisis de impacto P92. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicha figura aparecen reflejadas las categorías de impacto estudiadas correspondientes a cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, formación de partículas, toxicidad humana (carcinogénica), agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. El resto de las categorías no se consideran al tratarse de categorías con valores muy reducidos.

Al igual que para el acero ferrítico P91, los resultados ponen de manifiesto la importancia que las aleaciones de ferróniquel y ferrocromo empleadas en la fabricación del acero tienen en todas las categorías de impacto señaladas. En concreto, la aleación de ferróniquel afecta en mayor medida a las categorías de cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles; mientras que la aleación de ferrocromo afecta sobre todo a la categoría de formación de partículas y toxicidad humana (carcinogénica).

En la Figura 41, correspondiente a la evaluación del daño, se constata lo mencionado en el párrafo anterior al apreciarse que las tres áreas de daño (salud humana, ecosistemas y recursos) están afectadas en mayor medida por las aleaciones de ferróniquel y ferrocromo, siendo el peso de la primera mayor. Dicha aleación de ferróniquel produciría un mayor daño a los ecosistemas; por otro lado, la aleación de ferrocromo tendría su mayor porcentaje de daño referido a la salud humana.

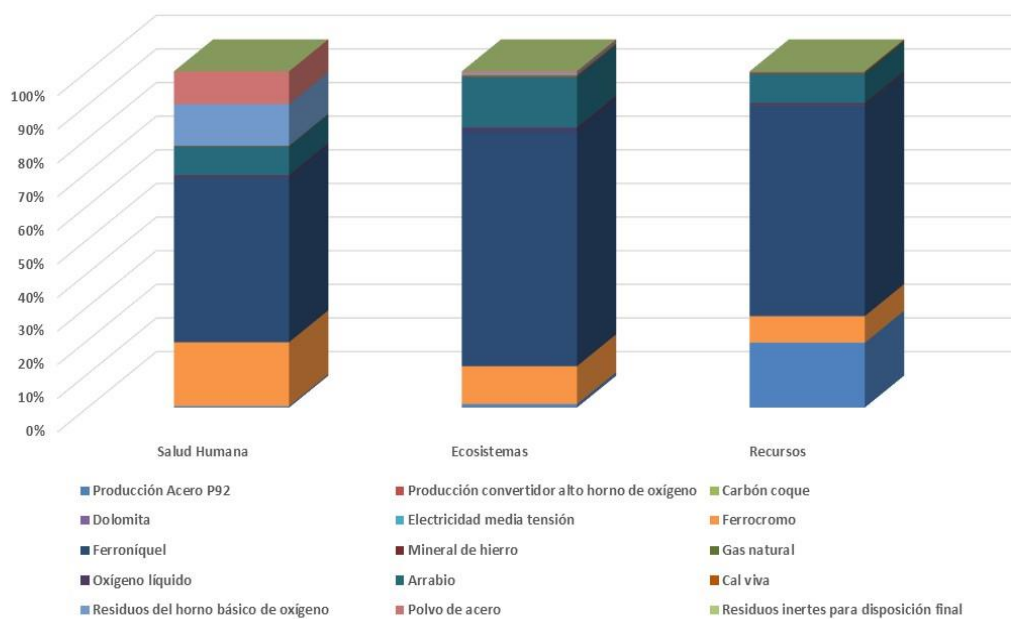


Figura 41: Análisis de impacto P92. Evaluación de daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A continuación, en la figura 42, se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto medio. Como en el caso del acero ferrítico P91, se observa la predominancia en la afectación a las categorías de impacto de las aleaciones de ferróniquel y ferrocromo, seguidas por los residuos del convertidor básico de oxígeno, el arrabio y el polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico.

Todos los procesos anteriores afectan a la toxicidad humana carcinogénica, que recibe una importante aportación del ferrocromo (del orden de 0,25 Pt). El ferróníquel afecta en mayor medida al cambio climático (del orden de 0,15 Pt) y también a la toxicidad humana carcinogénica (del orden de 0,10 Pt). Otra categoría de impacto afectada en menor proporción es la formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica. Estos resultados son similares a los del acero ferrítico P91, si bien los valores son ligeramente superiores para los casos mencionados.

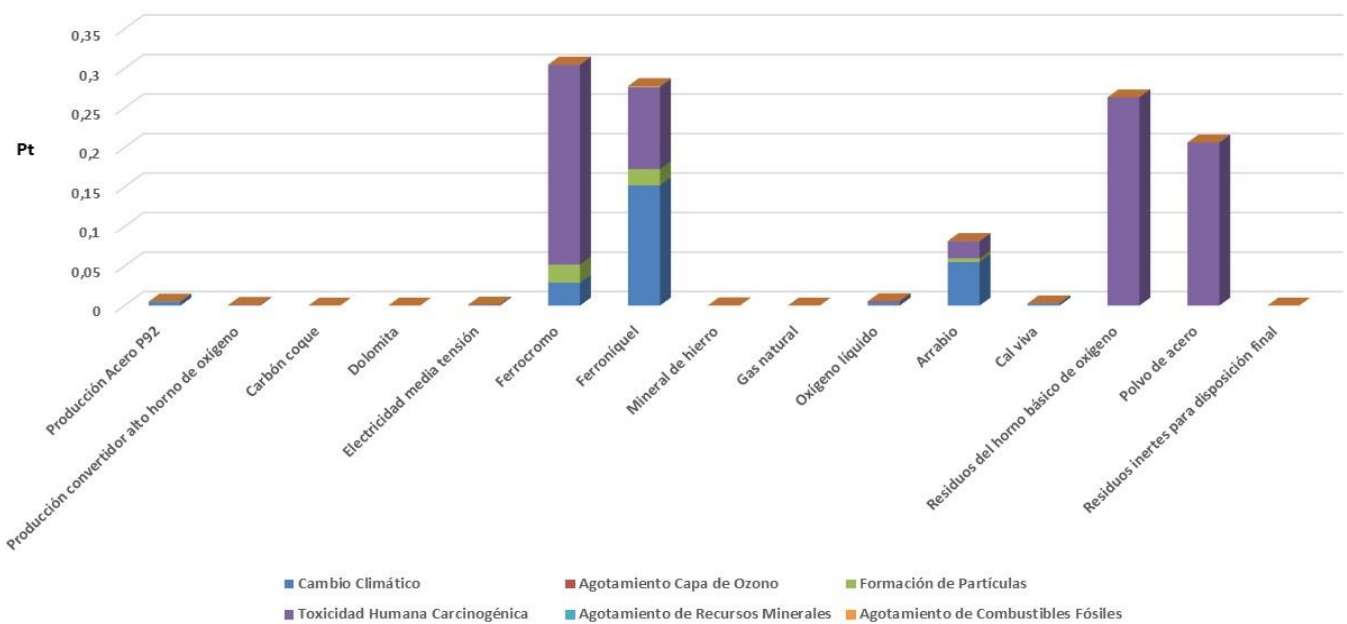


Figura 42: Análisis de impacto P92. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro

En la siguiente figura 43 se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto final. En lo que se refiere a áreas de daño, la salud humana es el área con mayor grado de afectación de todos los procesos descritos, principalmente por el ferróníquel (del orden de 1,04 Pt) y ferrocromo (0,40 Pt). El área de ecosistemas es afectada en mucha menor medida, principalmente por ferróníquel (del orden de 0,08 Pt), ferrocromo y arrabio (con valores inferiores a 0,02 Pt). El área de recursos, sin embargo, tiene una importancia relativa muy pequeña en comparación con las otras dos áreas, apareciendo con una leve afectación por parte del ferróníquel, pero de mucho menor valor que para las otras áreas de daño. Todo ello coincide con lo obtenido para el caso del acero ferrítico P91, si bien los valores correspondientes a salud humana son levemente superiores y los correspondientes a ecosistemas ligerísimamente inferiores.

MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO

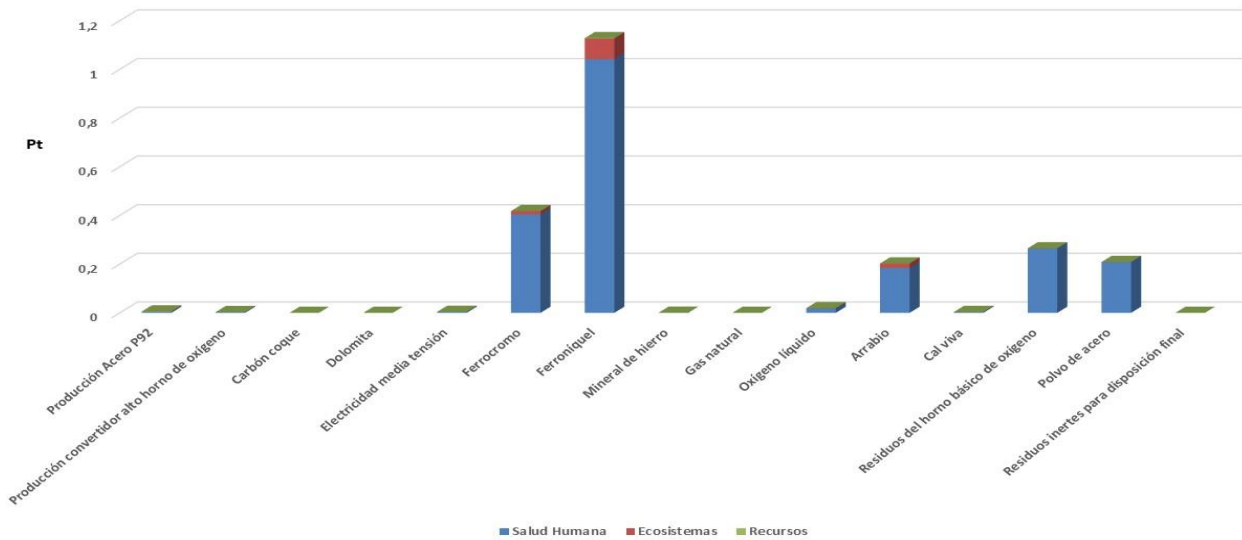


Figura 43: Análisis de impacto P92. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En cuanto a la puntuación única en contribución de procesos que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P92 (resultados expresados en Pt), véase abajo la figura 44 que muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución de los procesos más importantes en orden descendiente de importancia, partiendo de 0,386 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferroñiquel

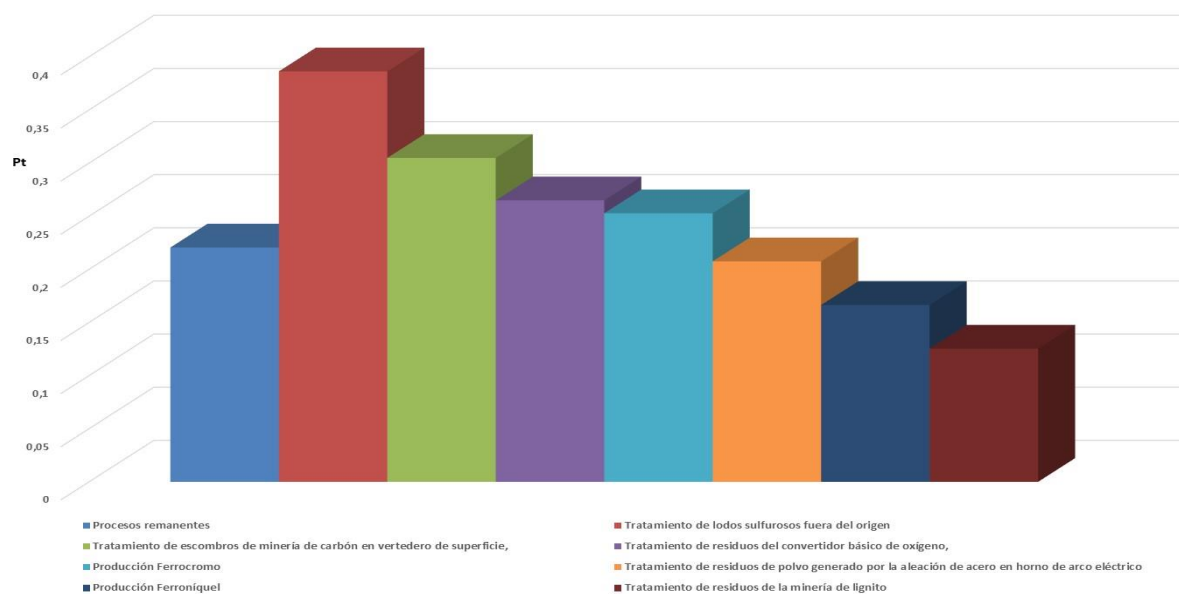


Figura 44: Contribución proceso P92. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El orden de importancia de la contribución de los procesos anteriores coincide con el del acero ferrítico P91, con valores levemente superiores para el acero ferrítico P92.

Por otro lado, se presenta en la figura 45 el diagrama de red para evaluación del daño (salud humana en daly), con un valor de corte del 8,5% en el que aparecen representados los procesos principales. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede apreciarse, al igual que en el caso del acero ferrítico P91, el ferróníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 48,8% (influencia en el mercado) y 48,6% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 18,9% tanto en influencia en el mercado como en producción. Como tercer elemento se encuentra el arrabio, debido a su influencia en el mercado (8,87%) y producción (8,59%).



Figura 45: Red P92. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

La producción de ferroníquel, que es la que genera un mayor impacto, está influenciada por los mismos procesos que en el caso del acero ferrítico P91, manteniéndose los porcentajes de contribución y las relaciones de influencia. También se observan las mismas influencias y contribuciones en la generación y tratamiento de residuos, tanto para el caso de las asociadas a la producción de ferroníquel como elemento contribuyente a la producción del acero ferrítico P92 como para el caso de las asociadas a la misma producción de 1 kg de acero ferrítico P92.

Por tanto, en función de los resultados obtenidos, puede concluirse que para el acero ferrítico P92 (del mismo modo que para el P91) son los procesos de producción de ferroníquel, ferrocromo y arrabio mediante operaciones de combustión que implican consumo eléctrico y partiendo de la materia prima extraída en la mina los que generan un mayor impacto medioambiental para las categorías de impacto y áreas finales de daño analizadas. Es importante la participación del ferrocromo tanto en el área de daño de la salud humana como en la categoría de impacto de formación de partículas y de toxicidad humana carcinogénica, debido a la presencia del cromo. De igual forma, es reseñable la aportación del ferroníquel al área de daño de ecosistemas y a la categoría de impacto de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono, fundamentalmente derivado de los procesos de extracción y combustión de carbón empleados. El ferroníquel también contribuye con gran peso a las categorías de agotamiento de recursos minerales y combustibles fósiles, y por consiguiente al área de daño de recursos.

Asimismo, el tratamiento de los residuos generados en la extracción y procesamiento de las materias primas empleadas genera una contribución a tener en consideración.

En lo que respecta a la comparativa entre acero P91 vs. P92, los valores de los datos de caracterización y evaluación del daño son prácticamente idénticos en ambos casos. No obstante, las puntuaciones únicas por categoría de impacto, área final de daño y contribución de procesos son superiores en el caso del acero P92, si bien mantienen las mismas tendencias que en el acero P91. Las diferencias son más acentuadas en el área de salud humana (cabe recordar que el P92 tiene mayor contenido medio de Cr que el P91). Sin embargo, los resultados son prácticamente idénticos en el área de recursos y se observa el caso de que los valores son menores para el P92 en el área de ecosistemas. Estos resultados son debidos a las diferencias de composición existentes.

4.2.3.- Análisis de Ciclo de Vida acero ferrítico VM12

El Análisis de Ciclo de Vida para el acero ferrítico VM12 se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad, partiendo de los valores de inventario existentes en la tabla 12 sobre la composición de elementos de dicho acero y tomando como unidad funcional 1 kg. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en el sustrato de estudio. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Al igual que en casos anteriores, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent y partiendo de la caracterización se alcanzan para cada categoría de impacto las proporciones que corresponden a cada una de las mismas. Dichos datos están plasmados en la Figura 46 que se muestra a continuación.

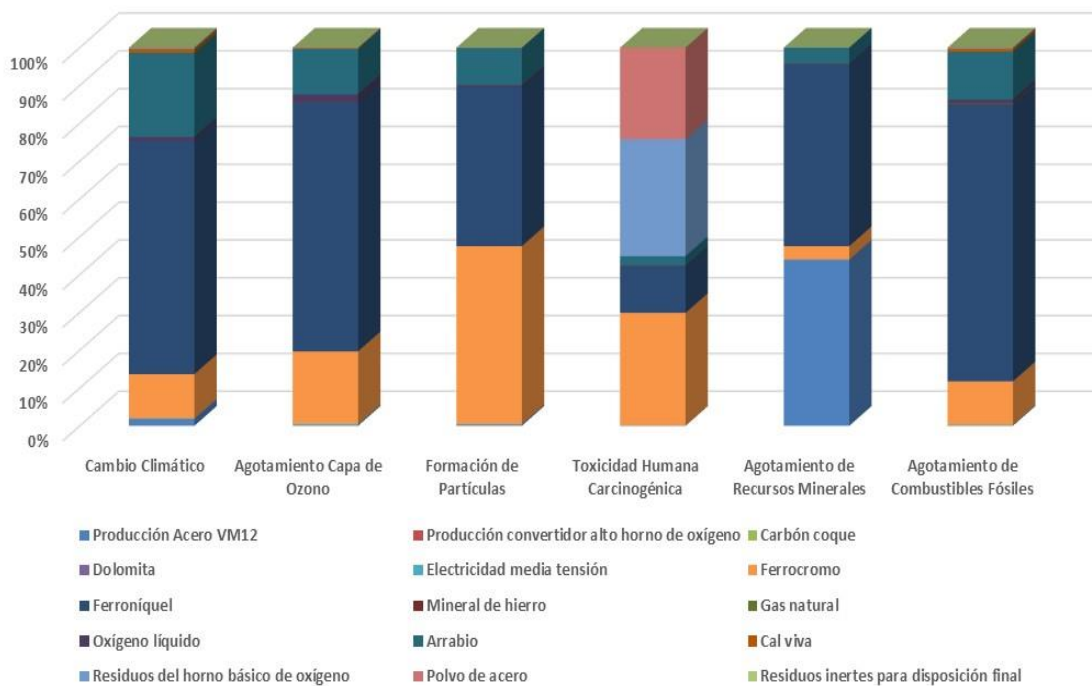


Figura 46: Análisis de impacto VM12. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicha figura aparecen reflejadas las categorías de impacto estudiadas correspondientes a cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, formación de partículas, toxicidad humana (carcinogénica), agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. El resto de las categorías no se consideran al tratarse de categorías con valores muy reducidos.

Del mismo modo que para los aceros ferríticos P91 y P92, los resultados ponen de manifiesto la importancia que las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo empleadas en la fabricación del acero tienen en todas las categorías de impacto señaladas. En concreto, la aleación de ferróníquel afecta en mayor medida a las categorías de cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles; mientras que la aleación de ferrocromo afecta sobre todo a la categoría de formación de partículas y toxicidad humana (carcinogénica).

En la Figura 47, correspondiente a la evaluación del daño, se constata lo mencionado en el párrafo anterior al apreciarse que las tres áreas de daño (salud humana, ecosistemas y recursos) están afectadas en mayor medida por las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, siendo el peso de la primera mayor. Dicha aleación de ferróníquel produciría un mayor daño a los ecosistemas; por otro lado, la aleación de ferrocromo tendría su mayor porcentaje de daño referido a la salud humana.

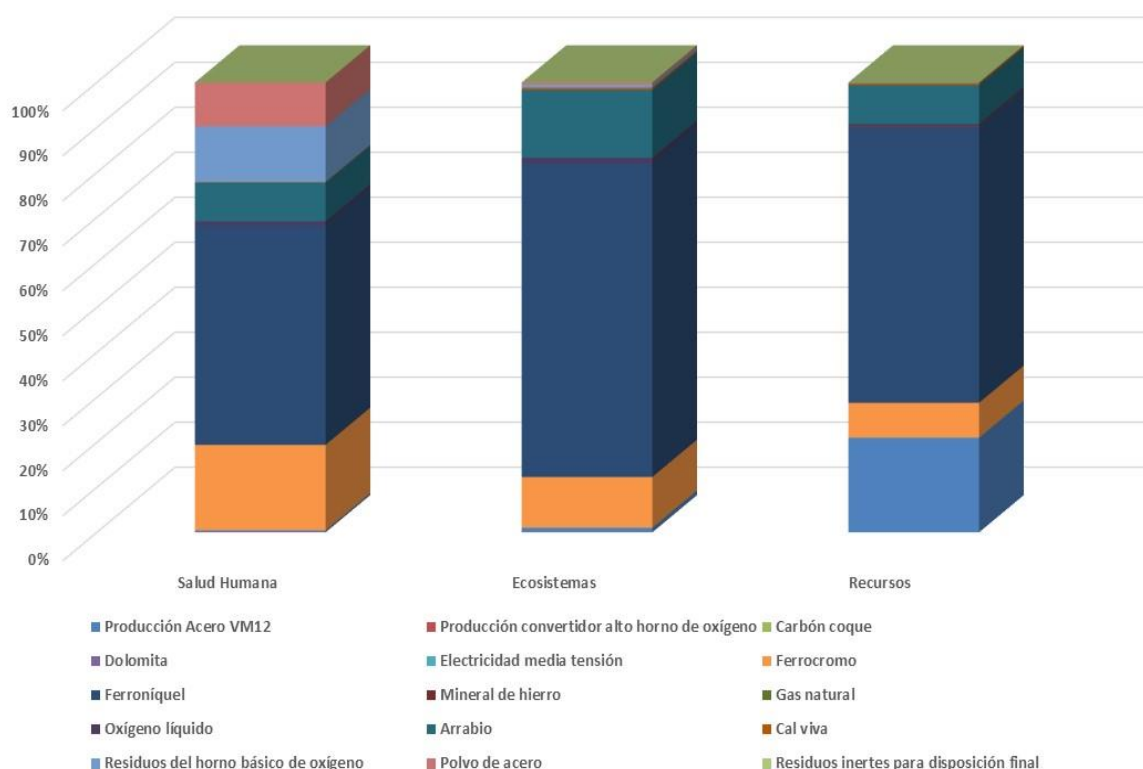


Figura 47: Análisis de impacto VM12. Evaluación de daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Seguidamente, en la figura 48, se presentan los análisis de impacto para el acero VM12 en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto medio.

De la misma forma que para los aceros ferríticos P91 y P92, se observa la predominancia en la afectación a las categorías de impacto de las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, seguidas por los residuos del convertidor básico de oxígeno, el arrabio y el polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico.

Todos los procesos anteriores afectan a la toxicidad humana carcinogénica, que recibe una importante aportación del ferrocromo (del orden de 0,25 Pt). El ferróníquel afecta en mayor medida al cambio climático (del orden de 0,15 Pt) y también a la toxicidad humana carcinogénica (del orden de 0,10 Pt). Otra categoría de impacto afectada en menor proporción es la formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica. Estos resultados siguen la tendencia de los aceros ferríticos P91 y P92, si bien los valores se aproximan más a los del P92, siendo casi idénticos.

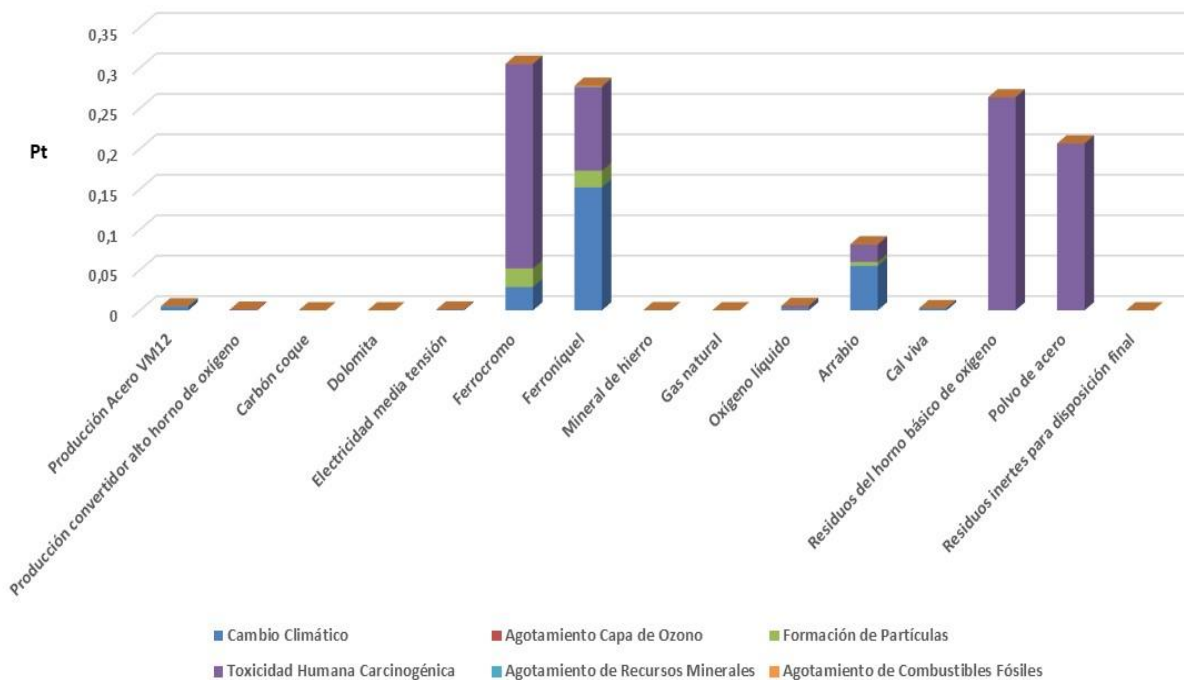


Figura 48: Análisis de impacto VM12. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la siguiente figura 49 se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto final. En lo que se refiere a áreas de daño, la salud humana es el área con mayor grado de afectación de todos los procesos descritos, principalmente por el ferróníquel (del orden de 1,04 Pt) y ferrocromo (0,40 Pt). El área de ecosistemas tiene una afectación de menor orden: fundamentalmente por ferróníquel (del orden de 0,08 Pt), ferrocromo y arrabio (con valores inferiores a 0,02 Pt).

El área de recursos, sin embargo, tiene una importancia relativa muy pequeña en comparación con las otras dos áreas, apareciendo con una leve afectación por parte del ferróníquel, pero de mucho menor valor que para las otras áreas de daño. Todo ello coincide con lo obtenido para los casos de aceros ferríticos P91 y P92, si bien los valores son casi idénticos a los del P92, observándose sus mismas consideraciones.

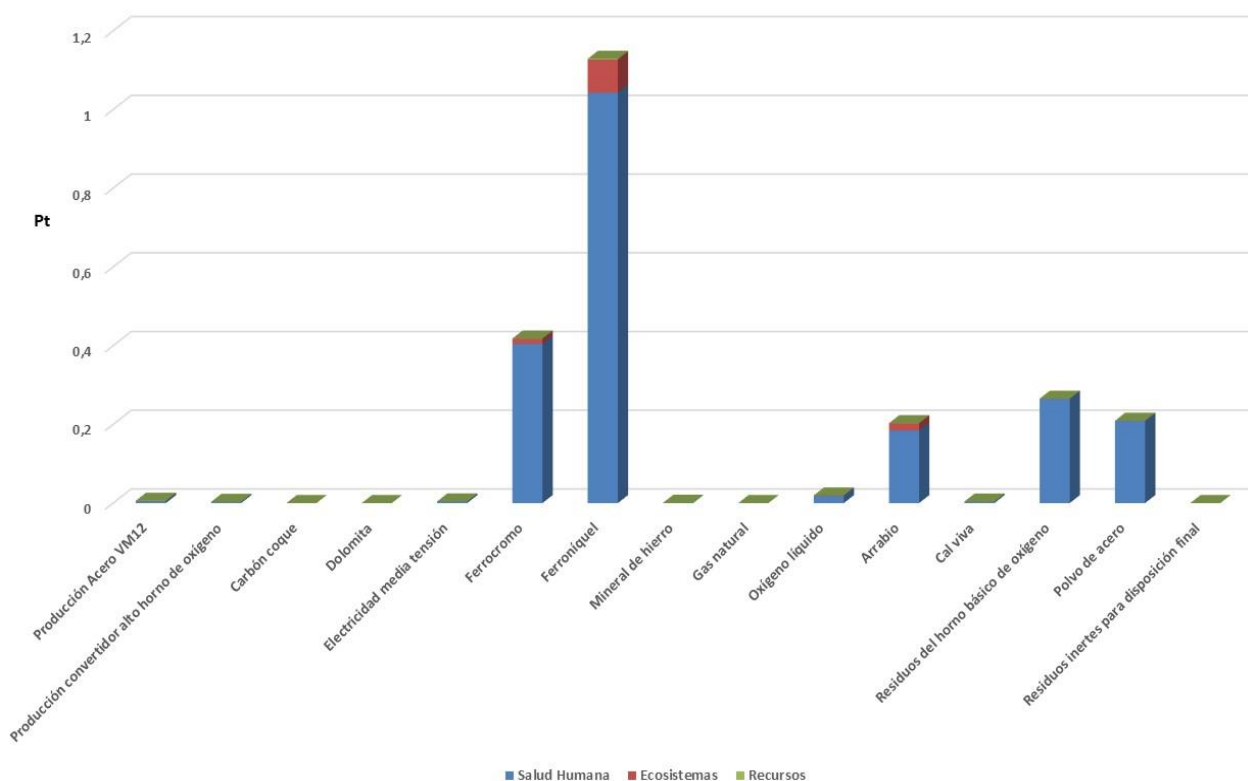


Figura 49: Análisis de impacto VM12. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por lo que respecta a puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico VM12, en la figura 50 mostrada a continuación aparece en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución de los procesos más importantes en orden descendiente de importancia, partiendo de 0,386 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferróníquel. Resultados similares a los aceros P91 y P92, pero con valores más próximos a los del acero P92, como en los casos anteriores.

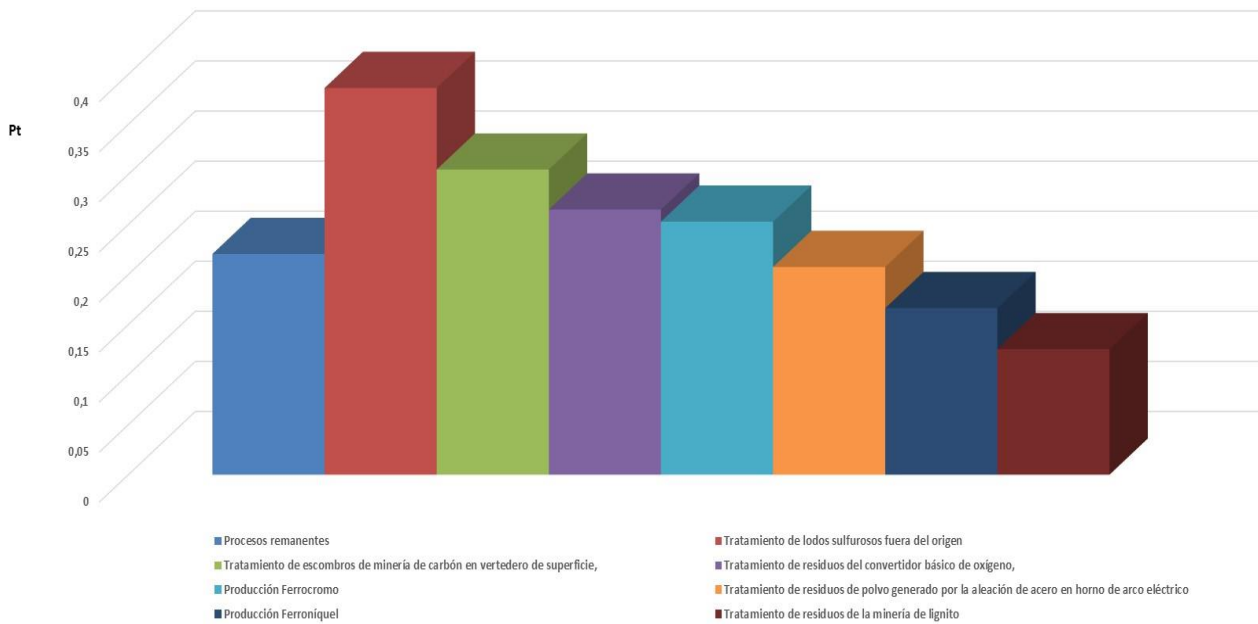


Figura 50: Contribución proceso VM12. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, se presenta en la figura 51 el diagrama de red para evaluación del daño (salud humana en daly), con un valor de corte del 8,5%. Este valor de corte es representativo de los procesos principales. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede observarse, al igual que en el caso de los aceros ferríticos P91 y P92, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 49,8% (influencia en el mercado) y 49,8% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 18,5% tanto en influencia en el mercado como en producción. Como tercer elemento se encuentra el arrabio, debido a su influencia en el mercado (9,23%) y producción (8,94%). Los valores observados en tanto por ciento con respecto al P91 y P92 son ligeramente superiores en la contribución del ferroníquel y el arrabio y ligeramente inferiores en la contribución del ferrocromo. No obstante, la producción de ferroníquel, que es la que genera un mayor impacto, está influenciada por los mismos procesos que en el caso de los aceros ferríticos P91 y P92, manteniéndose las relaciones de influencia. También se observan las mismas influencias y contribuciones en la generación y tratamiento de residuos, tanto para el caso de las asociadas a la producción de ferroníquel como elemento contribuyente a la producción del acero ferrítico VM12 como para las asociadas a la misma producción de 1 kg de acero ferrítico VM12.



Figura 51: Red VM12. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En vista de todo lo anterior y en función de los resultados obtenidos, puede concluirse que para el acero ferrítico VM12 (del mismo modo que para el P91 y P92) son los procesos de producción de ferroníquel, ferrocromo y arrabio mediante operaciones de combustión que implican consumo eléctrico y partiendo de la materia prima extraída en la mina los que generan un mayor impacto medioambiental para las categorías de impacto y áreas finales de daño analizadas.

Asimismo, tanto en el caso del acero ferrítico VM12 como en el de los aceros ferríticos P91 y P92 es importante la participación del ferrocromo en el área de daño de la salud humana, así como en las categorías de impacto de formación de partículas y de toxicidad humana carcinogénica, debido a la presencia del cromo. De igual forma, es reseñable la aportación del ferroníquel al área de daño de ecosistemas y a la categoría de impacto de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono, fundamentalmente derivado de los procesos de extracción y combustión de carbón empleados. El ferroníquel también contribuye con gran peso a las categorías de agotamiento de recursos minerales y combustibles fósiles, y por consiguiente al área de daño de recursos.

Asimismo, el tratamiento de los residuos generados en la extracción y procesamiento de las materias primas empleadas genera una contribución a tener en consideración tanto para el caso del acero VM12 como para el caso de los aceros P91 y P92.

En lo que respecta a la comparativa del acero VM12 con los aceros ferríticos P91 y P92, los valores de los datos de caracterización y evaluación del daño son prácticamente idénticos en ambos casos. Para las puntuaciones únicas por categoría de impacto, área final de daño y contribución de procesos, se mantienen las mismas tendencias que los otros aceros, pero los valores se aproximan más a los correspondientes al P92 siendo casi idénticos. A pesar de que el acero VM12 tiene mayor contenido medio de Cr que el resto de los aceros, no se observa diferencia en el área de salud humana con el P92; sí que existe un muy leve incremento en los Pt asociados al área de recursos, cuyo mayor valor se daría en el caso del acero VM12. Este leve incremento también se confirmaría en la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales. La conclusión a la que se llega es que las leves variaciones observadas entre los aceros son debidas a las diferencias de composición existente; en este sentido, la composición porcentual de los distintos elementos que conforma el VM12 tiene más similitudes con la del P92 (presencia de B, W) que con la del P91, explicando de esta manera que los valores asociados a VM12 y P92 tenga mayor rango de coincidencia en la mayoría de los casos.

4.2.4.- Análisis de Ciclo de Vida acero inoxidable austenítico AISI 347H

El Análisis de Ciclo de Vida para el acero inoxidable austenítico AISI 347H se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad, partiendo de los valores de inventario existentes en la tabla 13 sobre la composición de elementos de dicho acero y tomando como unidad funcional 1 kg. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en el sustrato de estudio. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Como en el caso de los ACV realizados a los aceros ferríticos anteriores, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent y partiendo de la caracterización se alcanzan para cada categoría de impacto las proporciones que corresponden a cada una de las mismas. Dichos datos están plasmados en la Figura 52 que se muestra seguidamente.

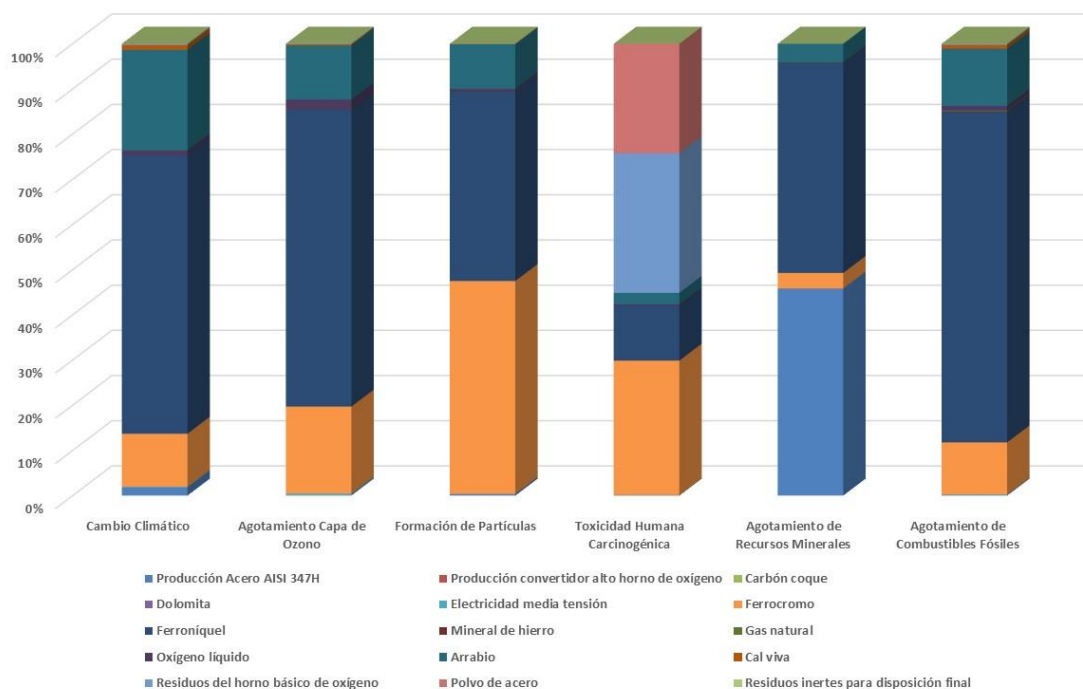


Figura 52: Análisis de impacto AISI347H. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicha figura 52 aparecen reflejadas las categorías de impacto estudiadas correspondientes a cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, formación de partículas, toxicidad humana (carcinogénica), agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. El resto de las categorías no se consideran al tratarse de categorías con valores muy reducidos.

Del mismo modo que para los aceros ferríticos estudiados (P91, P92, VM12), los resultados ponen de manifiesto la importancia que las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo empleadas en la fabricación del acero tienen en todas las categorías de impacto señaladas. En concreto, la aleación de ferróníquel afecta en mayor medida a las categorías de cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles; mientras que la aleación de ferrocromo afecta sobre todo a la categoría de formación de partículas y toxicidad humana (carcinogénica).

En la Figura 53, correspondiente a la evaluación del daño, se constata lo mencionado en el párrafo anterior al apreciarse que las tres áreas de daño (salud humana, ecosistemas y recursos) están afectadas en mayor medida por las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, siendo el peso de la primera mayor. Dicha aleación de ferróníquel produciría un mayor daño a los ecosistemas; por otro lado, la aleación de ferrocromo tendría su mayor porcentaje de daño referido a la salud humana.

Las diferencias observadas entre los aceros ferríticos y el austenítico AISI 347H radican en que el proceso de producción en sí del acero austenítico afecta en mayor proporción a la categoría de agotamiento de recursos minerales y al área de recursos que el proceso de producción de los aceros ferríticos (del orden de un 3,5% y un 2,5% respectivamente).

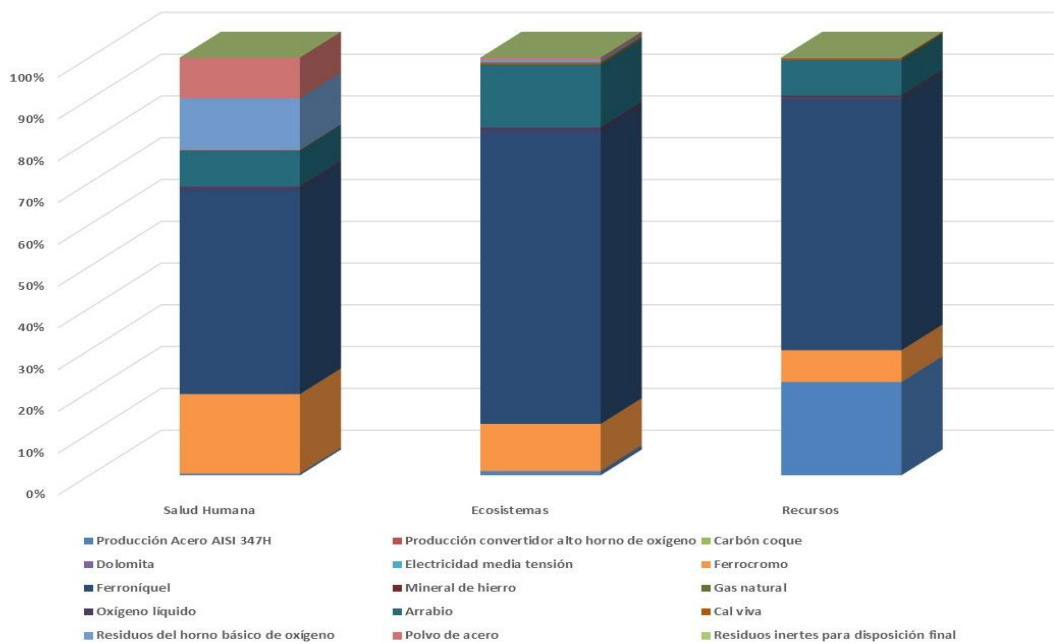


Figura 53: Análisis de impacto AISI347H. Evaluación de daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A continuación, en la figura 54, se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto medio. De la misma forma que para los aceros ferríticos, se observa la predominancia en la afectación a las categorías de impacto de las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, seguidas por los residuos del convertidor básico de oxígeno, el arrabio y el polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico.

Todos los procesos anteriores afectan a la toxicidad humana carcinogénica, que recibe una importante aportación del ferrocromo (del orden de 0,25 Pt). El ferróníquel afecta en mayor medida al cambio climático (del orden de 0,15 Pt) y también a la toxicidad humana carcinogénica (del orden de 0,10 Pt). Otra categoría de impacto afectada en menor proporción es la formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica. Estos resultados siguen la tendencia de los aceros ferríticos, con valores más aproximados al P92 y VM12.

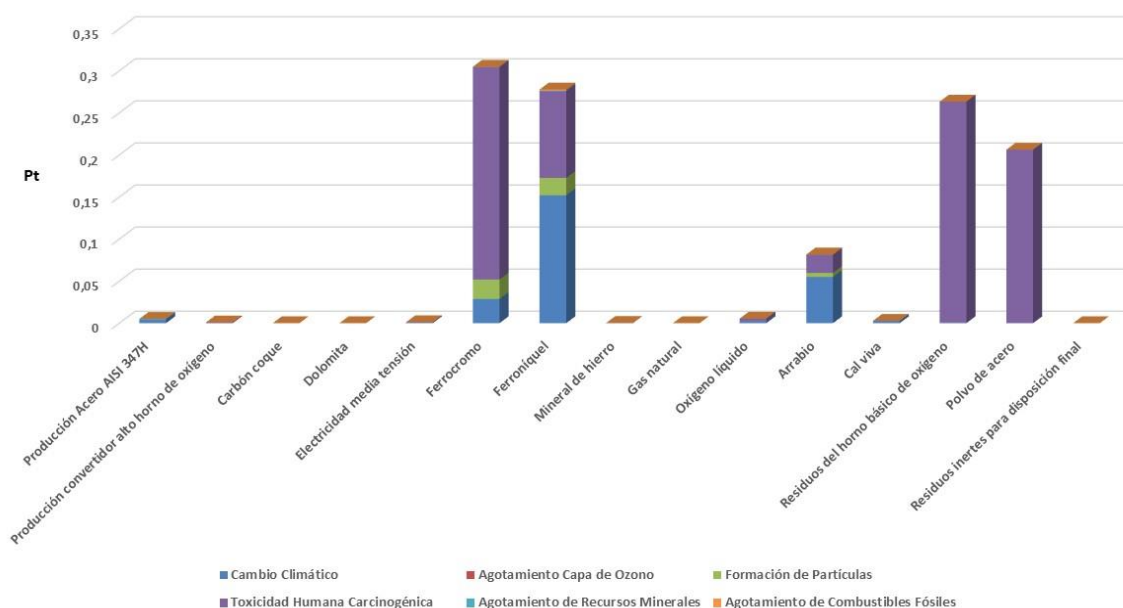


Figura 54: Análisis de impacto 347H. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 55 que se muestra seguidamente se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto final. En lo que se refiere a áreas de daño, la salud humana es el área con mayor grado de afectación de todos los procesos descritos, principalmente por el ferróníquel (del orden de 1,04 Pt) y ferrocromo (0,40 Pt). El área de ecosistemas tiene una afectación de menor orden: ferróníquel (del orden de 0,08 Pt), ferrocromo y arrabio (con valores inferiores a 0,02 Pt).

El área de recursos, sin embargo, tiene una importancia relativa muy pequeña en comparación con las otras dos áreas, apareciendo con una leve afectación por parte del ferroníquel, pero de mucho menor valor que para las otras áreas de daño. Todo ello coincide con lo obtenido para los casos de aceros ferríticos.

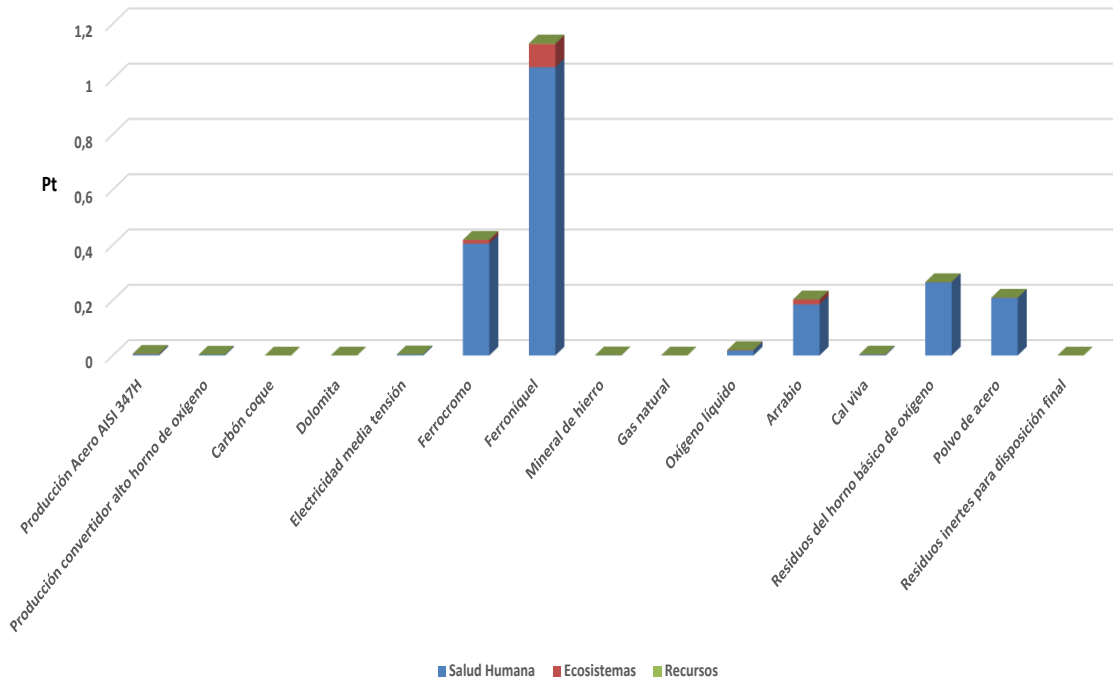


Figura 55: Análisis de impacto AISI347H. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por lo que respecta a puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero austenítico AISI 347H en la figura 56 mostrada a continuación aparece en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución de los procesos más importantes en orden descendente de importancia, partiendo de 0,386 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferroníquel. Resultados similares a los aceros ferríticos en cuanto al orden de los procesos con mayores contribuciones, pero con valores más próximos al P92 y VM12, como en los casos anteriores.

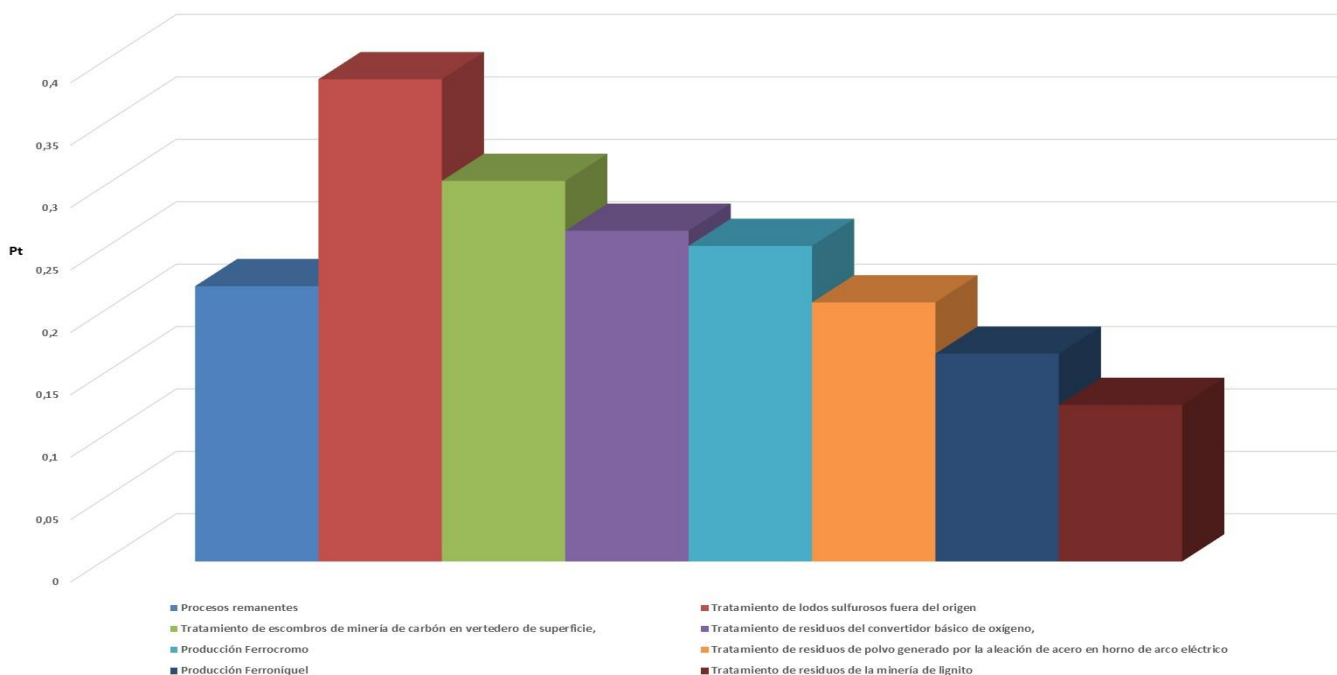


Figura 56: Contribución proceso AISI347H. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Comentamos ahora en la figura 57 el diagrama de red para evaluación del daño (salud humana en daly), con un valor de corte del 8,5%. Este valor de corte es representativo para la visualización de los principales procesos. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede observarse, al igual que en el caso de los aceros ferríticos, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 49,8% (influencia en el mercado) y 49,8% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 18,5% tanto en influencia en el mercado como en producción. Como tercer elemento se encuentra el arrabio, debido a su influencia en el mercado (9,23%) y producción (8,94%). Los valores observados en tanto por ciento se encuentran en la línea de los del resto de aceros ferríticos, estando más parejos a los correspondientes al acero ferrítico VM12. La producción de ferroníquel, que es la que genera un mayor impacto, está influenciada por los mismos procesos que en el caso de los aceros ferríticos, manteniéndose las relaciones de influencia. También se observan las mismas influencias y contribuciones en la generación y tratamiento de residuos.

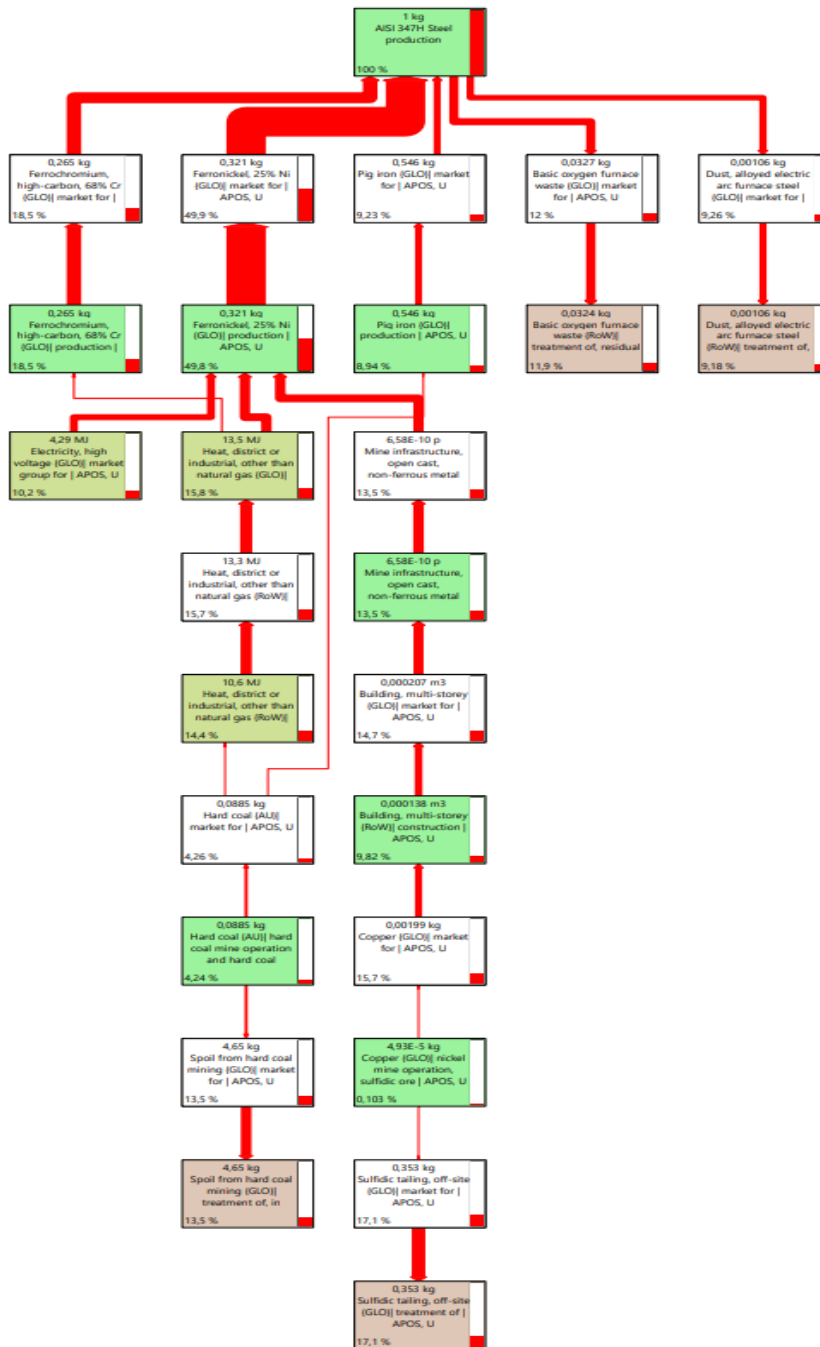


Figura 57: Red AISI347H. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En vista de todo lo anterior y en función de los resultados obtenidos, puede concluirse que para el acero austenítico AISI 347H (del mismo modo que para los ferríticos) son los procesos de producción de ferróníquel, ferrocromo y arrabio mediante operaciones de combustión que implican consumo eléctrico y partiendo de la materia prima extraída en la mina los que generan un mayor impacto medioambiental para las categorías de impacto y áreas finales de daño analizadas.

Asimismo, es importante la participación del ferrocromo tanto en el área de daño de la salud humana como en la categoría de impacto de formación de partículas y de toxicidad humana carcinogénica, debido a la presencia del cromo. De igual forma, es reseñable la aportación del ferróníquel al área de daño de ecosistemas y a la categoría de impacto de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono, fundamentalmente derivado de los procesos de extracción y combustión de carbón empleados. El ferróníquel también contribuye con gran peso a las categorías de agotamiento de recursos minerales y combustibles fósiles, y por consiguiente al área de daño de recursos.

De igual manera, el tratamiento de los residuos generados en la extracción y procesamiento de las materias primas empleadas genera una contribución a tener en consideración.

En lo que respecta a la comparativa del acero austenítico AISI 347H con los aceros ferríticos, los valores de los datos de caracterización y evaluación del daño son prácticamente idénticos en ambos casos, salvo por lo ya comentado acerca de que el proceso de producción en sí del acero austenítico afecta en mayor proporción a la categoría de agotamiento de recursos minerales y al área de recursos que el proceso de producción de los aceros ferríticos. En lo que respecta a las puntuaciones únicas por categoría de impacto, área final de daño y contribución de procesos, mantienen las mismas tendencias que los aceros ferríticos, pero los valores se aproximan más a los correspondientes al VM12 siendo casi idénticos. A pesar de que el acero austenítico AISI 347H tiene mayor contenido medio de Cr que el resto de los aceros ferríticos, no se observa diferencia en el área de salud humana con ellos ni en la categoría de toxicidad humana carcinogénica; sí que existe un muy leve incremento en los Pt asociados al área de recursos, cuyo mayor valor se daría en el caso del acero austenítico. Este leve incremento también se confirmaría en la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales. La conclusión a la que se llega es que las variaciones producidas se deben a las diferencias de composición existentes, que en el caso del acero inoxidable austenítico AISI 347H pasa por un mayor contenido en Cr que los ferríticos (17-19% frente al 8-9,5% del P91, 8,5-9,5% del P91 y 11-12% del VM12) y también de Ni (9-13% frente al 0,4% de los ferríticos) y Mn (2% frente al 0,3% de los ferríticos).

4.2.5.- Análisis de Ciclo de Vida acero inoxidable austenítico AISI 321

El Análisis de Ciclo de Vida para el acero inoxidable austenítico AISI 321 se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad, partiendo de los valores de inventario existentes en la tabla 14 sobre la composición de elementos de dicho acero y tomando como unidad funcional 1 kg. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en el sustrato de estudio. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Como en el caso de los ACV realizados a los aceros ferríticos y al acero austeníticos AISI 347H, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent y partiendo de la caracterización se alcanzan para cada categoría de impacto las proporciones que corresponden a cada una de las mismas. Dichos datos están plasmados en la Figura 58 que se muestra a continuación.

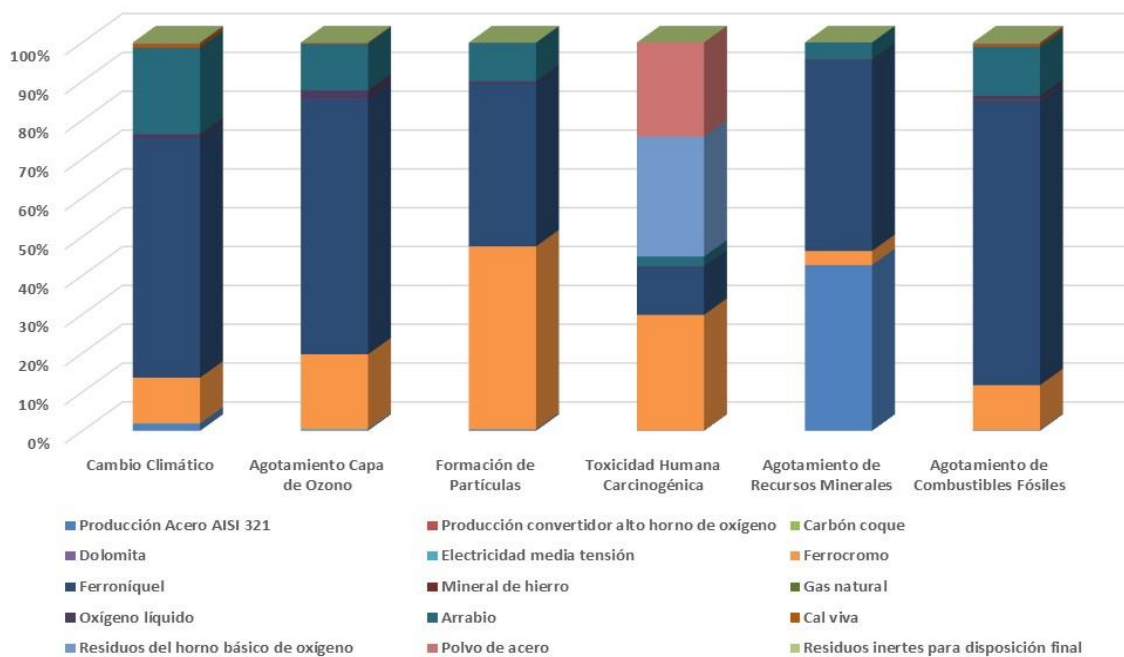


Figura 58: Análisis de impacto AISI321. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicha figura aparecen reflejadas las categorías de impacto estudiadas correspondientes a cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, formación de partículas, toxicidad humana (carcinogénica), agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles. El resto de las categorías no se consideran al tratarse de categorías con valores muy reducidos.

Del mismo modo que para los aceros ferríticos (P91, P92, VM12) y el acero inoxidable austenítico AISI 347H estudiados, los resultados ponen de manifiesto la importancia que las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo empleadas en la fabricación del acero tienen en todas las categorías de impacto señaladas. En concreto, la aleación de ferróníquel afecta en mayor medida a las categorías de cambio climático (con influencia en la salud humana), agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles; mientras que la aleación de ferrocromo afecta sobre todo a la categoría de formación de partículas y toxicidad humana (carcinogénica).

En la figura 59, correspondiente a la evaluación del daño, se constata lo mencionado en el párrafo anterior al apreciarse que las tres áreas de daño (salud humana, ecosistemas y recursos) están afectadas en mayor medida por las aleaciones de ferróníquel y ferrocromo, siendo el peso de la primera mayor. Dicha aleación de ferróníquel produciría un mayor daño a los ecosistemas; por otro lado, la aleación de ferrocromo tendría su mayor porcentaje de daño referido a la salud humana.

Las diferencias observadas entre los aceros ferríticos y el austenítico AISI 347H, relativas a que el proceso de producción en sí del acero austenítico afectaba en mayor proporción a la categoría de agotamiento de recursos minerales y al área de recursos que el proceso de producción de los aceros ferríticos, no se encuentran a la hora de analizar los datos del acero austenítico AISI 321. De esta forma se deduce que la producción del AISI 321 es medioambientalmente más ventajosa que la de AISI 347H.

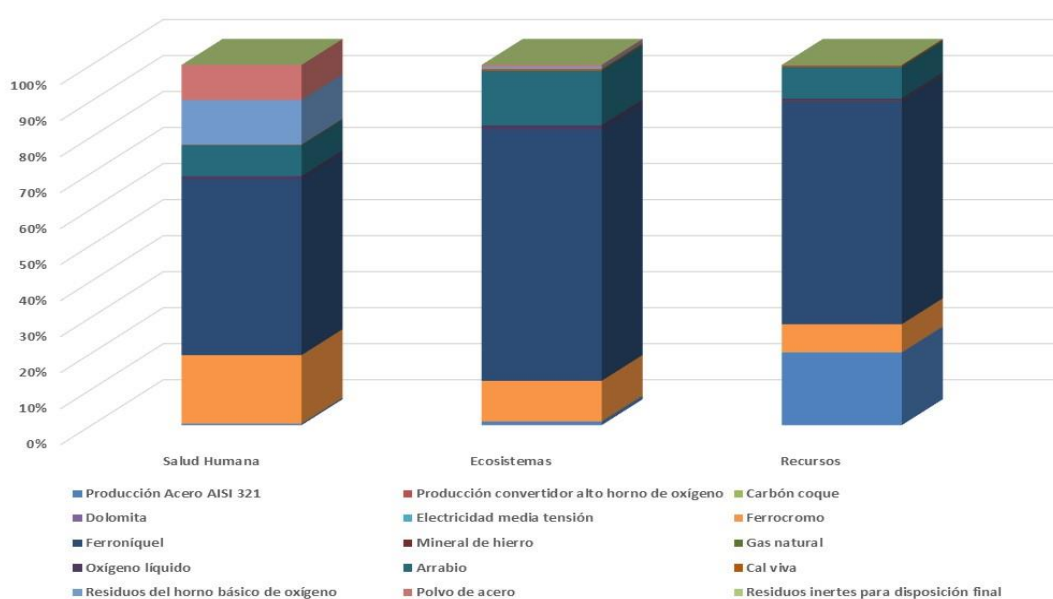


Figura 59: Análisis de impacto AISI321. Evaluación de daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Seguidamente, en la figura 60, se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto medio. De la misma forma que para los aceros ferríticos, se observa la predominancia en la afectación a las categorías de impacto de las aleaciones de ferromnicio y ferrocromo, seguidas por los residuos del convertidor básico de oxígeno, el arrabio y el polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico.

Todos los procesos anteriores afectan a la toxicidad humana carcinogénica, que recibe una importante aportación del ferrocromo (del orden de 0,25 Pt). El ferromnicio afecta en mayor medida al cambio climático (del orden de 0,15 Pt) y también a la toxicidad humana carcinogénica (del orden de 0,10 Pt). Otra categoría de impacto afectada en menor proporción es la formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica. Estos resultados siguen la tendencia de los aceros ferríticos y del austenítico AISI 347H.

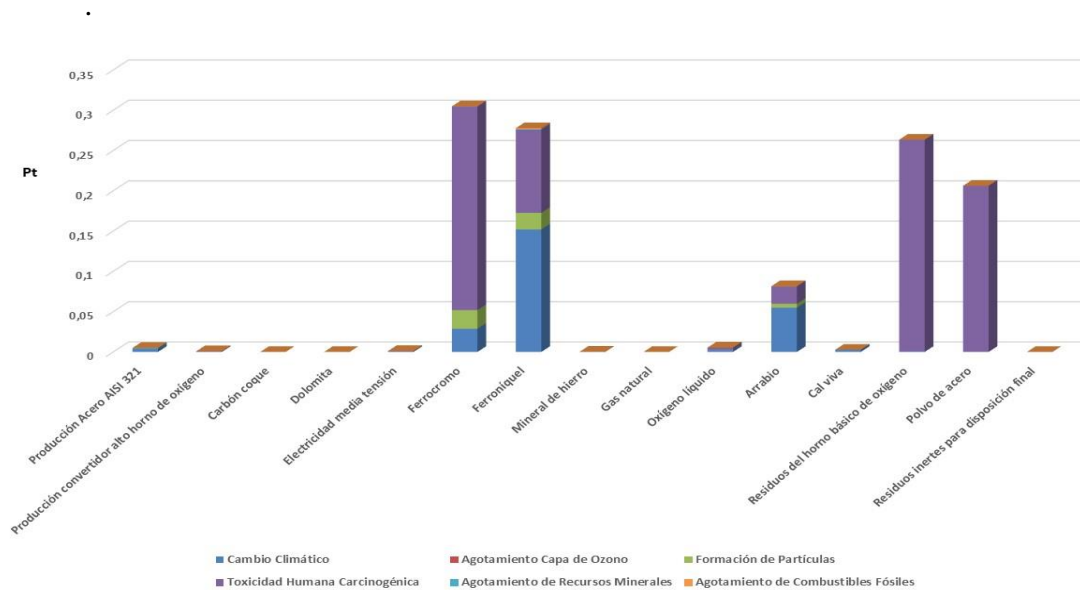


Figura 60: Análisis de impacto AISI321. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 61 que se muestra seguidamente se presentan los análisis de impacto en base a puntuación única referida a las categorías de impacto del punto final. En lo que se refiere a áreas de daño, la salud humana es el área con mayor grado de afectación de todos los procesos descritos, principalmente por el ferromnicio (del orden de 1,04 Pt) y ferrocromo (0,40 Pt). El área de ecosistemas tiene una afectación de menor orden: ferromnicio (del orden de 0,08 Pt), ferrocromo y arrabio (con valores inferiores a 0,02 Pt).

El área de recursos, sin embargo, tiene una importancia relativa muy pequeña en comparación con las otras dos áreas, apareciendo con una leve afectación por parte del ferromnquel, pero de mucho menor valor que para las otras áreas de daño. Todo ello coincide con lo obtenido para los casos de aceros ferríticos y austenítico AISI 347H.

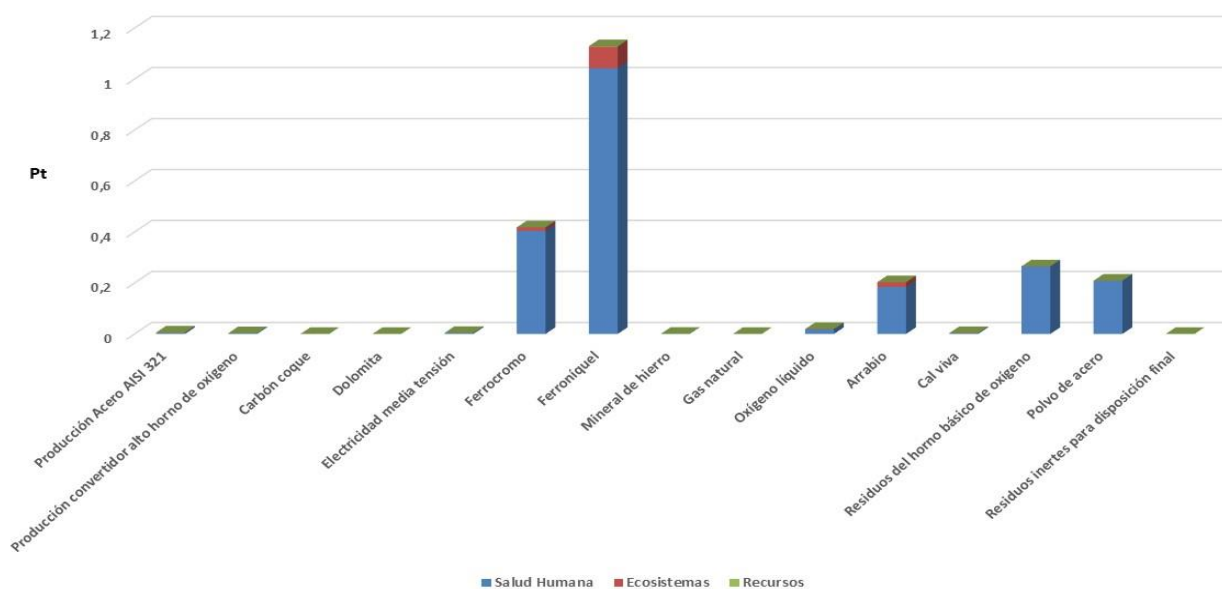


Figura 61: Análisis de impacto AISI321. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si analizamos los datos de puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero austenítico AISI 321, en la figura 62 mostrada a continuación aparece en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución de los procesos más importantes en orden descendiente de importancia, partiendo de 0,386 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferromnquel. Resultados similares a los aceros ferríticos y austenítico AISI 347H en cuanto al orden de los procesos con mayores contribuciones.

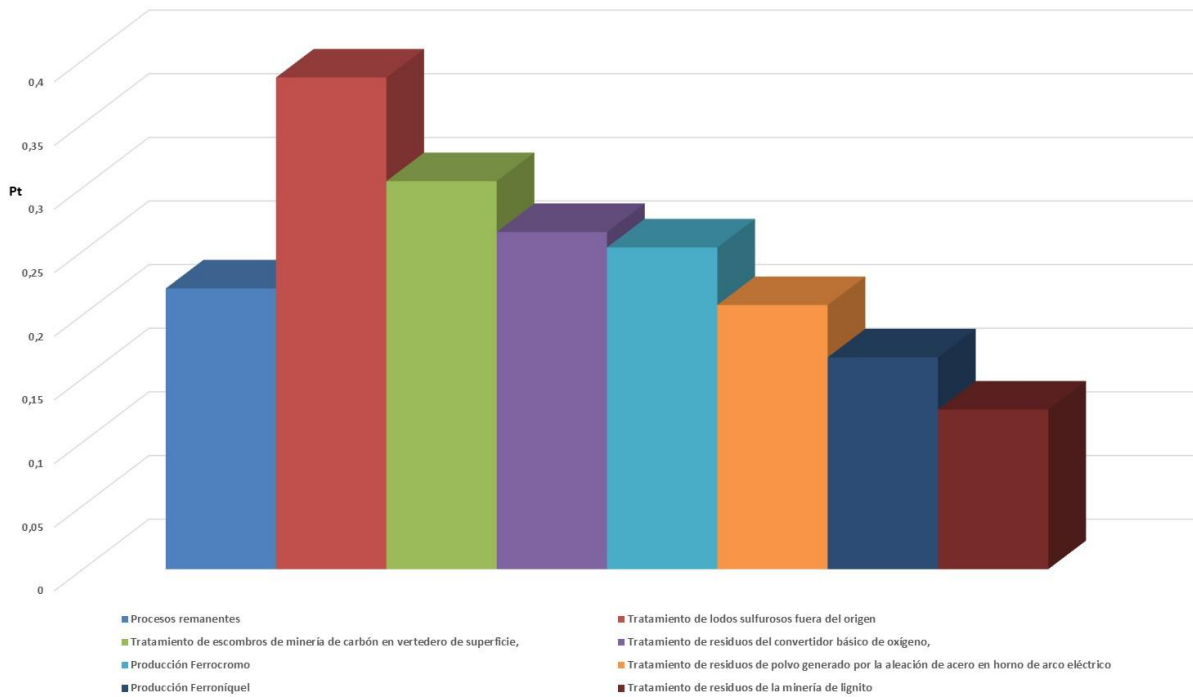


Figura 62: Contribución proceso AISI321. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la próxima figura 63 se observa el correspondiente diagrama de red para evaluación del daño (salud humana en daly), con un valor de corte del 8,5%. Como en el resto de los aceros, el presente valor de corte permite una visualización de los procesos principales. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede observarse, al igual que en el caso de los aceros ferríticos y austenítico AISI 347H, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 48,8% (influencia en el mercado) y 48,6% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 18,9% tanto en influencia en el mercado como en producción. Como tercer elemento se encuentra el arrabio, debido a su influencia en el mercado (8,87%) y producción (8,59%). Los valores observados en tanto por ciento se encuentran en la línea de los del resto de acero ferríticos y austenítico AISI 347H, estando más parejos a los correspondientes a los ferríticos P91 y P92. La producción de ferroníquel, que es la que genera un mayor impacto, está influenciada por los mismos procesos que en el caso de los aceros ferríticos y austenítico AISI 347H, manteniéndose las relaciones de influencia. También se observan las mismas influencias y contribuciones en la generación y tratamiento de residuos.

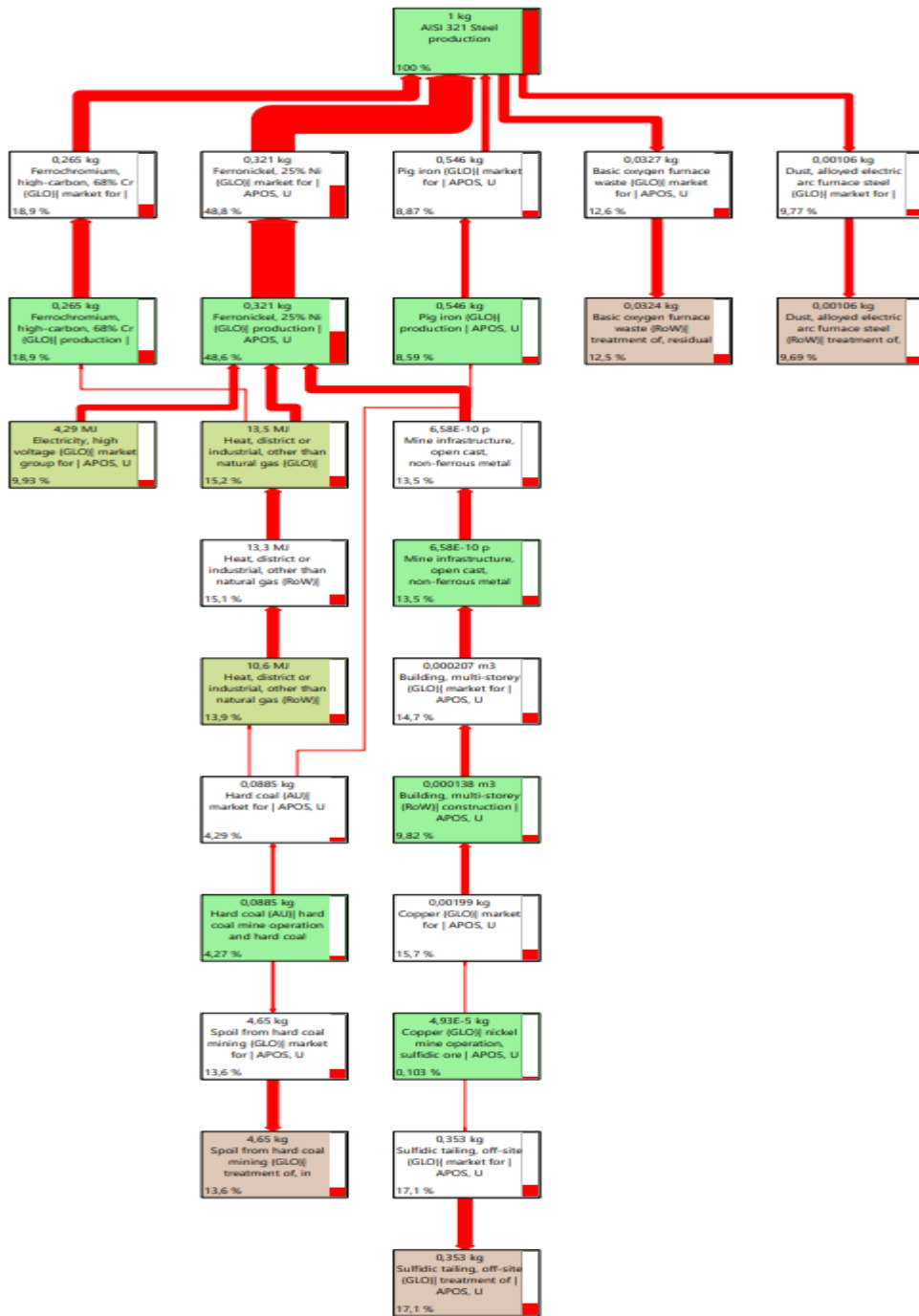


Figura 63: Red AISI321. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En vista de todo lo anterior y en función de los resultados obtenidos, puede concluirse que para el acero austenítico AISI 321 (del mismo modo que para los ferríticos y el austenítico AISI 347H) son los procesos de producción de ferróníquel, ferrocromo y arrabio mediante operaciones de combustión que implican consumo eléctrico y partiendo de la materia prima extraída en la mina los que generan un mayor impacto medioambiental para las categorías de impacto y áreas finales de daño analizadas.

Asimismo, tanto para este acero austenítico AISI 321 como para el AISI 347 y los ferríticos P91, P92 y VM12 es importante la participación del ferrocromo en el área de daño de la salud humana, así como en las categorías de impacto de formación de partículas y de toxicidad humana carcinogénica, debido a la presencia del cromo. De igual forma, es reseñable la aportación del ferróníquel al área de daño de ecosistemas y a la categoría de impacto de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono, fundamentalmente derivado de los procesos de extracción y combustión de carbón empleados. El ferróníquel también contribuye con gran peso a las categorías de agotamiento de recursos minerales y combustibles fósiles, y por consiguiente al área de daño de recursos.

Por otro lado, el tratamiento de los residuos generados en la extracción y procesamiento de las materias primas empleadas genera una contribución a tener en consideración. Este comportamiento del AISI 321 es similar al del resto de sustratos: el austenítico AISI 347H y los ferríticos P91, P2 y VM12.

En lo que respecta a la comparativa del acero austenítico AISI 321 con los aceros ferríticos y el austenítico AISI 347H, los valores de los datos de caracterización y evaluación del daño son prácticamente idénticos en todos los casos. En lo que respecta a las puntuaciones únicas por categoría de impacto, área final de daño y contribución de procesos, mantienen las mismas tendencias que los aceros ferríticos y austenítico AISI 347H. Asimismo, al analizar el daño total en Pt asociado tanto a áreas finales de daño como a categorías de impacto, se comprueba que el acero austenítico AISI 321 es comparable a los aceros ferríticos, que tienen menor valor que el austenítico AISI 347H. Asimismo, este acero austenítico AISI 321 también genera un menor impacto ambiental en el área de recursos y en las categorías de agotamiento de recursos minerales que el austenítico AISI 347H. En dicha área y categoría el comportamiento medioambientalmente más favorable correspondería al ferrítico P92. Por otro lado, cabe mencionar que el comportamiento ambiental de todos los ferríticos es bastante similar, pero se observa un mayor daño ambiental asociado al VM12.

4.3.- Recubrimientos y métodos de aplicación empleados

Una vez revisados los aceros y analizados los resultados de sus ACV correspondientes, se presentan a continuación los recubrimientos seleccionados para el estudio de ACV junto con los mencionados aceros: NiCr, CrN/NbN y slurry de aluminio. Se incluye para cada uno de ellos detalles de su composición, el proceso y el equipo empleados en su deposición en el sustrato correspondiente, así como indicaciones del espesor del recubrimiento y el tratamiento térmico necesario en caso de que aplique.

Los mencionados recubrimientos han demostrado su eficacia tras haber sido testados en condiciones de operación, en particular su contribución al aumento de resistencia de los sustratos expuestos a corrosión y oxidación en vapor de agua tanto en condiciones supercríticas como ultrasupercríticas.

Se muestra seguidamente en la tabla 15 la información referida sobre los recubrimientos. Por otro lado, en los siguientes apartados 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3 se aportan más detalles sobre cada tipo de recubrimiento, con carácter previo a la realización de los ACV sustrato-recubrimiento y exposición de los resultados obtenidos.

Material	Composición	Sustratos	Proceso	Equipo	Espesor	Tratamiento Térmico	
						Temperatura	Tiempo
NiCr	Ni50Cr50	P91 P92	HVOF	HVOF	100 micras	No	No
CrN / NbN	- N: 51,38% - Cr: 26,17% - Nb: 22,45%	P92	HIPIMS / PVD	HIPIMS / PVD	6 micras	No	No
Slurry Al	- Al en polvo: 25%-50%. - Cr ₂ O ₃ : 2.5%-10% - H ₃ PO ₄ : 10%-25% -H ₂ O y H ₂ CrO ₄ (disolvente, hasta balance)	P91 P92 VM12 AISI 347H AISI 321	Pintado	Cabina de pintura	50 micras	700°C	10h

Tabla 15: Recubrimientos designados para la realización de la tesis y características de los mismos.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles

4.3.1.- Recubrimiento de NiCr por HVOF

Desde hace varios años se han utilizado con éxito recubrimientos de NiCr en sustratos de acero inoxidable utilizando una técnica de oxidación de alta velocidad para aplicaciones de corrosión. Estos recubrimientos se caracterizaron por medio de un microscopio óptico, un analizador de imágenes, un microscopio electrónico de barrido y una difracción de rayos X (DRX). Se usó un probador de microdureza para determinar las propiedades mecánicas del recubrimiento. Las observaciones microestructurales señalaron que las capas de NiCr poseían porosidad, partículas oxidadas, no fundidas y semielaboradas e inclusiones. Los resultados de DRX indicaron que la fase sobresaliente del polvo y recubrimiento de NiCr fue Ni. También se descubrió que los valores de microdureza disminuyeron del recubrimiento al sustrato²⁴³.

En una primera serie de experimentos, se observó que recubrimientos de Ni20Cr y Ni50Cr depositados en aceros T91 tanto por APS (Atmospheric Plasma Spraying – Rociado de plasma atmosférico) como por HVOF²⁴⁴ habían demostrado buena resistencia a la oxidación por vapor hasta 750°C durante al menos 1.000 h. Sin embargo, en el rango de temperaturas de 700 y 750°C, el Fe se difundía desde el sustrato hacia el recubrimiento en Ni20Cr y el Ni se difundía en el sustrato. Se observó un comportamiento similar para Ni50Cr, pero en una extensión significativamente menor.

Otros experimentos posteriores²⁴⁵ demostraron que recubrimientos de Ni20Cr depositados en aceros P92 por HVOF y testados a 650°C bajo vapor puro durante períodos de al menos 10.000 h. no mostraban signos de degradación a la vez que formaban capas de óxidos protectores de Cr₂O₃. Tampoco mostraban evidencia de agotamiento de Cr cerca de la interfaz de la capa protección; el contenido de Cr permanecía sin cambios excepto en la zona cercana a la interfaz recubrimiento/sustrato donde tenía lugar algo de interdifusión. En la siguiente figura puede comprobarse el aspecto de una sección transversal de Ni20Cr depositado por HVOF después de exposición al vapor durante 10.000h a 650°.

²⁴³ Ak N.F., Tekmen C., Ozdemir I., Soykan H.S., Celik E., “NiCr coatings on stainless steel by HVOF technique”, Surface and Coatings Technology, Volumes 174–175, pp. 1070-1073, sept–oct 2003.

²⁴⁴ Sundararajan T., Kuroda S., Itagaki T., Abe F., “Thermal spray: advancing the science and applying the technology”, pp. 495–502, Materials Park, OH, ASM International, 2003.

²⁴⁵ Agüero A., “Progress in the development of coatings for protection of new generation steam plant components”, Energy Materials 3:1, pp. 40-41, 2008. <http://dx.doi.org/10.1179/174892407X248554>

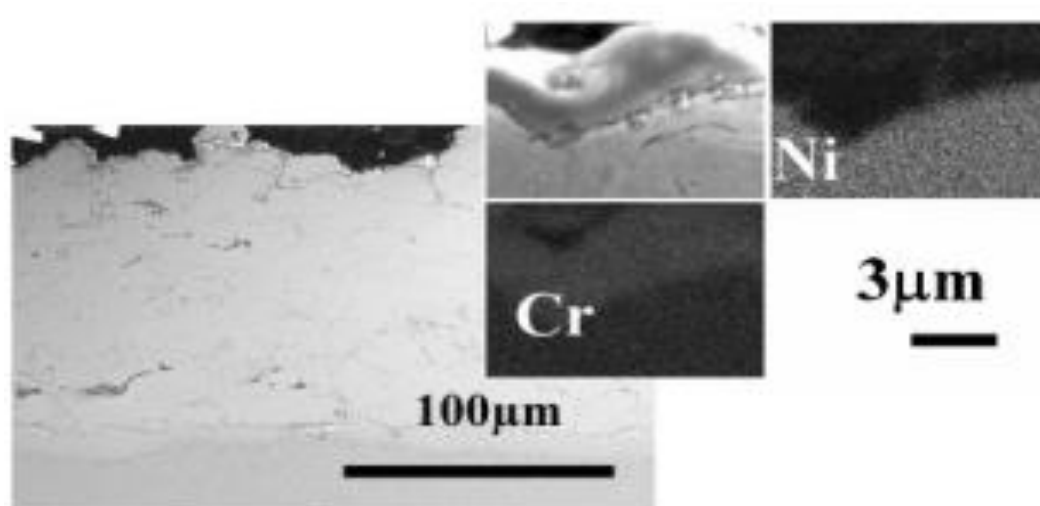


Figura 64: Sección transversal de Ni20Cr depositado por HVOF después de exposición al vapor durante 10.000h a 650°C.
Fuente: Agüero A., (2008)

Al mismo tiempo, otros estudios²⁴⁶ se centraban en demostrar las diferencias entre los mecanismos de degradación entre los recubrimientos Ni20Cr y Ni50Cr, empleando espesores de recubrimientos de 100 µm. En estos casos, la principal diferencia observada corresponde a la presencia de carburos de Cr el recubrimiento Ni50Cr.

Trabajos más recientes²⁴⁷ con recubrimientos de NiCr50 depositados mediante la técnica HVOF sobre sustratos de acero ferrítico de baja aleación (2.25Cr-1Mo) han sido llevados a cabo para mejorar su desempeño en ambientes de vapor de alta temperatura. Se estudiaron parámetros para optimizar la resistencia a la corrosión de los revestimientos. Para ellos se realizaron ensayos térmicos a alta temperatura a 650° C en diferentes atmósferas de CO₂ (aire con 0, 15 y 25% vol. de CO₂) así como ensayos de ciclos térmicos con pruebas en aire a 550°C y 650°C para estudiar la efectividad del sistema de protección del recubrimiento. No se produjo oxidación en los sustratos con recubrimientos y se obtuvo una reducción de 10 veces en términos de cambio de peso por unidad de área en el acero revestido después de 360 h de prueba con respecto al acero sin recubrimiento.

²⁴⁶ Durham R.N., Singheiser L., Quadackers W.J., “*Identification of degradation mechanisms in coatings for supercritical steam applications*”, *Materials and Corrosion* 59, No.5, pp. 402-407, 2008. DOI: 10.1002/maco.200804122.

²⁴⁷ López A.J., Proy M., Utrilla V., Otero E., Rams J., “*High-temperature corrosion behavior of Ni-50Cr coating deposited by high velocity oxygen-fuel technique on low alloy ferritic steel*”, *Materials and Design* 59, pp. 94-102, 2014.

En la actualidad, se siguen realizando estudios para evaluar el comportamiento frente a la corrosión y la oxidación a altas temperaturas de este tipo de recubrimientos y procesos de deposición, así como de recubrimientos y procesos de similares características en entornos industriales. Como ejemplos ilustrativos pueden citarse recubrimientos de base NiCrSiB reforzados con Al₂O₃ y WC-Co aplicados mediante HVOF en aceros inoxidable SS304²⁴⁸, recubrimientos de alúmina mediante spray de plasma con recubrimiento intermedio vínculo de Ni50Cr depositado por HVOF en aleaciones Inconel 600²⁴⁹, recubrimientos de polvo de Ni80Cr20 depositados por HVOF en aceros inoxidable 316L²⁵⁰ o recubrimientos de FeCrAl, NiCr, NiCrAlY and A625 depositados mediante HVOF en aceros T92 para entornos simulados de calentamiento de biomasa²⁵¹ (en este último caso los mejores resultados correspondieron al recubrimiento de NiCr).

Puede concluirse que existe una gran variedad de recubrimientos comerciales en distintos formatos que son válidos para ser aplicados mediante la técnica de HVOF. Para el caso que nos ocupa en el presente trabajo, se observa que la Compañía Sulzer Metco dispone de los productos comerciales Metco 8452 (Ni50Cr) y Metco 8450 (Ni20Cr), con la composición de 50 y 20% de Cr en peso.

Nótese que este tipo de recubrimientos depositados mediante HVOF pueden dividirse en varios grupos. Los mencionados Ni50Cr y Ni20Cr pertenecerían al grupo de aquéllos que tienen una composición elevada en cromo, los cuales presentan un muy buen comportamiento frente a oxidaciones a altas temperaturas gracias a la película de Cr₂O₃, que le dota de protección; además, se trata de recubrimientos muy tenaces debido a la presencia de Ni, si bien hace que el precio aumente. También existe un grupo de recubrimientos ricos en aluminio, en los que también se observa un muy buen comportamiento frente a oxidaciones a altas temperaturas gracias a la formación de una película externa de Al₂O₃ que ofrece protección.

²⁴⁸ Ayyappan S.P., Arun A., “High-temperature oxidation and erosion of HVOF sprayed NiCrSiB/Al₂O₃ and NiCrSiB/WC Co coatings”, Applied Surface Science Advances Volume 7, febrero 2022, 100191.

²⁴⁹ Shankar A.R., Georg, R.P., Philip J., “Evaluation of Thermal Cycling Performance of Plasma Sprayed Alumina Coating on Inconel 600 with Different Bond Coats”, Journal of Material Engineering and Performance 31, pp. 4406–4418, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06545-y>.

²⁵⁰ Binal G., “Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750 °C”, Surface and Coatings Technology Volume 454, 15 febrero 2023, 129141.

²⁵¹ Pidcock A., Mori S., Sumner J., et al. “High Temperature Corrosion of HVOF Coatings in Laboratory-Simulated Biomass Combustion Superheater Environments”, High Temperature Corrosion of Materials 99, pp. 101–115, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11085-022-10141-3>

Para otros casos, existen recubrimientos con otros elementos menos comunes, véase Co, que ofrecen consistencia y tenacidad²⁵².

En base a todo lo anterior, el recubrimiento de Ni50Cr aplicado mediante HVOF se presenta como una de las mejores opciones para su utilización en la fabricación de las turbinas de vapor supercrítico, con buenos resultados comprobados experimentalmente.

²⁵² Nicholls J.R., “*Designing oxidation resistant coatings*”, JOM, pp.52(1), 28-35, 2000.

4.3.2.- Recubrimiento de CrN/NbN por HiPIMS

Se ha demostrado que los recubrimientos en capas únicas que tienen una combinación de nitruros de cromo y niobio (CrN/NbN) no sólo son resistentes a la corrosión acuosa y a la erosión por corrosión y tienen excelentes propiedades tribológicas, sino que también tienen resistencia a atmósferas oxidantes con aire seco hasta un entorno de 850°C. La novedosa tecnología para la deposición conocida como High Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS) se ha utilizado para depositar CrN / NbN con una adhesión mejorada y una microestructura muy densa, comprobado mediante Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM). Estas propiedades de recubrimiento superiores se logran debido al alto contenido único de iones metálicos (hasta 90%) en el plasma HIPIMS, que permite la aceleración de partículas y el control de trayectoria por campos eléctricos y magnéticos externos, lo que proporciona un flujo de material altamente energético en la superficie de condensación. Se han realizado experimentos²⁵³ con muestras desnudas y recubiertas de P92, las cuales se oxidaron a 650 ° C en una atmósfera de vapor al 100% hasta 2000 h, con el fin de simular las condiciones a las que operarían las turbinas de vapor utilizadas en las centrales eléctricas. La cinética a la que se produjo la oxidación se evaluó mediante mediciones de ganancia de masa. En estas condiciones, CrN / NbN proporcionó una protección confiable del acero P92.

Otros trabajos²⁵⁴ han evaluado la resistencia a la oxidación de recubrimientos CrN / NbN con deposición mediante PVD-HIPIMS, estudiando el efecto del acabado de superficie en el sustrato, así como qué papel ha desempeñado el contenido de niobio en la composición del recubrimiento. Para este caso, se trataba de películas nano-multicapa de CrN / NbN sobre acero P92 que fueron probadas a 650°C en atmósfera de vapor puro. La ganancia de masa se midió a intervalos fijos para estudiar su oxidación cinética. La morfología y el grosor de las nanoescalas se midieron con microscopía electrónica de transmisión. Se realizó caracterización para los recubrimientos antes y después del tratamiento termal aplicado con espectroscopía y difracción de rayos X.

²⁵³ Hovsepian P.E., et al., “Performance of HIPIMS deposited CrN/NbN nanostructured coatings exposed to 650 °C in pure steam environment”, Materials Chemistry and Physics, Volumes 179, pp. 110-119, 2016.

²⁵⁴ Illana A., Mato S., Ehiasarian A., Purundare Y., Lasant M.I., de Miguel M.T., Hovsepian P., Pérez Trujillo F.J., “Substrate Finishing and Niobium Content Effects on the High-Temperature Corrosion Resistance in Steam Atmosphere of CrN/NbN Superlattice Coatings Deposited by PVD-HIPIMS”, Oxid Met, Springer Science + Business Media New York, 2017. DOI 10.1007/s11085-016-9701-5

La conclusión obtenida para el trabajo anterior fue que todos los recubrimientos incrementaron la resistencia frente a condiciones de oxidación del material del sustrato, pero el mejor comportamiento fue exhibido por el CrN / NbN con alto contenido de niobio y depositado en el sustrato con el mejor acabado superficial. Los análisis SEM-EDX y XRD han revelado la presencia de los recubrimientos de CrN / NbN intactos (independientemente del contenido de Nb) y de óxidos ricos en Fe en la superficie de los recubrimientos con un acabado superficial de sustrato rugoso. Se cree que las discontinuidades formadas debido a la superficie rugosa del sustrato y los defectos relacionados con la contaminación son los motivos de la interdifusión de Fe desde el sustrato. Por el contrario, los recubrimientos con un acabado superficial fino del sustrato desarrollaron película de protección de Cr_2O_3 a nivel superficial la cual obstaculizaba completamente la difusión iónica de Fe. La composición del recubrimiento anterior con mejor comportamiento (alto contenido en Nb y mejor acabado superficial de sustrato) consistía en N: 51,38%; Cr: 26,17%; Nb: 22,45%. El espesor de la doble capa era de 1,9 nm. Para la preparación del sustrato se utilizó papel de lija de SiC (diámetro = 15,3 μm). El recubrimiento CrN / NbN con acabado superficial rugoso mostró un espesor medio de 10 μm , mientras que en el sustrato liso el espesor fue ligeramente menor, alrededor de 6 μm .

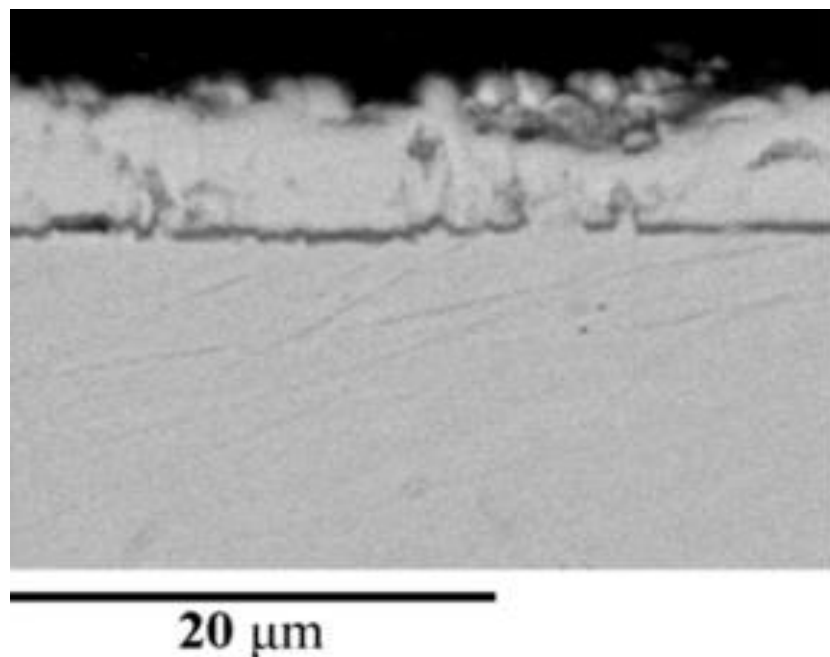


Figura 65: Micrografía SEM transversal del recubrimiento de CrN/NbN con alto contenido de Nb depositado en superficie de P92 con acabado superficial fino.

Fuente: Illana A., (2017)

Trabajos más recientes han estudiado en profundidad el comportamiento y los mecanismos de protección/degradación a largo plazo de estos nitruros de Cr y Nb depositados mediante HIPIMS en sustratos ferríticos P92 y condiciones de vapor de agua a 650°C, analizando el efecto del contenido de Nb en el sustrato y en la formación de óxidos protectores de Cr y Nb²⁵⁵.

También se han realizado experimentos para analizar la resistencia asociada a la tribocorrosión (desgaste por rozamiento y corrosión) en esta tipología de recubrimientos²⁵⁶. Por otro lado, las investigaciones más actuales están orientadas en la línea de análisis de la estructura y propiedades mecánicas y tribológicas en función del espesor de recubrimientos de CrN_x²⁵⁷, también depositados por HIPIMS.

Cabe destacar que este recubrimiento y método de deposición corresponde al más novedoso de entre los seleccionados para el presunte estudio, y constituye la opción con el menor espesor de recubrimiento. Se optará por la opción de composición del recubrimiento con mejor comportamiento (alto contenido en Nb y mejor acabado superficial de sustrato), consistente en N: 51,38%; Cr: 26,17%; Nb: 22,45%.

²⁵⁵ Agüero A., Juez-Lorenzo M., Hovsepian P.E., Ehasarian A.P., Purandare Y.P., Muelas R., “*Long-term behaviour of Nb and Cr nitrides nanostructured coatings under steam at 650 °C. Mechanistic considerations*”, Journal of Alloys and Compounds, Volume 739, pp. 549-558, 30 marzo 2018.

²⁵⁶ Purandare Y.P., Robinson G.L., Ehasarian A.P., Hovsepian P.E., “*Investigation of High-Power Impulse Magnetron Sputtering deposited nanoscale CrN/NbN multilayer coating for tribocorrosion resistance*”, Wear, Volumes 452–453, 15 julio 2020, 203312.

²⁵⁷ Luo C.W., et al. “*Structure, mechanical and tribological properties of thick CrN_x coatings deposited by HiPIMS*”, Vacuum, Volume 203, septiembre 2022, 111253.

4.3.3.- Recubrimiento de Al (slurry)

Para llevar a cabo de forma exitosa el proceso de deposición del recubrimiento de slurry de Al, debe conocerse de modo exhaustivo cómo se comporta desde un punto de vista químico el Al, así como la acción del medio y características del material recubierto.

Debe comentarse que el Al es un material con gran resistencia a la corrosión en condiciones atmosféricas, así como en un gran rango de temperaturas y medios, siendo de este modo un buen candidato para ser utilizado en recubrimientos. Presenta una gran actividad, lo cual puede inferirse a raíz de su situación en la serie electroquímica de potenciales normales, pasivándose al exponerse al aire o al agua. La formación de una capa de óxido con gran densidad y delgadez tiene lugar cuando reacciona con vapor de agua o con el oxígeno del aire. Esta capa pasiva que se origina debido al contacto con el aire presenta espesores entre 20 y 100 Å²⁵⁸. En bastantes medios oxidantes, en caso de deterioro de la capa pasiva, ésta puede volver a rehabilitarse con gran rapidez. El óxido de la capa pasiva cuenta con un volumen molecular de 1,5 veces mayor que el correspondiente a la capa de aluminio, trabajando por tanto en situación de compresión. Debido a esto es capaz de resistir cierto grado de deformación del sustrato, pero no fracturarse. Por tanto, todas las circunstancias que contribuyan a potenciar la adhesión y la no alternación de esta capa también estarán aumentando su resistencia frente a la corrosión. De manera inversa a lo que ocurre otras capas de óxido que se forman en otros metales, la capa de óxido delgada, densa y aislante del aluminio proporciona un alto grado de adhesión y confiere un alto grado de protección al metal

De forma frecuente, el Al es muy resistente frente a atmósferas corrosivas en los medios reseñados a continuación: hidróxido amónico, ácido acético y gran parte de ácidos orgánicos, ácidos grasos, ácido nítrico con riqueza mayor al 80 %, agua destilada, atmósfera no marina, azufre y atmósferas sulfurosas. Por el contrario, la resistencia a la corrosión del aluminio es menor en ácidos fuertes (tales como clorhídrico, fluorhídrico, sulfúrico...), mercurio y sus sales, agua de mar, agua con metales pesados ionizados, disolventes clorados y alcoholes a temperaturas elevadas²⁵⁹.

²⁵⁸ Baile Puig M., “*Estudio de Conformación de Componentes Aluminio-Silicio en Estado Semisólido*”, Universitat Politècnica Catalunya. Departament Ciència dels Materials i Enginyeria Metallúrgica, 2005.

²⁵⁹ García Martínez M., “*Desarrollo de recubrimientos base aluminio mediante mocvd para protección frente a la corrosión y a la oxidación*”, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, 2013.

En lo que concierne a los recubrimientos de aluminio, existen evidencias constatadas de su buen comportamiento frente a la corrosión y la oxidación. Debe comentarse que la resistencia de los recubrimientos de slurry de aluminio en aceros ferríticos tipo P22, P23 y P92 expuestos a oxidación en vapor de agua a 650°C hasta 7000 horas de exposición ya había sido probada con buenos resultados. En estas condiciones, la falta de semejanza en composición de los aceros no generaba afectación a la resistencia proporcionada por el slurry de aluminio, indicando que ni el Cr ni otros elementos con menor presencia tienen una importancia destacada en los mecanismos de protección²⁶⁰. Asimismo, experimentos como los desarrollados dentro del proyecto europeo "SUPERCOAT" (Recubrimientos para ciclos de vapor supercríticos) se centraron en el objetivo de desarrollar nuevos aceros o proteger aceros de alta resistencia a la fluencia para permitir el funcionamiento de turbinas de vapor a 650°C de cara a aumentar la eficiencia. Los trabajos²⁶¹ se concentraron en el desarrollo de recubrimientos para soportar 50.000 - 100.000 h de funcionamiento a 650° C bajo vapor de alta presión. En estas condiciones, los recubrimientos de slurry de Al sobre aceros ferríticos-martensíticos (incluido el P92) producidos mediante la aplicación de una suspensión de Al seguida de tratamiento térmico de difusión (700°C a lo largo de 10 horas mediante flujo de argón o vacío, y un rango de espesor de 50-60 µm), demostraron su carácter protector a 650°C bajo vapor durante al menos 32.000 h de exposición al vapor de laboratorio a presión atmosférica. Aunque se observaron algunas grietas, éstas no se propagaron durante la exposición al vapor o al ciclo térmico y no aparecieron nuevas grietas. Asimismo, no se detectaron cambios en las tensiones residuales después del ciclo térmico. Se realizó una caracterización microestructural de muestras mediante SEM-EDS y XRD en diferentes periodos de exposición. El principal mecanismo de degradación del recubrimiento fue la pérdida de Al en la superficie debido a la difusión hacia adentro. La microdureza junto con el módulo de Young y la resistencia a la fractura se midieron utilizando técnicas consolidadas. Los recubrimientos mostraron una ductilidad razonable (1.6% aprox.) cuando se sometieron a cambios entre temperatura ambiente y 400 ° C, así como incrementos más altos, lo que proporcionaba evidencia de que los recubrimientos son aptos para soportar las condiciones mecánicas de servicio.

²⁶⁰ Agüero A., Muelas R., "Steam oxidation of Slurry Aluminide Coatings on Ferritic Steels for Advanced Coal-Fired Steam Power Plants", Materials Science Forum Vols 461-464, pp. 957-964, 2004.

²⁶¹ Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S., "Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components", Surface & Coatings Technology 200, pp. 1219-1224, 2005.

En lo que respecta a la microestructura del slurry de Al después del tratamiento de difusión, fue percibida una capa compuesta de una capa exterior gruesa con Fe_2Al_5 con precipitados ricos en Cr y una capa de FeAl más delgada. Debajo de esta capa, se encontró una zona de interdifusión de 4 a 5 μm con AlN y precipitados aciculares. Estos precipitados resultaban del N presente en el sustrato (0.046% en peso) y no de difusión hacia el interior (desde el aire), ya que no están presentes en sustratos con un contenido de N inferior al 0,01% en peso. La superficie del recubrimiento era muy rugosa en comparación con similares recubrimientos depositados por CVD o pack cementation.

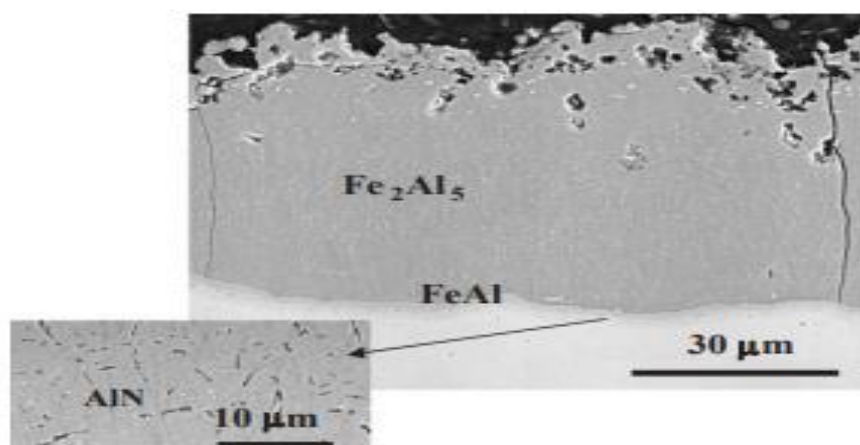


Figura 66: Sección transversal SEM de un revestimiento de suspensión de Al depositado sobre P92 después de tratamiento térmico de difusión de 700°C 10 h bajo Ar.

Fuente: Agüero A., et al (2005)

Posteriores desarrollos en aceros P91 y P92 demostraron que los recubrimientos de slurry de Al seguidos de un tratamiento térmico de difusión (700°C a lo largo de 10 horas, y un rango de espesor entre 40-100 μm) protegían los sustratos al menos 41.000 horas en condiciones de 650°C²⁶². También se observaba una degradación por la interdifusión revestimiento-sustrato que conducía a una disminución en la concentración de aluminio en la zona superficial, a una deposición de los precipitados de AlN en el sustrato y al desarrollo de la porosidad de Kirkendall en la interfaz recubrimiento-sustrato. Sin embargo, basados en los datos experimentales de la oxidación por vapor a largo plazo, la vida del recubrimiento se estimaba que superara las 78.000 h. Aunque se formaran grietas de alivio del estrés en estos recubrimientos, no se propagaban en el sustrato incluso cuando el recubrimiento estaba sujeto a ciclos térmicos extremos.

²⁶² Agüero A., Muelas R., Gutiérrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P., "Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components", Surface & Coatings Technology 201, pp. 6253-6260, 2007.

Se pone de manifiesto que el aluminio del recubrimiento es consumido de dos formas: una porción crea la capa superficial de alúmina, y la otra experimenta difusión interna cuando tiene lugar la oxidación²⁶³. Asimismo, se verifica que con los recubrimientos de Al es factible incrementar la resistencia a la oxidación en vapor de agua para aceros inoxidable austeníticos hasta más de 80 veces²⁶⁴, puesto que forman una capa superficial protectora, adherente y compacta, de óxidos de aluminio que ayuda a la formación de fases ricas en níquel y cromo bajo el recubrimiento. En este sentido también debe indicarse que recubrimientos de Al que fueron depositados sobre el acero inoxidable austenítico AISI 317 por Deposición Química de Vapor en Lecho Fluidizado (CVD-FBR) presentaron a temperaturas elevadas una disminución en la velocidad de corrosión superior a 80 veces²⁶⁵. Esta caracterización mecánica de los recubrimientos se realizó a través de microdureza y nanoindentación, de cara a evaluar la afectación de las propiedades mecánicas (especialmente dureza y módulo de Young) del recubrimiento y sustrato después de someterse a oxidación a alta temperatura. Asimismo, se realizaron análisis a través de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB), con el fin de comprobar las variaciones microestructurales, y de Microscopia de Fuerza Atómica (MFA).

En cuanto a estudios y tendencias actuales de este recubrimiento a estudio, puede hacerse referencia a lo siguiente: adición de Si a slurries de Al para mejorar la resistencia a ciclos térmicos debido a las propiedades de interdifusión²⁶⁶ o estudios del comportamiento frente a la corrosión en aceros ferríticos P92 y T22 de los recubrimientos de slurry Al en atmósfera de CO₂, H₂O, N₂, HCl y SO₂, tanto a escala de laboratorio como en planta piloto²⁶⁷.

²⁶³ Marulanda Arévalo J.L, Pérez Trujillo F.J, Remolina Millán A., “Recubrimientos de aluminio-silicio realizados por deposición química de vapor en lecho fluidizado sobre el acero inoxidable AISI 316”. Revista Facultad de Ingeniería, Uptc, Vol. 22, N.º 34. enero-junio de 2013.

²⁶⁴ Marulanda Arévalo J.L, Pérez Trujillo F.J., Castañeda Quintana S.I., “Behaviour of aluminum coating by CVD-FBR in steam oxidation at 700 °C”, CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro, vol. 5, n.º 4, pp. 77-86. 2014.

²⁶⁵ Pérez Muñoz D., Marulanda Arévalo J.L., Meza Meza J.M., “Caracterización mecánica de recubrimientos de aluminio por CVD-FBR sobre aceros inoxidables y resistencia a la oxidación en vapor de agua”, Fac. Ing., vol. 24 (40), pp. 9–16, sep.-dic. 2015.

²⁶⁶ Agüero A., Landeira M.J., Hansson A.N., Gutierrez M., “Thermal cyclic resistance and long term inter-diffusion properties of slurry aluminide coatings modified with Si”, Results in Surfaces and Interfaces, Volume 6, 1 febrero 2022, 100042.

²⁶⁷ Gutiérrez M., Illana A., Bahillo A., Benito M.J., García-Martín G., Pérez F.J., Agüero A., “Comparison between pilot and lab scale testing of aluminide coated and uncoated ferritic steels under oxy-fuel and coal/thistle co-firing conditions”, Surface and Coatings Technology, Volume 450, 25 noviembre 2022, 128982.

También se han realizado experimentos relativos a recubrimientos de Slurry Al depositados mediante pack cementation en aceros T92 para análisis de resultados de fluencia²⁶⁸ o estudio de la resistencia de recubrimientos de Slurry Al depositados en Ni puro bajo condiciones de corrosión a 700°C²⁶⁹.

De forma habitual, los recubrimientos de Slurry Al son frecuentemente adicionados mediante aplicación de pintura seguida de un proceso de curado a 560°C, previo a las operaciones de tratamiento térmico. Destaca el uso de las pinturas de la marca comercial IPCOTE, en concreto la codificada como IPCOTE 9183²⁷⁰ (de la firma británica Indestructible Paints), cuya composición se utilizará en el presente trabajo y que se detalla aquí:

- Cr₂O₃: 2.5%-10%
- H₃PO₄: 10%-25%
- Al en polvo: 25%-50%.
- El disolvente empleado es agua y ácido crómico diluido

Debe hacerse hincapié en que el presente recubrimiento de slurry de Al se trata del recubrimiento más estudiado de entre los seleccionados, con amplio uso en la fabricación de las turbinas supercríticas y con un método de deposición relativamente ágil y sencillo. Es por ello que su elección es imperativa para el estudio que nos ocupa.

²⁶⁸ Yaxin X., et al. “Mechanism of accelerating creep rupture under high stress level of pack cementation aluminide coatings deposited onto T92 steel tube”, Surface and Coatings Technology, Volume 455, 25 febrero 2023, 129212.

²⁶⁹ Grégoire B., et al. “Resistance of slurry aluminide coatings on pure nickel under different sulphidizing/Hot corrosion conditions at 700 °C”, Corrosion Science, Volume 216, 15 mayo 2023, 111092.

²⁷⁰ Pérez F.J., Castañeda S.I., “TG–mass spectrometry studies in coating design for supercritical steam turbines”, Materials and Corrosion 59, No.5, pp. 410, 2008. DOI: 10.1002/maco.200804123.

4.4.- Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de sustratos seleccionados, con los recubrimientos considerados

Como se ha comentado anteriormente, los recubrimientos empleados en los sustratos ferríticos y austeníticos aumentan la resistencia de estos frente a la oxidación y corrosión en ambientes con vapor de agua en condiciones supercríticas, ultrasupercríticas y ultrasupercríticas avanzadas.

En base a los datos de espesores de los recubrimientos disponibles en la bibliografía, se estimará la cantidad de recubrimiento necesario para cada unidad de funcional de sustrato (1 kg) evaluada, de cara a realizar el análisis de ciclo de vida del conjunto sustrato-recubrimiento de una forma homogénea. Asimismo, se tendrán en cuenta los datos relacionados con el proceso de deposición y/o tratamiento térmico empleado en cada caso, para incorporar todos los inputs disponibles al software Simapro; ello permitirá ajustar el análisis con toda la información existente de manera que los resultados sean lo más precisos posibles.

Para realizar el proceso de estimación de la cantidad de recubrimiento asociada a cada unidad funcional de sustrato, se han recopilado los datos de densidades de los sustratos y recubrimientos empleados. Véanse tablas 16 y 17, a continuación.

Sustrato	Densidad (kg/m ³)
P91	7770
P92	7850
VM12	7650
AISI 347H	8030
AISI 321	7900

Tabla 16: Densidades de los sustratos estudiados.
Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles

Recubrimiento	Densidad (kg/m ³)
Slurry Al (IPCOTE IP9183-R1)	1620 ± 20
NiCr (50)	8200
CrN / NbN	5900 / 8470

Tabla 17: Densidades de los recubrimientos estudiados.
Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles

A partir de estos datos, se plantea la hipótesis de partir de 1 kg de sustrato de forma cilíndrica con un radio de 2 cm. Mediante la fórmula de obtención del volumen del cilindro ($\pi R^2 h$ - siendo R el radio, h la altura) y teniendo en cuenta la fórmula de la densidad como cociente entre masa y volumen ($\rho = M/V$), se obtendrá la altura correspondiente a cada cilindro de 1 kg de sustrato. Véase al efecto la siguiente tabla 18 con el resumen de dichos datos.

Masa sustrato (M, en kg)	Volumen unidad funcional ($V = M/\rho$, en cm^3)	Altura cilindro de unidad funcional para R =2 cm ($h = V/\pi R^2$, en cm)
1 kg P91	128,70	10,25
1 kg P92	127,39	10,14
1 kg VM12	130,72	10,41
1 kg AISI 347H	124,53	9,92
1 kg AISI 321	126,58	10,08

Tabla 18: Correlación entre la masa, la densidad y el volumen del sustrato con la altura de un cilindro (R=2 cm) de unidad funcional de cada tipo.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles

Una vez calculada la altura, dicha dimensión permitirá posteriormente obtener la masa de recubrimiento asociada, en función del espesor y el volumen del recubrimiento en sí. Para este último paso, se empleará la fórmula de obtención de la superficie del cilindro ($2 \pi R h + 2 \pi R^2$), y se calculará el volumen del recubrimiento como producto de la superficie por el espesor. Finalmente, la masa del recubrimiento se obtendrá multiplicando el volumen de recubrimiento calculado por el dato de la densidad del recubrimiento en cuestión. Véase la tabla 19 presentada a continuación, donde se presentan los resultados obtenidos para cada configuración sustrato-recubrimiento en particular.

Sustrato y recubrimiento	Superficie cilindro de unidad funcional ($2 \pi R h + 2 \pi R^2$, en cm^2)	Volumen recubrimiento (Superficie cilindro · espesor recubrimiento, en cm^3)	Masa recubrimiento ($M = \rho V$, en g)
1 kg P91 + NiCr	153,86	1,5386	12,61652
1 kg P91 + Slurry Al	153,86	0,7693	1,246266
1 kg P92 + NiCr	152,4874	1,524874	12,50524
1 kg P92 + CrN/NbN	152,4874	0,09148704	0,6483396*
1 kg P92 + Slurry Al	152,4874	0,762392	1,234926
1 kg VM12 + Slurry Al	155,8696	0,779348	1,262466
1 kg AISI 347H + Slurry Al	149,7152	0,748576	1,21257
1 kg AISI 321 + Slurry Al	151,7248	0,758624	1,228932

* Se emplea densidad promedio para el recubrimiento de CrN/NbN en base a su composición óptima

Tabla 19: Correlación entre la superficie del cilindro de unidad funcional de sustrato, volumen y masa del recubrimiento.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles

En lo que respecta a los requerimientos energéticos de los procesos de deposición y a los tratamientos térmicos efectuados, se dispone de datos de consumo eléctrico derivados del Proyecto GENERA²⁷¹ relativo a la Generación y Estudio de Recubrimientos para la Protección de Materiales en Atmósferas Agresivas: Sostenibilidad y Eficiencia, liderado por la UCM, el INTA y el CIEMAT en el año 2017. En dicho proyecto se constató un consumo eléctrico de 2,5 kWh asociado al proceso de deposición mediante HVOF del recubrimiento de NiCr50 en varios aceros empleados como sustrato. También se evidenció un consumo eléctrico de 2,5 kWh en el tratamiento térmico efectuado a 700°C durante 10 horas para el slurry de Al después del pintado.

Por cuanto se refiere al recubrimiento de CrN/NbN, se ha tomado un valor de 26 kWh asociado al consumo eléctrico del equipo HIPIMS, teniendo en cuenta las técnicas más eficientes que emplean irradiación de iones metálicos y permiten rebajar el consumo energético total respecto a sistemas más tradicionales²⁷².

Con los datos recolectados hasta ahora se estará en disposición de efectuar el ACV de los sistemas sustrato-recubrimiento, cuyos resultados y conclusiones se presentan en el siguiente apartado.

²⁷¹ Agüero A., Pérez F.J., Bahillo A., “H2.5 Informe de evaluación comparativa de daños ambientales de recubrimientos”, Proyecto GENERA (Generación y Estudio de Recubrimientos para la Protección de Materiales en Atmósferas Agresivas: Sostenibilidad y Eficiencia), INTA, UCM, CIEMAT, 2017.

²⁷² Li X., Bahkit B., Johansson Joessaar M.P., Hultman L., Petrov I., Greczynski G., “*Toward energy-efficient physical vapor deposition: Routes for replacing substrate heating during magnetron sputter deposition by employing metal ion irradiation*”, Surface and Coatings Technology 415, 127120, pp. 8, 2021.

4.4.1.- Análisis de Ciclo de Vida de sustratos / NiCr

El Análisis de Ciclo de Vida de los sustratos ferríticos P91 y P92 con el recubrimiento de Ni50Cr se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad. Se ha partido de los valores de inventario existentes en las tablas 10 y 11 para los aceros P91 y P92 respectivamente, en base a la composición de elementos de dichos aceros y tomando como unidad funcional 1 kg. Asimismo, se han añadido los datos correspondientes al recubrimiento Ni50Cr ya mencionados y recogidos en la tabla 20 que se muestra a continuación. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en los sustratos y recubrimiento de estudio de cara a analizar su comportamiento conjunto. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Masa Sustrato	Masa total recubrimiento Ni50Cr	Masa Ni	Masa Cr	Consumo Eléctrico HVOF
1 kg P91	12,61652 g	6,30826 g	6,30826 g	2,5 kWh
1 kg P92	12,50524 g	6,25127 g	6,25127 g	2,5 kWh

Tabla 20: Datos recubrimiento Ni50Cr.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles.

Como en el caso de los ACV realizados únicamente a los sustratos, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent. Se presentan a continuación dichos resultados desglosados para cada sustrato, P91 y P92, junto con el recubrimiento Ni50Cr aplicado por HVOF.

4.4.1.1- Acero ferrítico P91 / NiCr

La combinación de sustrato-recubrimiento P91-Ni50Cr ofrece los datos correspondientes a la Figura 67 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

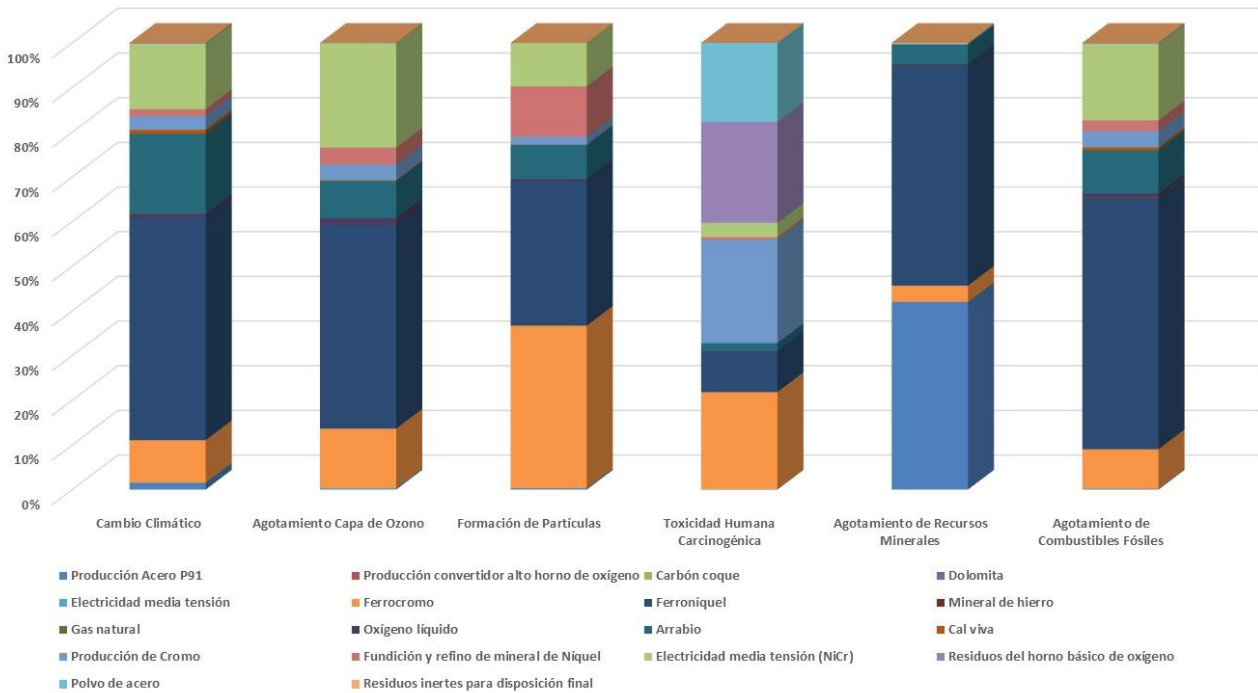


Figura 67: Análisis de impacto P91 + NiCr. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicho gráfico puede observarse la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de Cr correspondiente al recubrimiento afecta de forma importante a la toxicidad humana carcinogénica y en menor medida a otras categorías como agotamiento de la capa de ozono y combustibles fósiles. La fundición y refinado de Ni impacta en la formación de partículas de forma más significativa, mientras que la electricidad asociada al proceso del recubrimiento produce afectación al agotamiento de la capa de ozono y combustibles fósiles, cambio climático y formación de partículas. Siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferroníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. Dicho proceso específico de producción del acero P91 sólo tiene influencia destacable en el agotamiento de recursos minerales. Todo ello puede constatarse en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 68, donde se representa la evaluación del daño.

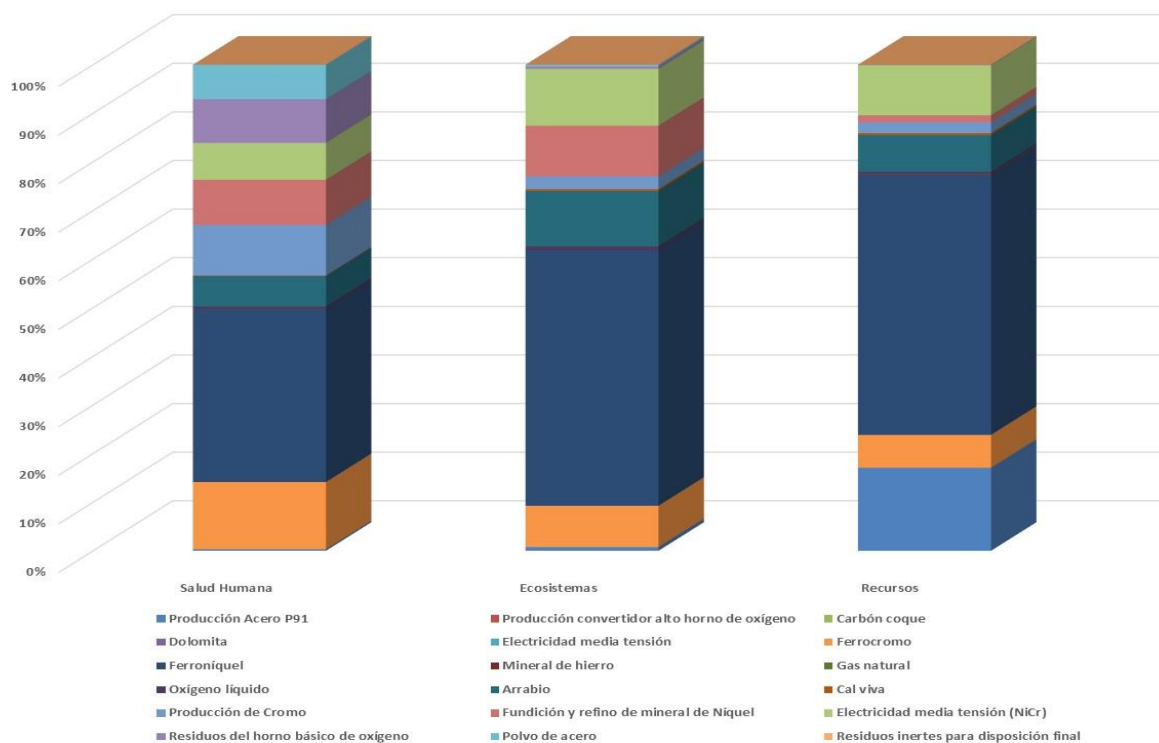


Figura 68: Análisis de impacto P91 + NiCr. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la gráfica 68 se aprecia que la producción de Cr afecta en mayor medida al área de la salud humana mientras que la fundición y refinado de Ni lo hace al área de ecosistemas, al igual que la electricidad empleada en el recubrimiento (que también afecta significativamente al área de recursos). En la gráfica de la figura 69, correspondiente al análisis de impacto para la puntuación única por categoría de impacto, se observan las mismas consideraciones que en el caso del sustrato desnudo; además de ello, aparecen los procesos relativos a la producción de Cr, fundición y refinado de Ni y uso de electricidad de media tensión asociada a la deposición del recubrimiento. Dichos procesos generan un impacto en las principales categorías: la producción de Cr lleva asociado 0,2 Pt a toxicidad humana carcinogénica y 0,007 Pt de cambio climático; la fundición y refinado de Ni lleva asociado 0,005 Pt de formación de partículas, así como 0,004 Pt de toxicidad humana carcinogénica y 0,003 Pt de cambio climático; el uso de electricidad de media tensión para el recubrimiento lleva asociado 0,03 Pt de cambio climático, así como 0,02 Pt de toxicidad humana carcinogénica y 0,004 de formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

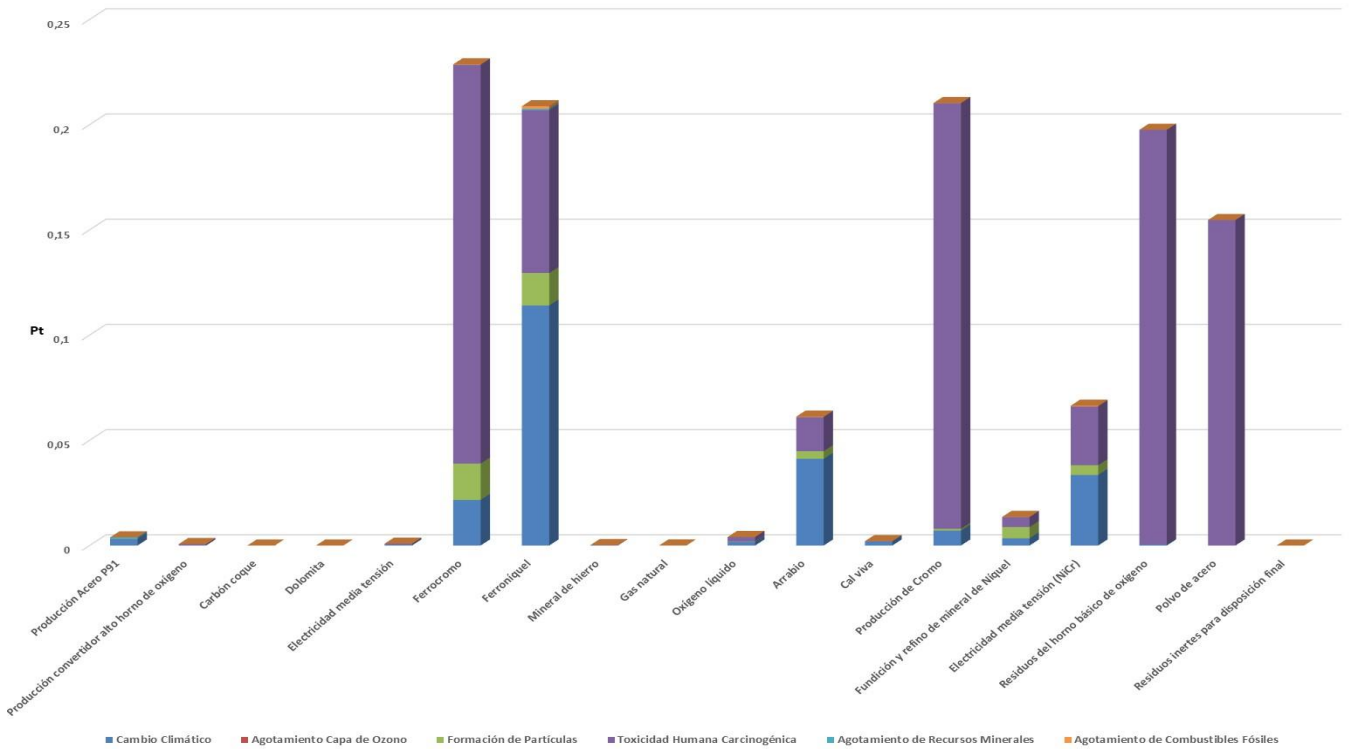


Figura 69: Análisis de impacto P91 + NiCr. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 70), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. Se observan las mismas consideraciones que en el caso del sustrato desnudo; además de ello, aparecen los procesos relativos a la producción de Cr, fundición y refinado de Ni y uso de electricidad de media tensión asociada a la deposición del recubrimiento. Dichos procesos generan un impacto en las áreas finales de daño: la producción de Cr lleva asociado 0,22 Pt de salud humana y 0,005 Pt de ecosistemas; la fundición y refinado de Ni lleva asociado 0,20 Pt de salud humana, así como 0,02 Pt de ecosistemas; el uso de electricidad de media tensión para el recubrimiento lleva asociado 0,16 Pt de salud humana, así como 0,02 Pt de ecosistemas.

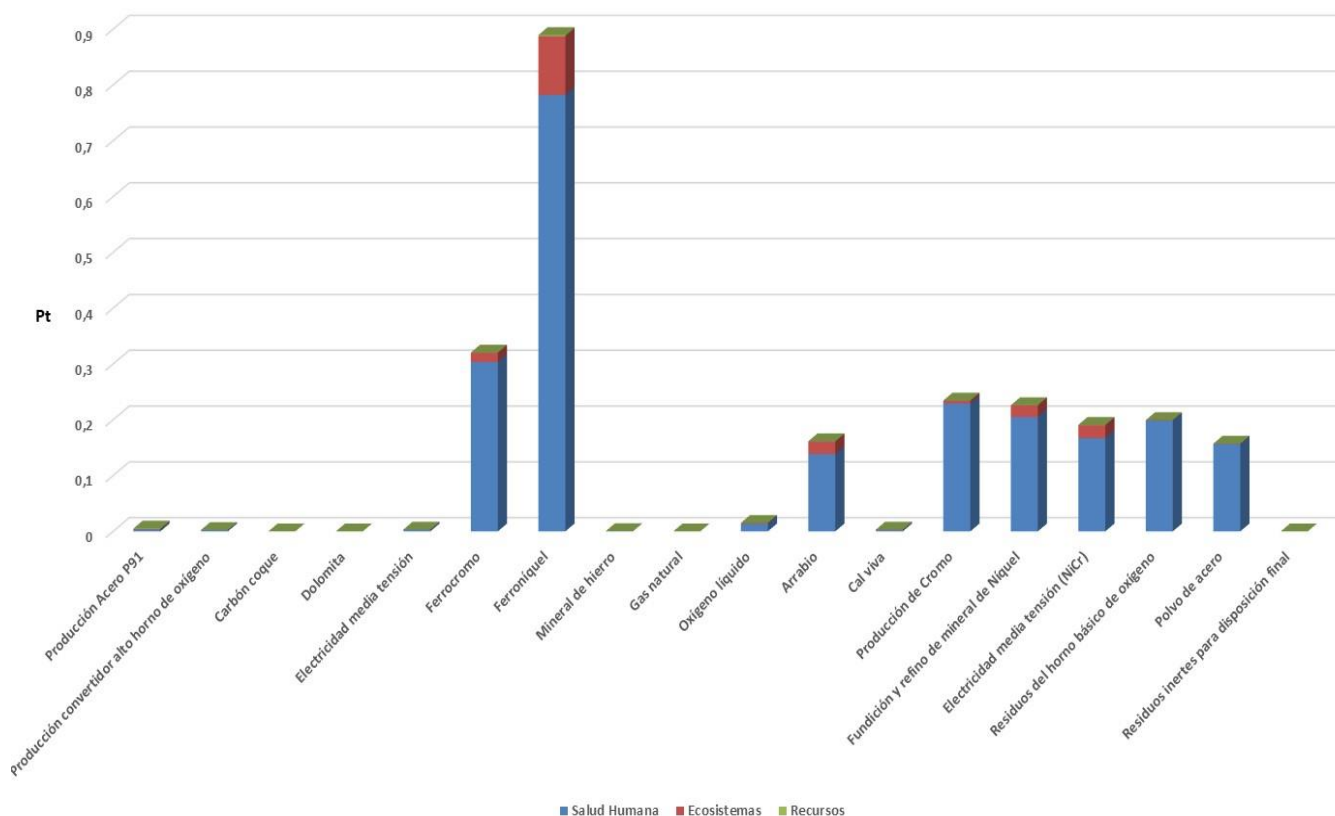


Figura 70: Análisis de impacto P91 + NiCr. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P91 con recubrimiento de Ni50Cr por HVOF, en la figura 71 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendiente de importancia, partiendo de 0,540 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, tratamiento de residuos de dicromato de Na, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferróniquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento, destacándose la aparición y peso del proceso del tratamiento de residuos de dicromato de Na. Se constata por tanto la obtención de mayores valores en las contribuciones de los mismos procesos para el caso del sistema sustrato-recubrimiento con respecto al caso del sustrato desnudo, así como la aparición de nuevos procesos con contribución en este sentido debido a la presencia del recubrimiento.

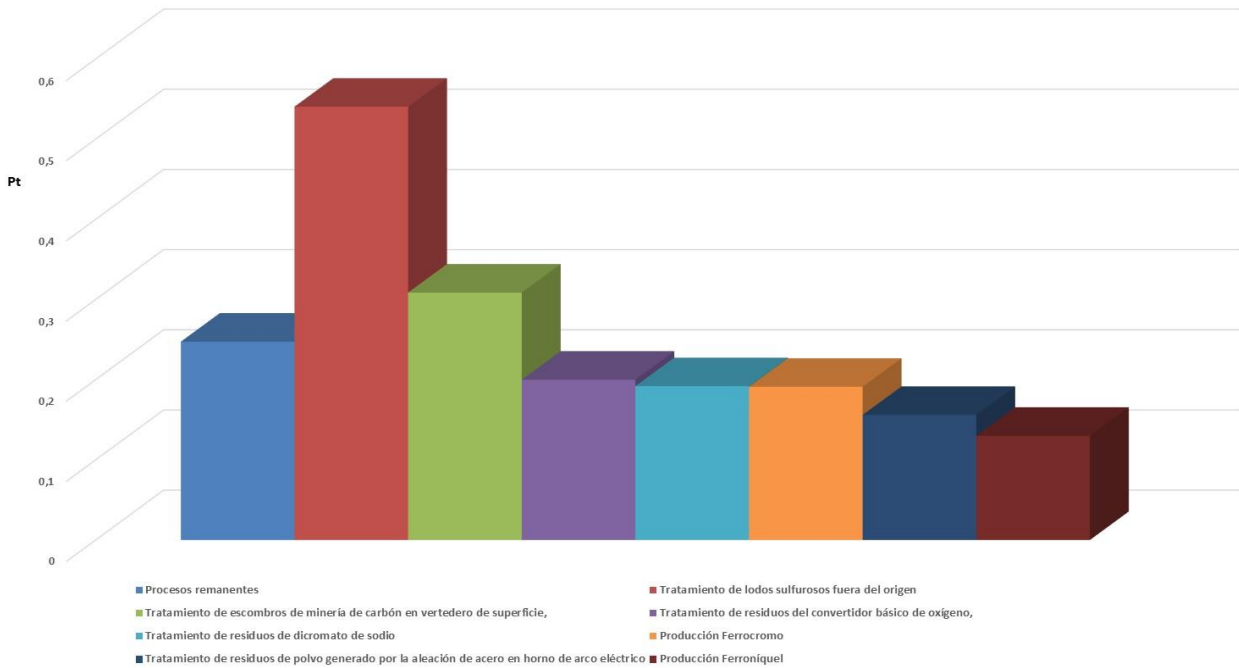


Figura 71: Contribución proceso P91 + NiCr. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 72 se observa el diagrama de red para evaluación del daño (en salud humana-daly), con un valor de corte del 8,5%. Este valor de corte, al igual que en el caso de los sustratos desnudos, sigue siendo representativo y permite visualizar los procesos más importantes. Se incide, del mismo modo, únicamente en árboles de contribución correspondientes a la salud humana por representar a las categorías de impacto y áreas finales de daño más relevantes, al igual que para el caso de los sustratos desnudos. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede apreciarse, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 35,5% (influencia en el mercado) y 35,4% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 13,9% tanto en influencia en el mercado como en producción. Seguidamente, cabe destacar la influencia del recubrimiento mediante la producción de Cr (impacto del 10,4%, partiendo de la producción de dicromato de Na, con el 7,31%) y mediante la producción de Ni (impacto del 9,3%, partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 8,7%)



Figura 72: Red P91 + NiCr. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Asimismo, la producción de Cr también proviene en menor medida del proceso base de tratamiento de chatarra de aluminio forjado (contribución del 0,0208%), y está relacionada con la producción de ferrocromo. Por otro lado, la producción de Ni también está relacionada con los procesos de combustión industrial.

La combinación P91-NiCr también produce impactos asociados a la generación y tratamiento de residuos, como puede observarse en la figura 73. Se aprecia que el tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie contribuye en un 12,9% (generado a partir del tratamiento de aluminio y la producción de Cr), el tratamiento de residuos de dicromato de Na contribuye en un 8,69% (generado a partir de la producción de dicromato y la producción de Cr), el tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen contribuye en un 22,4% (generado a partir del proceso de extracción en la mina así como la producción de Ni), y el tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno contribuye en un 9,15%.

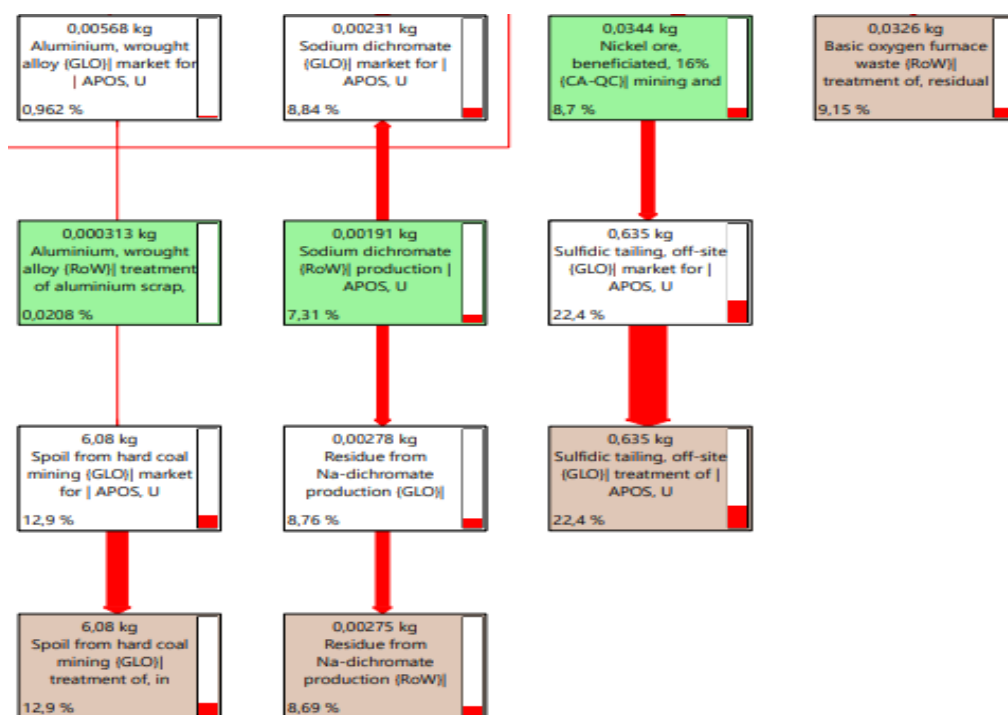


Figura 73: Detalle Red P91 + NiCr para residuos globales. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A la vista de todos los resultados anteriores, se deduce que el sistema P91-NiCr incrementa los impactos ambientales correspondientes al sustrato desnudo, lógicamente debido a la adición del NiCr como recubrimiento mediante HVOF. Los procesos asociados que hemos visto inciden fundamentalmente en las áreas de salud humana y ecosistemas, y en categorías tales como toxicidad humana carcinogénica, cambio climático y formación de partículas. También se incrementa el daño asociado a las contribuciones de los procesos, incluyendo los relativos a generación y tratamiento de residuos.

4.4.1.2- Acero ferrítico P92 / NiCr

La combinación de sustrato-recubrimiento P92-Ni50Cr ofrece los datos correspondientes a la Figura 74 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

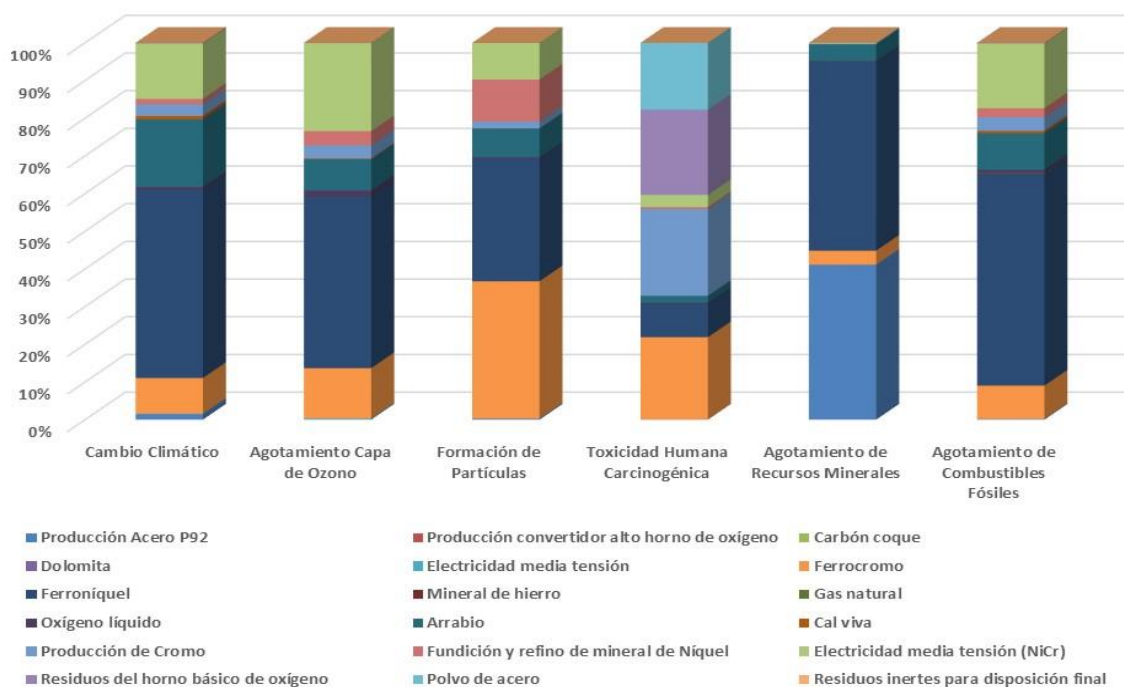


Figura 74: Análisis de impacto P92 + NiCr. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicho gráfico puede observarse la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de Cr correspondiente al recubrimiento afecta de forma importante a la toxicidad humana carcinogénica y en menor medida a otras categorías como agotamiento de la capa de ozono y combustibles fósiles. La fundición y refinado de Ni impacta en la formación de partículas de forma más significativa, mientras que la electricidad asociada al proceso del recubrimiento produce afectación al agotamiento de la capa de ozono y combustibles fósiles, cambio climático y formación de partículas. Siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferroníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. Dicho proceso específico de producción del acero P92 sólo tiene influencia destacable en el agotamiento de recursos minerales. Todo ello puede constatarse en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 75, donde se representa la evaluación del daño.

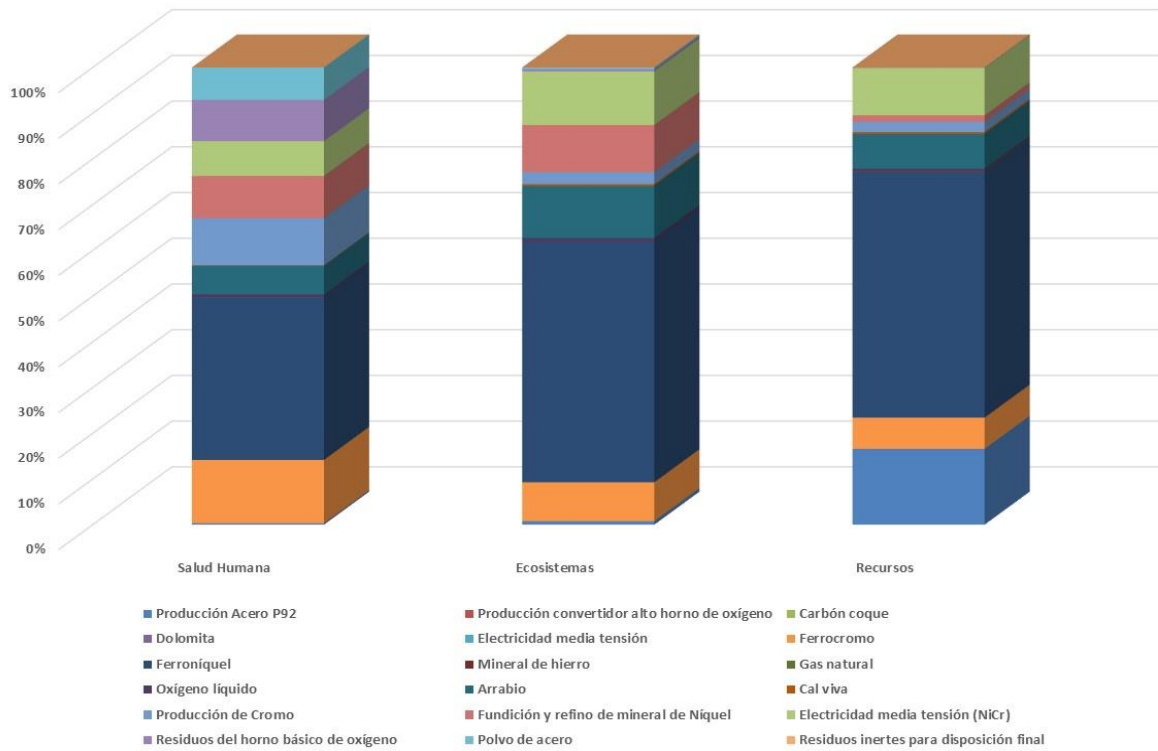


Figura 75: Análisis de impacto P92 + NiCr. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la gráfica 75 se aprecia que la producción de Cr afecta en mayor medida al área de la salud humana mientras que la función y refinado de Ni lo hace al área de ecosistemas, al igual que la electricidad empleada en el recubrimiento (que también afecta significativamente al área de recursos). En la gráfica de la figura 76, correspondiente al análisis de impacto para la puntuación única por categoría de impacto, se observan las mismas consideraciones que en el caso del sustrato desnudo; además de ello, aparecen los procesos relativos a la producción de Cr, fundición y refinado de Ni y uso de electricidad de media tensión asociada a la deposición del recubrimiento. Dichos procesos generan un impacto en las principales categorías: la producción de Cr lleva asociado 0,2 Pt a toxicidad humana carcinogénica y 0,007 Pt de cambio climático; la fundición y refinado de Ni lleva asociado 0,005 Pt de formación de partículas, así como 0,004 Pt de toxicidad humana carcinogénica y 0,003 Pt de cambio climático; el uso de electricidad de media tensión para el recubrimiento lleva asociado 0,03 Pt de cambio climático, así como 0,02 Pt de toxicidad humana carcinogénica y 0,004 de formación de partículas. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica. Estos resultados son similares a los del sistema P91-NiCr.

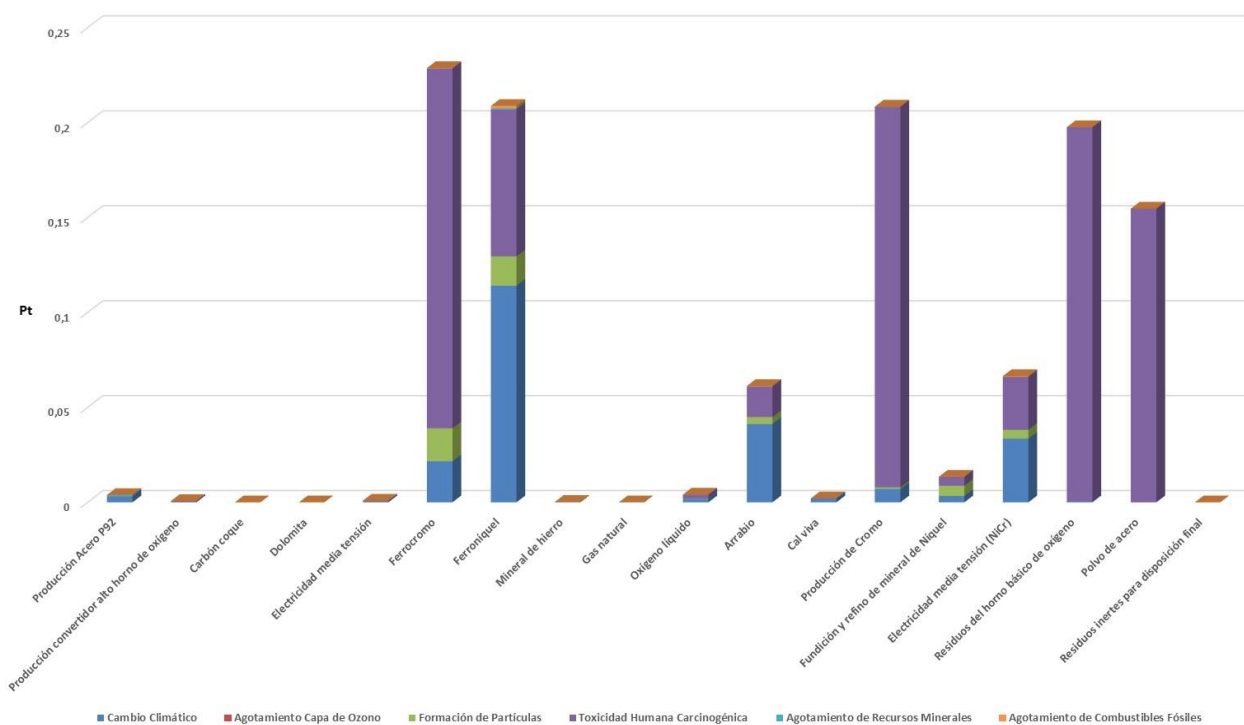


Figura 76: Análisis de impacto P92 + NiCr. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 77), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. Se observan las mismas consideraciones que en el caso del sustrato desnudo; además de ello, aparecen los procesos relativos a la producción de Cr, fundición y refinado de Ni y uso de electricidad de media tensión asociada a la deposición del recubrimiento. Dichos procesos generan un impacto en las áreas finales de daño: la producción de Cr lleva asociado 0,22 Pt de salud humana y 0,005 Pt de ecosistemas; la fundición y refinado de Ni lleva asociado 0,20 Pt de salud humana, así como 0,02 Pt de ecosistemas; el uso de electricidad de media tensión para el recubrimiento lleva asociado 0,16 Pt de salud humana, así como 0,02 Pt de ecosistemas. Estos resultados son similares a los del sistema P91-NiCr.

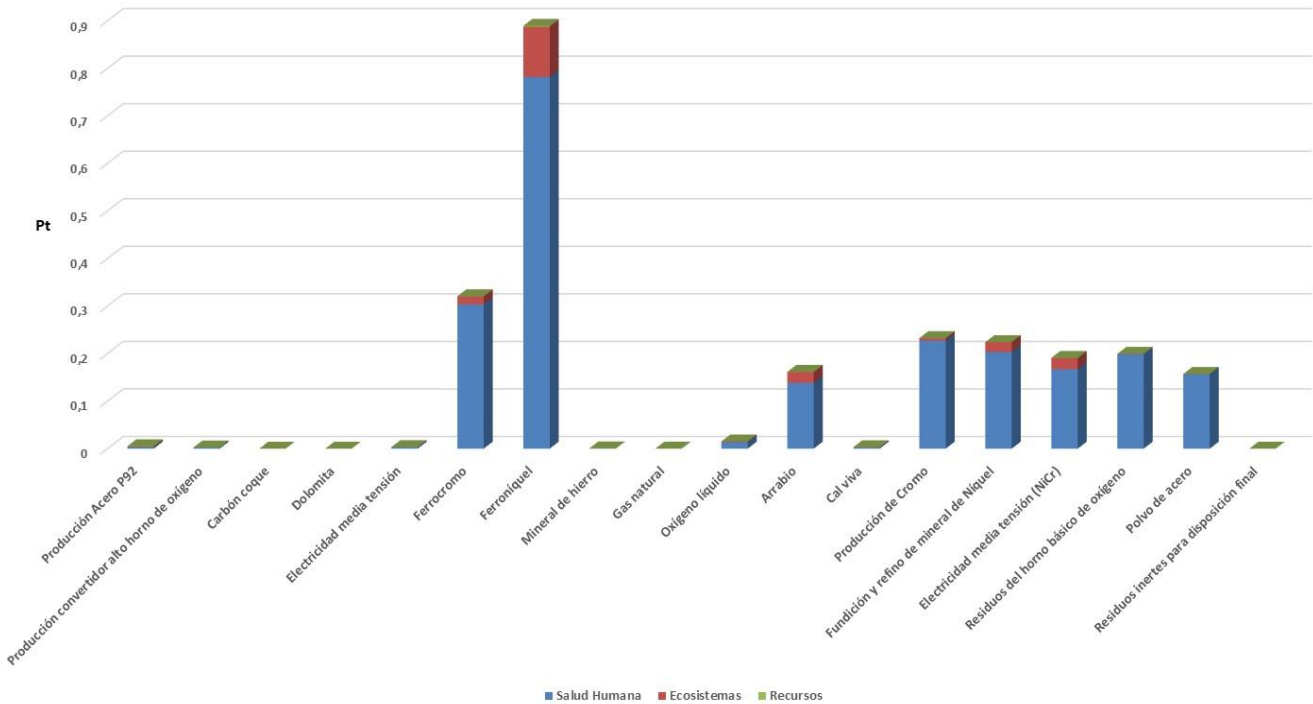


Figura 77: Análisis de impacto P92 + NiCr. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P92 con recubrimiento de Ni50Cr por HVOF, en la figura 78 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendiente de importancia, partiendo de 0,538 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, tratamiento de residuos de dicromato de Na, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferroníquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento, destacándose la aparición y peso del proceso del tratamiento de residuos de dicromato de Na. Todos los resultados coinciden con lo obtenido para el sistema P91-Ni50Cr, observándose resultados ligeramente menores del orden de decimales.

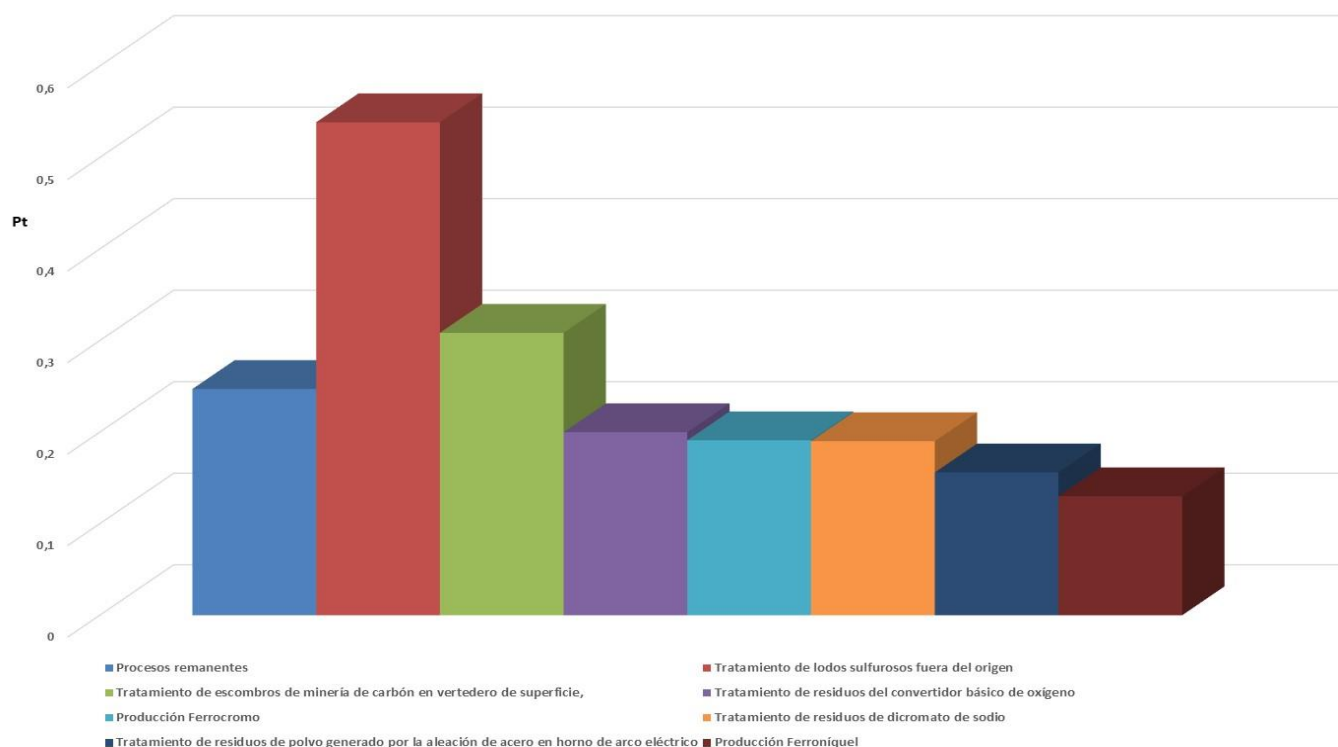


Figura 78: Contribución proceso P92 + NiCr. Puntuación única.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 79 se observa el diagrama de red para evaluación del daño (en salud humana-daly), con un valor de corte del 8,5%. Como veíamos, este valor de corte permite la visualización de los procesos más importantes y relevantes del sistema sustrato-recubrimiento. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede apreciarse, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 35,6% (influencia en el mercado) y 35,5% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 13,9% tanto en influencia en el mercado como en producción. Seguidamente, cabe destacar la influencia del recubrimiento mediante la producción de Cr (impacto del 10,3%, partiendo de la producción de dicromato de Na, con el 7,25%) y mediante la producción de Ni (impacto del 9,24%, partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 8,64%). Los valores son casi idénticos en todos los casos a los correspondientes al sistema P91-NiCr, y las pequeñas diferencias de decimales son debidas a las ligeras variaciones existentes en composiciones de sustratos y cantidades de recubrimiento.

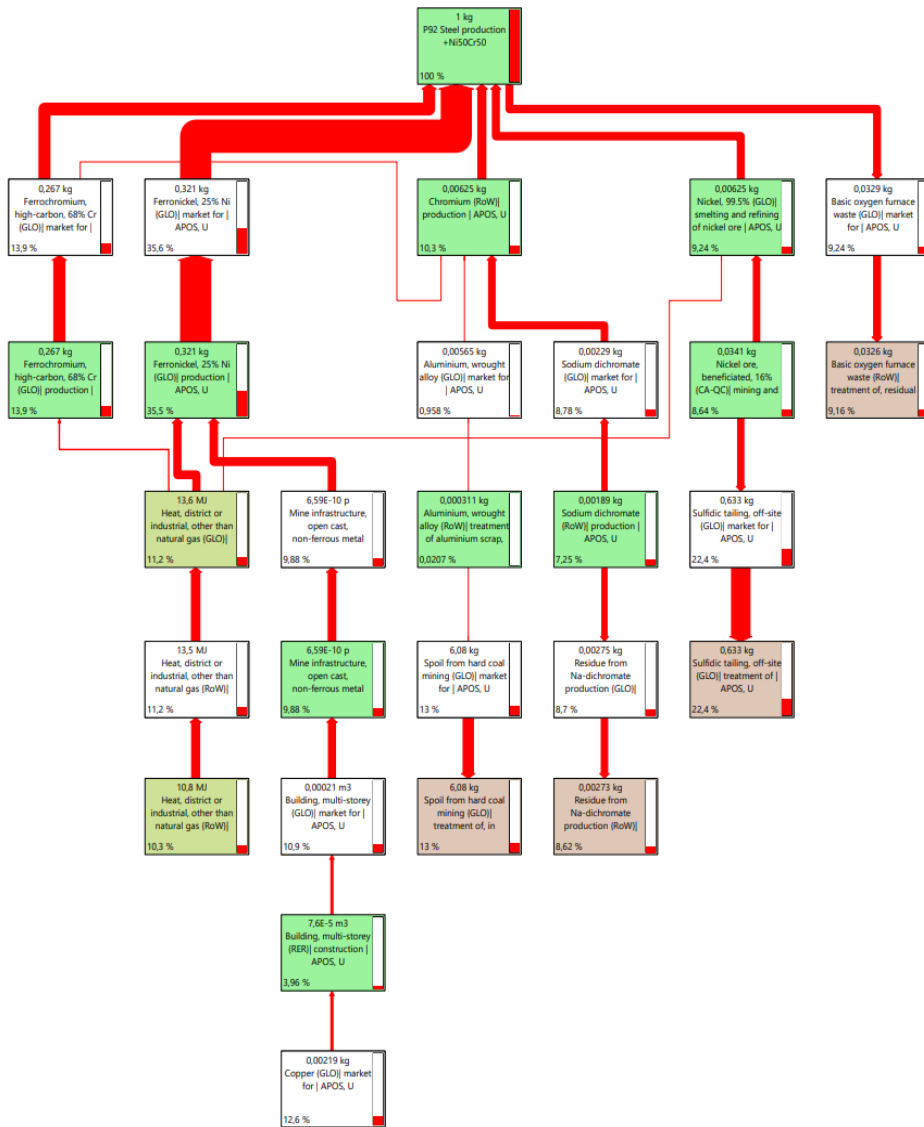


Figura 79: Red P92 + NiCr. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Asimismo, la producción de Cr también proviene en menor medida del proceso base de tratamiento de chatarra de aluminio forjado (contribución del 0,0207%), y está relacionada con la producción de ferrocromo. Por otro lado, la producción de Ni también está relacionada con los procesos de combustión industrial. La combinación P92-NiCr también produce impactos asociados a la generación y tratamiento de residuos. Se aprecia que el tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie contribuye en un 13% (generado a partir del tratamiento de aluminio y la producción de Cr), el tratamiento de residuos de dicromato de Na contribuye en un 8,62% (generado a partir de la producción de dicromato y la producción de Cr), el tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen contribuye en un 22,4% (generado a partir del proceso de extracción en la mina así como la producción de Ni), y el tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno contribuye en un 9,16%.

A la vista de todos los resultados anteriores, se deduce que el sistema P92-NiCr (del mismo modo que el sistema P91-NiCr) incrementa los impactos ambientales correspondientes al sustrato desnudo, lógicamente debido a la adición del NiCr como recubrimiento mediante HVOF. Los procesos asociados que hemos visto inciden fundamentalmente en las áreas de salud humana y ecosistemas, y en categorías tales como toxicidad humana carcinogénica, cambio climático y formación de partículas. También se incrementa el daño asociado a las contribuciones de los procesos, incluyendo los relativos a generación y tratamiento de residuos.

En lo que respecta a la comparativa del sistema P92-NiCr con el sistema P91-NiCr, los resultados son prácticamente idénticos en todos los casos. Como habíamos comentado, las pequeñas diferencias en valores de decimales son debidas a las ligeras variaciones existentes en composiciones de sustratos y cantidades de recubrimiento. Cabe reseñar que el daño total expresado en Pt para las puntuaciones únicas de categorías de impacto, áreas de daño y contribuciones de procesos es ligeramente inferior en el sistema P92-NiCr.

4.4.2.- Análisis de Ciclo de Vida de sustratos / CrN/NbN

El Análisis de Ciclo de Vida del sustrato ferrítico P92 con el recubrimiento de CrN/NbN se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad. Se ha partido de los valores de inventario existentes en la tabla 11 para el acero P92, en base a la composición de elementos de dicho acero y tomando como unidad funcional 1 kg. Asimismo, se han añadido los datos correspondientes al recubrimiento CrN/NbN ya mencionados y recogidos en la tabla 21 que se muestra a continuación. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en los sustratos y recubrimiento de estudio de cara a analizar su comportamiento conjunto. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Masa Sustrato	Masa total recubrimiento CrN/NbN	Masa Cr (26,17%)	Masa Nb (22,45%)	Masa N (51,38%)	Consumo Eléctrico HIPIMS
1 kg P92	0,6483396 g	0,16967047 g	0,14555224 g	0,33311689 g	26 kWh

Tabla 21: Datos recubrimiento CrN/NbN.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles.

Como en el caso de los ACV realizados únicamente a los sustratos, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent. Se presentan a continuación dichos resultados para el sustrato P92 junto con el recubrimiento CrN/NbN depositado por HIPIMS.

4.4.2.1- Acero ferrítico P92 / CrN/NbN

La combinación de sustrato-recubrimiento P92-CrN/NbN ofrece los datos correspondientes a la Figura 80 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

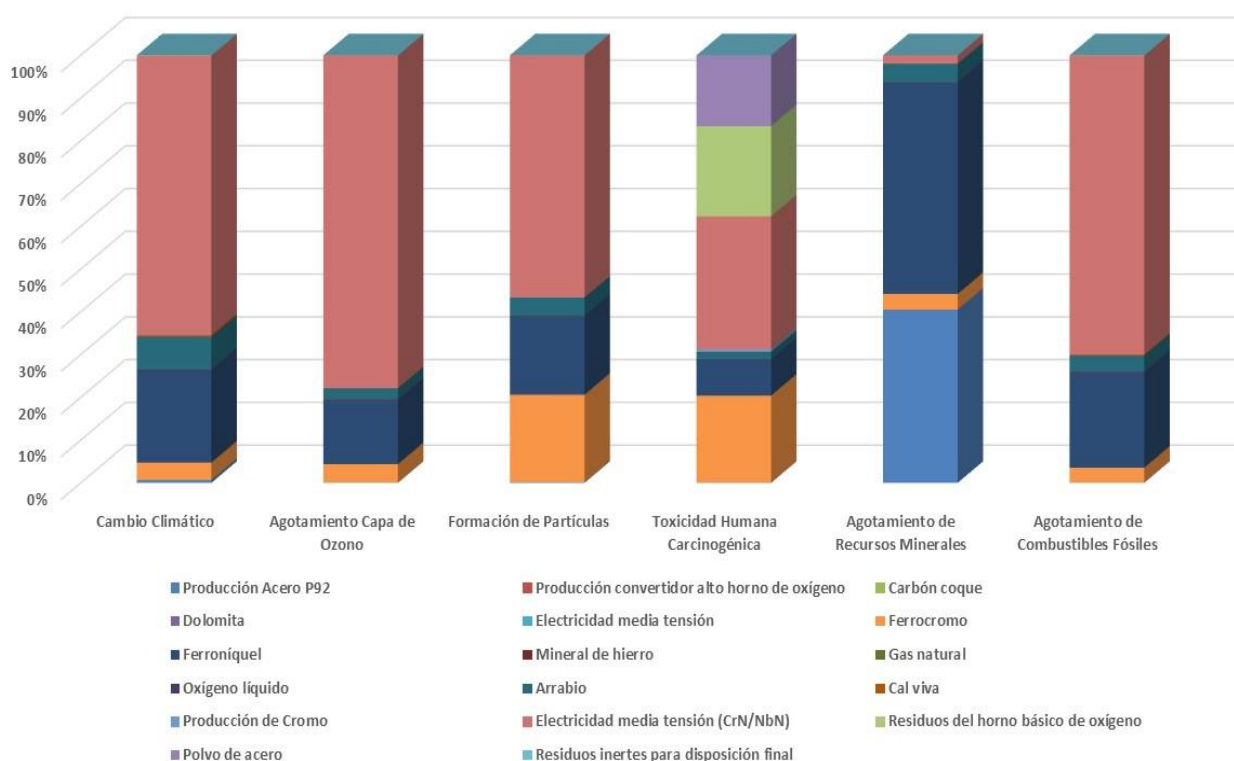


Figura 80: Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En dicho gráfico puede observarse la aportación de más elementos y procesos a las distintas categorías de impacto en comparación con el sustrato desnudo; es de destacar en este sentido la aportación correspondiente a la electricidad empleada en el proceso de recubrimiento. Este uso eléctrico impactaría en gran medida en multitud de categorías, cambiando por completo el resultado de los datos de caracterización frente al sustrato P92 desnudo y frente a los sustratos P91 y P92 con recubrimiento de NiCr. Se aprecia afectación en las categorías de impacto de como cambio climático (aproximadamente un 65%), agotamiento de la capa de ozono (aproximadamente un 78%), formación de partículas (aproximadamente un 57%), toxicidad humana carcinogénica (aproximadamente un 31%) y agotamiento de recursos fósiles (sobre un 70%). Se confirma de este modo la gran influencia de este proceso en el impacto generado por el sistema P92-CrN/NbN.

La generación y consumo de electricidad por combustibles fósiles no sólo contribuye, como puede verse, al agotamiento de dichos recursos, sino que produce un alto impacto debido a las emisiones y partículas generadas en el proceso. Siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferroníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato, aunque en menor medida que para los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr. Todo ello puede constatarse en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 81, donde se representa la evaluación del daño.

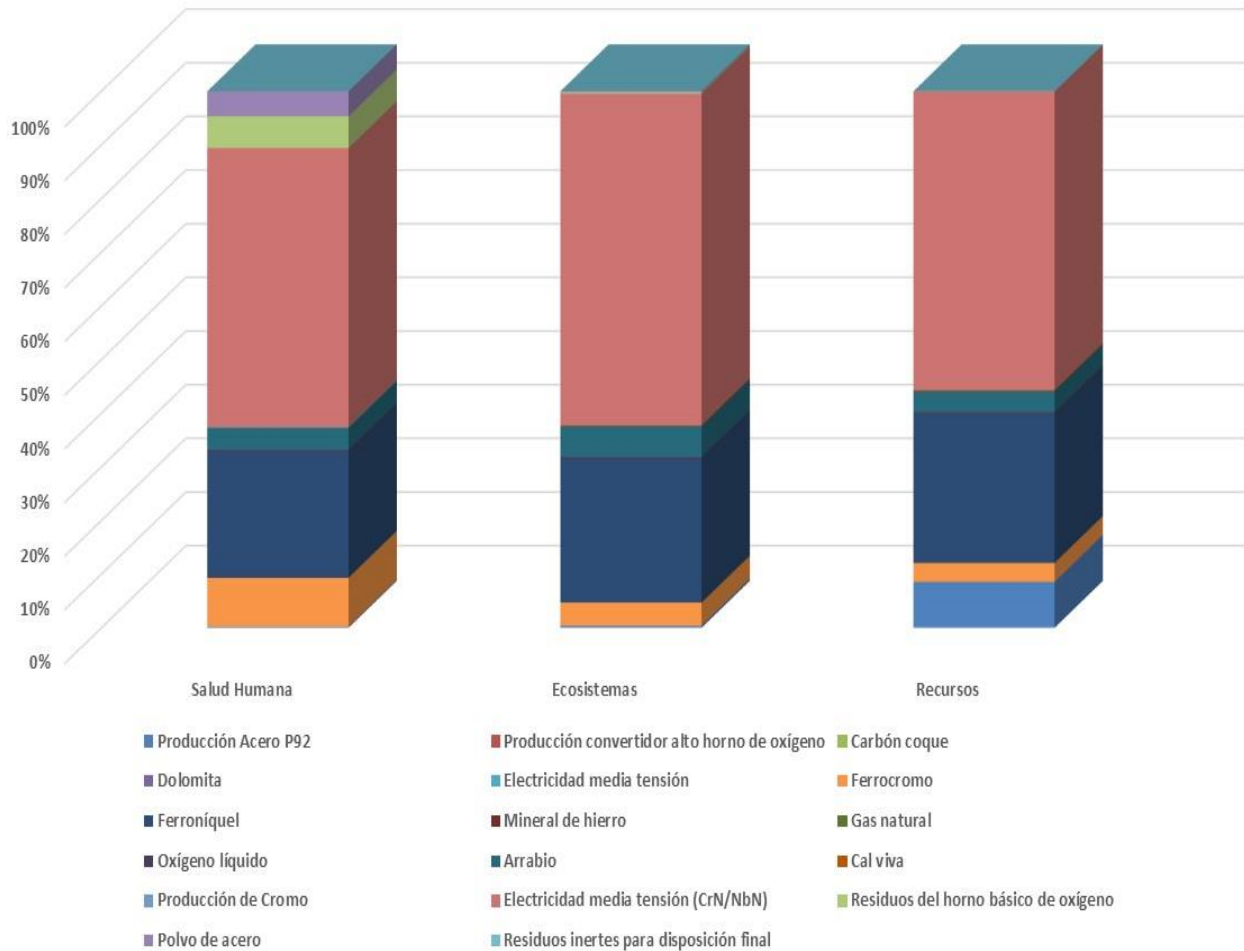


Figura 81: Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

La electricidad utilizada para el recubrimiento sería el proceso que más impactaría en las tres áreas finales de daño, fundamentalmente en ecosistemas (del orden de un 62%), seguido de recursos (del orden de un 56%) y salud humana (del orden de un 52%). El siguiente proceso que más impactaría sería el ferroníquel, con el mismo orden de importancia, seguido del ferrocromo en menor medida.

En la figura 82, gráfica que corresponde al análisis de impacto con representación de la puntuación única por categoría de impacto, se observa que la electricidad utilizada en el recubrimiento aportaría a la categoría de impacto de toxicidad humana carcinogénica una puntuación de 0,29 Pt. Otras categorías de impacto con afectación serían el cambio climático (del orden de 0,35 Pt) y formación de partículas (del orden de 0,05 Pt). Se trata del proceso que más impacto genera, por encima de la producción de ferromniquel y ferrocromo. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

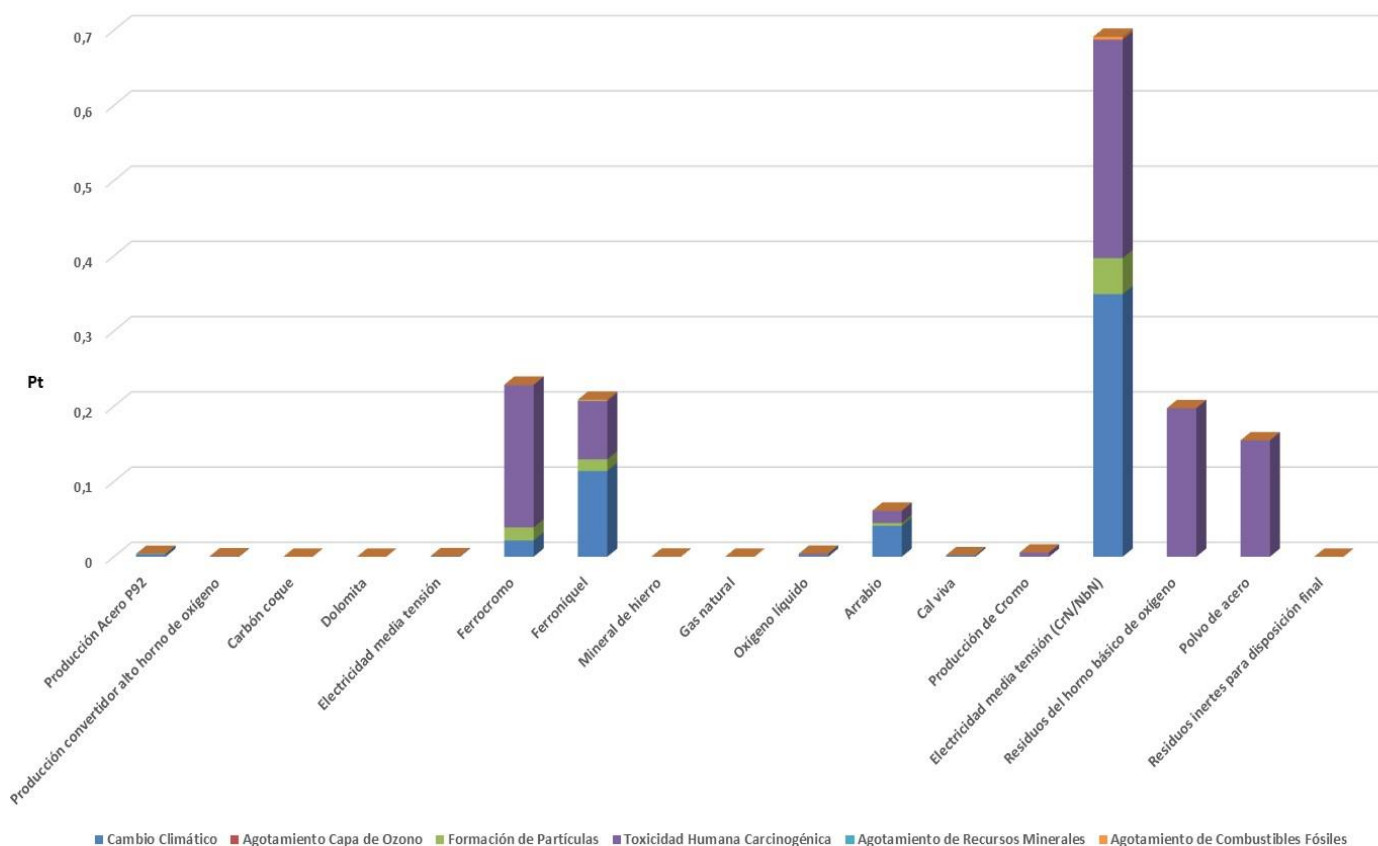


Figura 82: Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 83), el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición afecta de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. La electricidad utilizada en el proceso de deposición del recubrimiento genera 1,74 Pt de afectación a salud humana y 0,24 Pt a ecosistemas. Todos estos resultados ponen de manifiesto el gran impacto e influencia del uso de la electricidad del proceso de deposición del recubrimiento de CrN/NbN en el acero ferrítico P92, situación no observada para los sistemas P91 y P92-Ni50Cr.

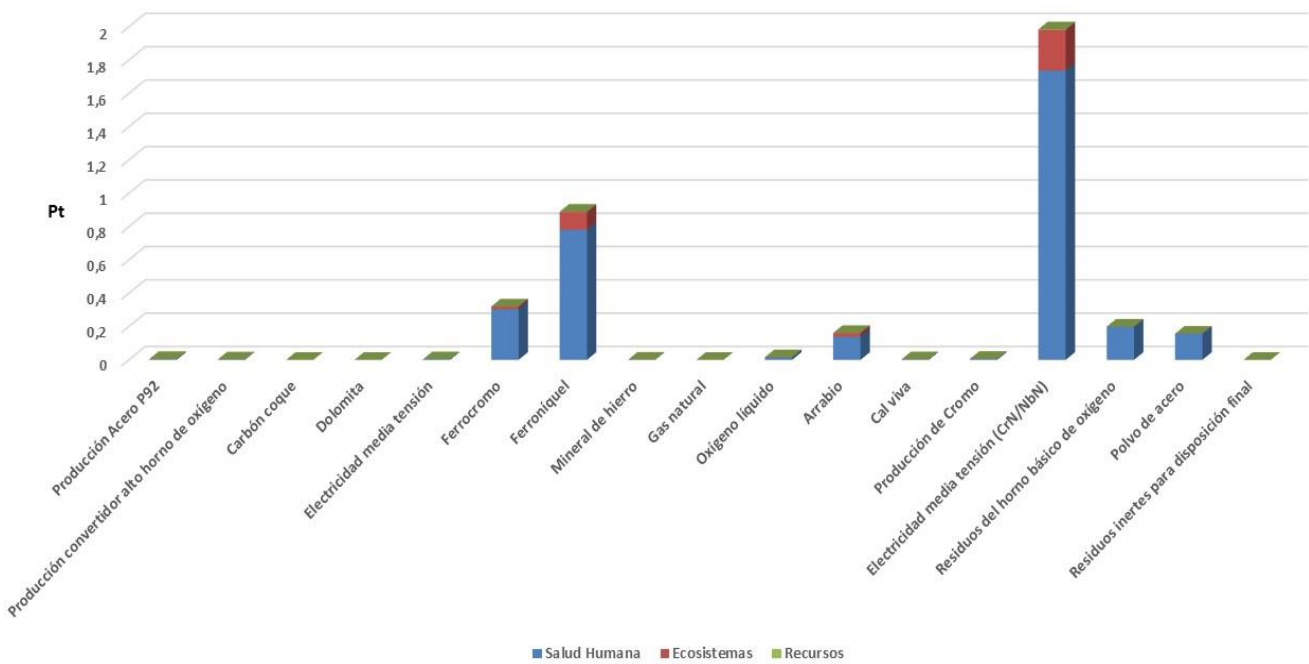


Figura 83: Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P92 con recubrimiento de CrN/NbN por HIPIMS, en la figura 84 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendiente de importancia, partiendo de 0,888 Pt. Los principales son: tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, producción de electricidad de alta tensión a partir de carbón, tratamiento de escombros de minería de lignito en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno y producción de ferrocromo. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento. Por otro lado, comparando dichos resultados con los obtenidos para los sistemas P91 y P92-Ni50Cr, se constata la aparición de la producción de electricidad de alta tensión a partir de carbón, y del tratamiento de escombros de minería de lignito en vertedero de superficie, ambos con alto peso (casi 0,300 Pt). Asimismo, desaparece el proceso del tratamiento de residuos de dicromato de Na.

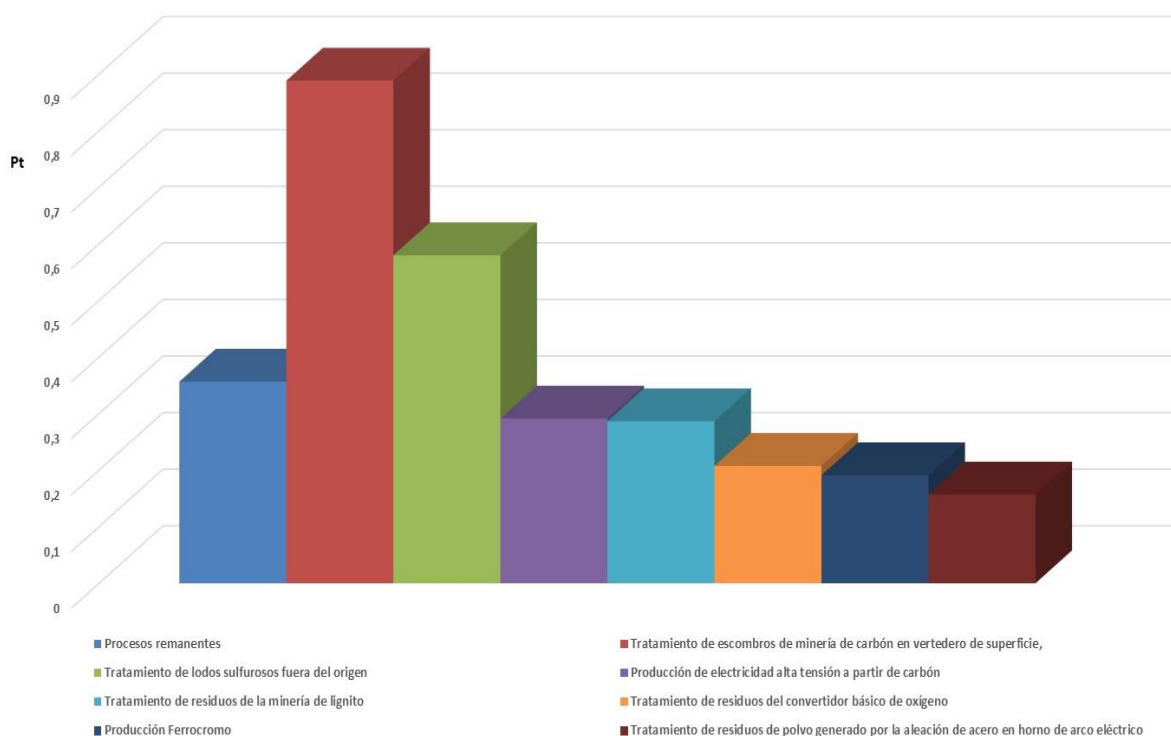


Figura 84: Contribución proceso P92 + CrN/NbN. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 85 se observa el diagrama de red para evaluación del daño (en salud humana-daly), con un valor de corte del 8,5%. El presente valor de corte permite la visualización de los resultados principales y más significativos. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Como puede apreciarse, la electricidad constituye el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 51,9% (influencia en el mercado) y 30,1% (producción a partir de carbón). El ferróníquel es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 23,5% y 23,4% correspondiente a influencia en el mercado y a la producción. Para el ferrocromo dichos valores serían del 9,13%. A la vista de los resultados puede deducirse que el peso de la electricidad empleada en el proceso de deposición del recubrimiento con la técnica de HIPIMS es determinante en el presente árbol de contribución, aportando gran cantidad de daño a la salud humana, superior a la producción de las aleaciones de ferrocromo y ferróníquel empleadas en la fabricación del acero P92 empleado como sustrato.

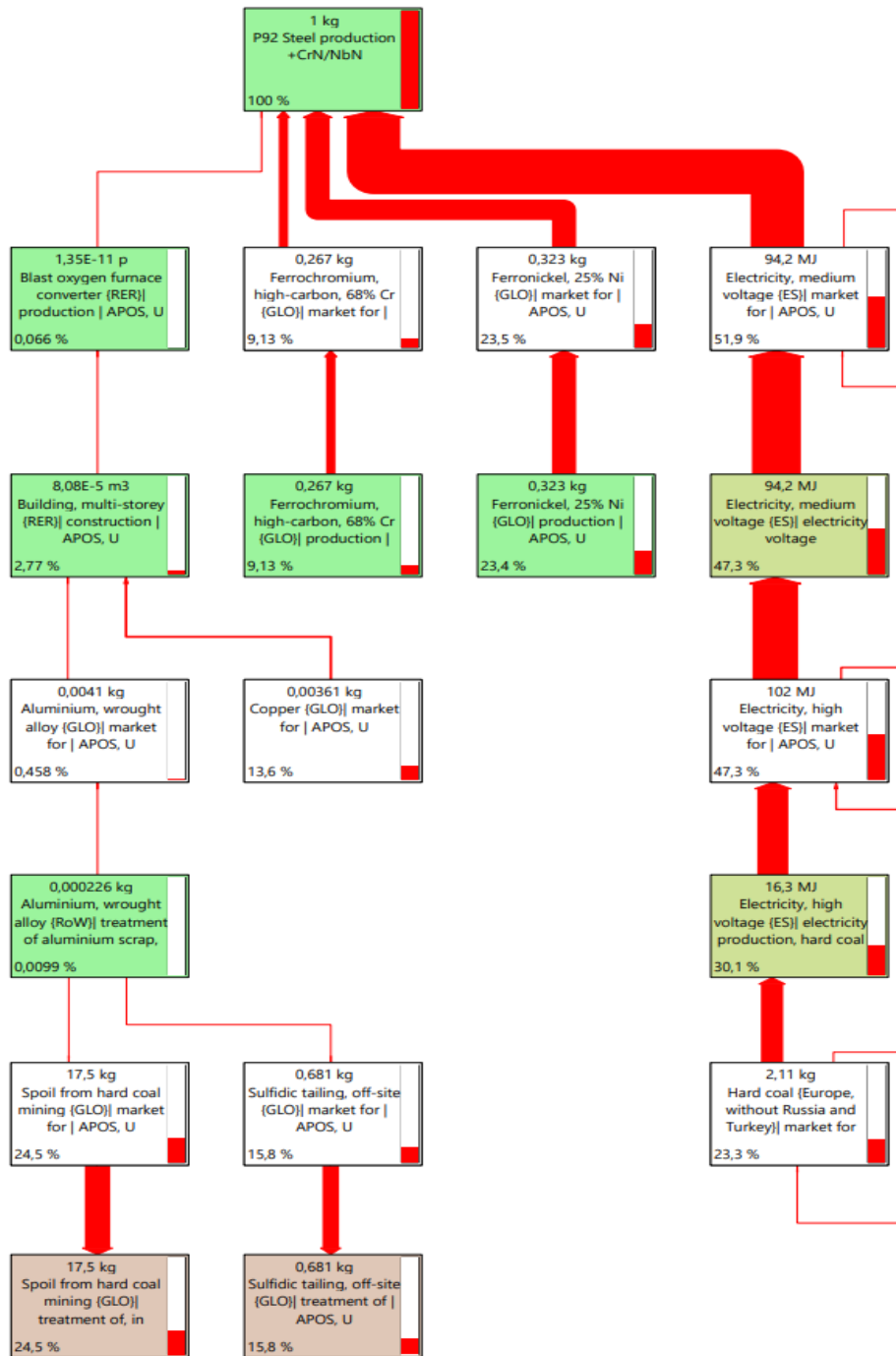


Figura 85: Red P92 + CrN/NbN. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

La combinación P92-CrN/NbN también produce impactos asociados a la generación y tratamiento de residuos, como puede observarse en la figura 86. Se aprecia que el tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie contribuye en un 24,5% (generado a partir del proceso de tratamiento de chatarra de aluminio) y el tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen contribuye en un 15,8% (generado también a partir del proceso de tratamiento de chatarra de aluminio).

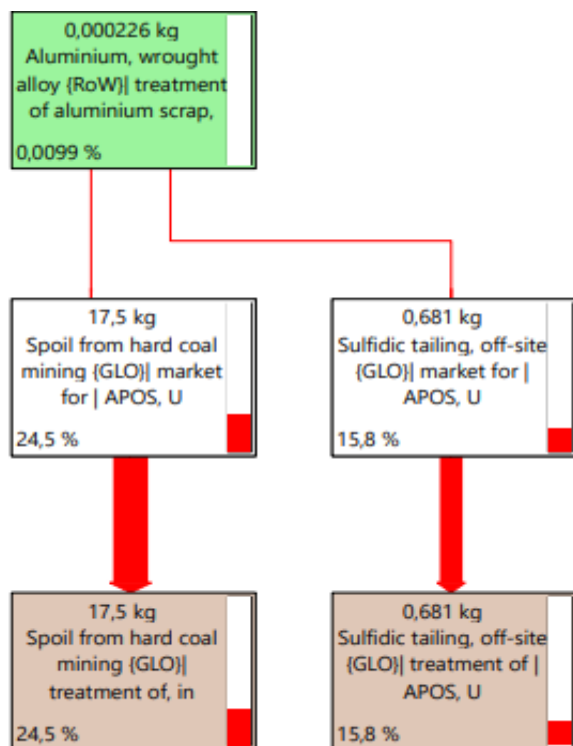


Figura 86: Detalle Red P92 + CrN/NbN para residuos globales. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A la vista de todos los resultados anteriores, se deduce que el sistema P92-CrN/NbN incrementa en gran medida los impactos ambientales correspondientes al sustrato desnudo, lógicamente debido a la adición del CrN/NbN como recubrimiento mediante HIPIMS. El proceso asociado de uso de electricidad asociada a la deposición del recubrimiento es el más perjudicial desde el punto de vista ambiental, incidiendo en la mayoría de las categorías de impacto y áreas finales de daño. También se incrementa el daño asociado a las contribuciones de los procesos, donde se incluye la producción de electricidad a partir de carbón

En lo que respecta a la comparativa del sistema P92-CrN/NbN con los sistemas P91-NiCr y P92-NiCr, los resultados indican claramente el mayor daño causado por el recubrimiento de CrN/NbN, debido fundamentalmente al uso de electricidad asociado al proceso de deposición.

4.4.3.- Análisis de Ciclo de Vida de sustratos / Slurry de Al

El Análisis de Ciclo de Vida de los sustratos ferríticos P91, P92, VM12 y los sustratos austeníticos AISI 347H, AISI 321 con el recubrimiento de Slurry de Al se ha llevado a cabo utilizando la metodología ReCiPe, comentada con anterioridad. Se ha partido de los valores de inventario existentes en las tablas 10 a 14 para los aceros P91, P92, VM12, AISI 347H y AISI 321 respectivamente, en base a la composición de elementos de dichos aceros y tomando como unidad funcional 1 kg. Asimismo, se han añadido los datos correspondientes al recubrimiento de Slurry de Al ya mencionados y recogidos en la tabla 22 que se muestra a continuación, con las proporciones establecidas. Dichos datos de inventario reflejarán los efectos, tales como emisiones y recursos, generados por los distintos elementos existentes en los sustratos y recubrimiento de estudio de cara a analizar su comportamiento conjunto. Los efectos son específicos para los resultados medioambientales en cada categoría de impacto revisada.

Masa Sustrato	Masa total recubrimiento Slurry Al	Masa Al (50%)	Masa Cr ₂ O ₃ (10%)	Masa H ₃ PO ₄ (25%)	Masa H ₂ O (15%)	Consumo Eléctrico Tratamiento Térmico
1 kg P91	1,246266 g	0,623133 g	0,1246266 g	0,3115665 g	0,1869399 g	2,5 kWh
1 kg P92	1,234926 g	0,617463 g	0,1234926 g	0,3087315 g	0,1852389 g	2,5 kWh
1 kg VM12	1,26246 g	0,63123 g	0,126246 g	0,315615 g	0,189369 g	2,5 kWh
1 kg AISI 347H	1,21257 g	0,606285 g	0,121257 g	0,3031425 g	0,1818855 g	2,5 kWh
1 kg AISI 321	1,228932 g	0,614466 g	0,1228932 g	0,307233 g	0,1843398 g	2,5 kWh

Tabla 22: Datos recubrimiento Slurry Al.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos disponibles.

Como en el caso de los ACV realizados únicamente a los sustratos, los resultados obtenidos están basados en la base de datos escogida Ecoinvent. Se presentan a continuación dichos resultados desglosados para cada sustrato (P91, P92, VM12, AISI 347H y AISI 321) junto con el recubrimiento de slurry de Al aplicado mediante pintado y tratamiento térmico de difusión.

4.4.3.1- Acero ferrítico P91 / Slurry de Al

La combinación de sustrato-recubrimiento P91-Slurry Al origina los datos correspondientes a la Figura 87 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

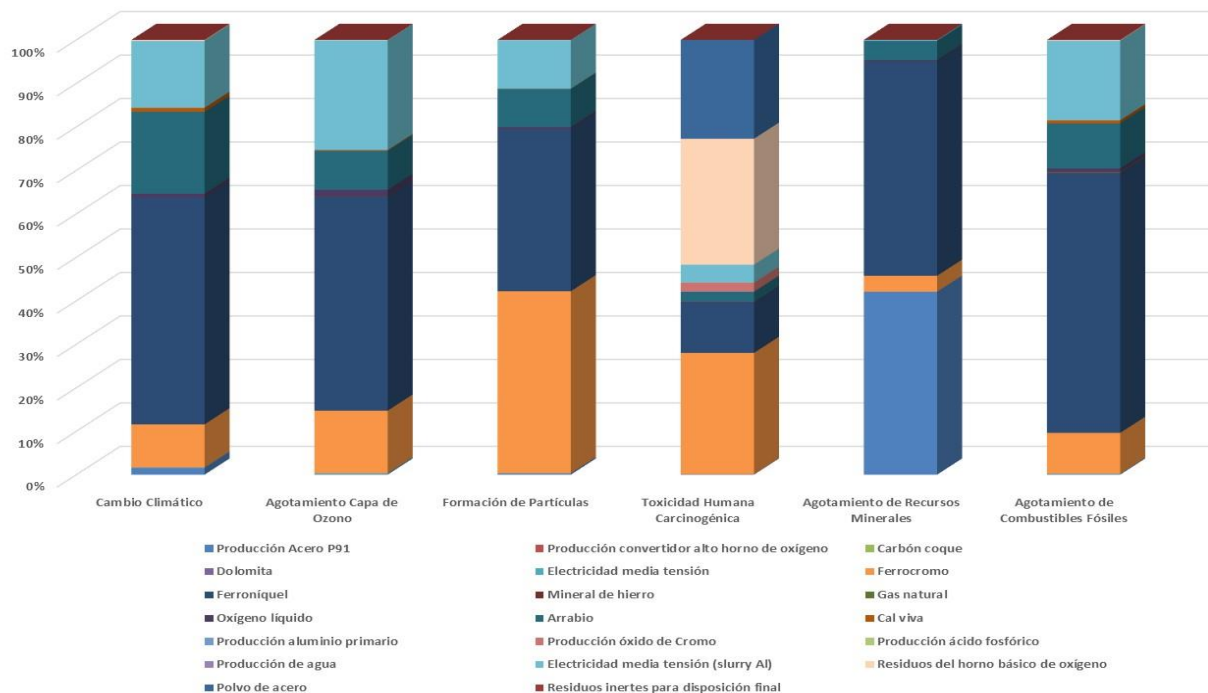


Figura 87: Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la mencionada figura, del mismo modo que en los sustratos recubiertos con NiCr, siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferroníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. También puede observarse la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de óxido de cromo correspondiente a la fabricación del recubrimiento de Slurry Al afecta levemente a la toxicidad humana carcinogénica. La producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua (empleados en la fabricación de Slurry Al) tienen un impacto muy leve y casi inapreciable. En cuanto a la electricidad usada en el proceso de deposición del recubrimiento, se constata su influencia en la mayoría de las categorías de impacto, excluida el agotamiento de recursos minerales (situación similar a los recubrimientos de NiCr), en donde aparece específicamente el proceso de producción del acero P91. Todo ello puede constatarse en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 88, donde se representa la evaluación del daño.

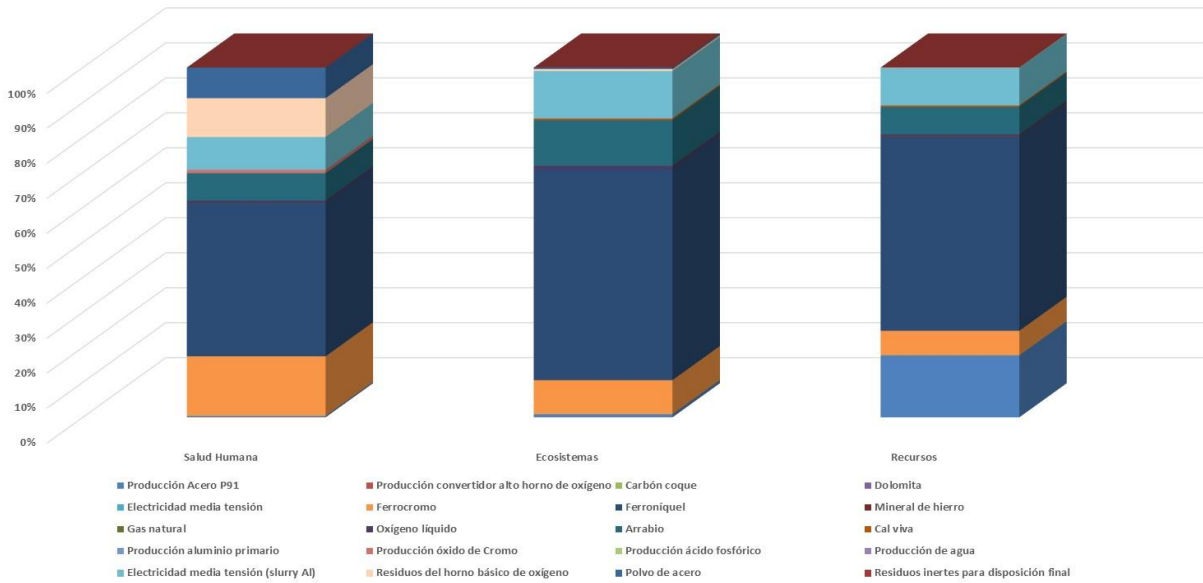


Figura 88: Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Evaluación del daño.
 Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 88 de Evaluación del daño se aprecian las tendencias observadas en la gráfica de caracterización para los procesos asociados al recubrimiento de Slurry de Al: mínimo impacto de la producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua, así como leve influencia de la producción de óxido de cromo en el área de salud humana y afectación del uso de electricidad en el proceso de deposición para las tres áreas finales de daño. Cabe comentar que el total de daño de las tres áreas (salud humana expresada en daly, ecosistemas expresada en especies-año y recursos expresada en US dólares) es levemente inferior al correspondiente a los sistemas sustrato-NiCr y por supuesto sustrato-CrN/NbN.

Asimismo, en la figura 89 de puntuación única por categoría de impacto representada seguidamente, se observa una contribución para la categoría de impacto de la toxicidad humana carcinogénica por parte del recubrimiento de Slurry de Al, del orden de 0,014 Pt debido al Cr_2O_3 presente en la composición de dicho Slurry. El consumo eléctrico afecta de forma reseñable a la categoría de impacto de cambio climático (alrededor de 0,033 Pt) y toxicidad humana carcinogénica (0,028 Pt), de igual modo que en el recubrimiento de Ni50Cr. No obstante, en ninguno de estos recubrimientos la contribución del consumo eléctrico a las categorías de impacto comentadas es tan reseñable como en el caso del recubrimiento de CrN/NbN. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO

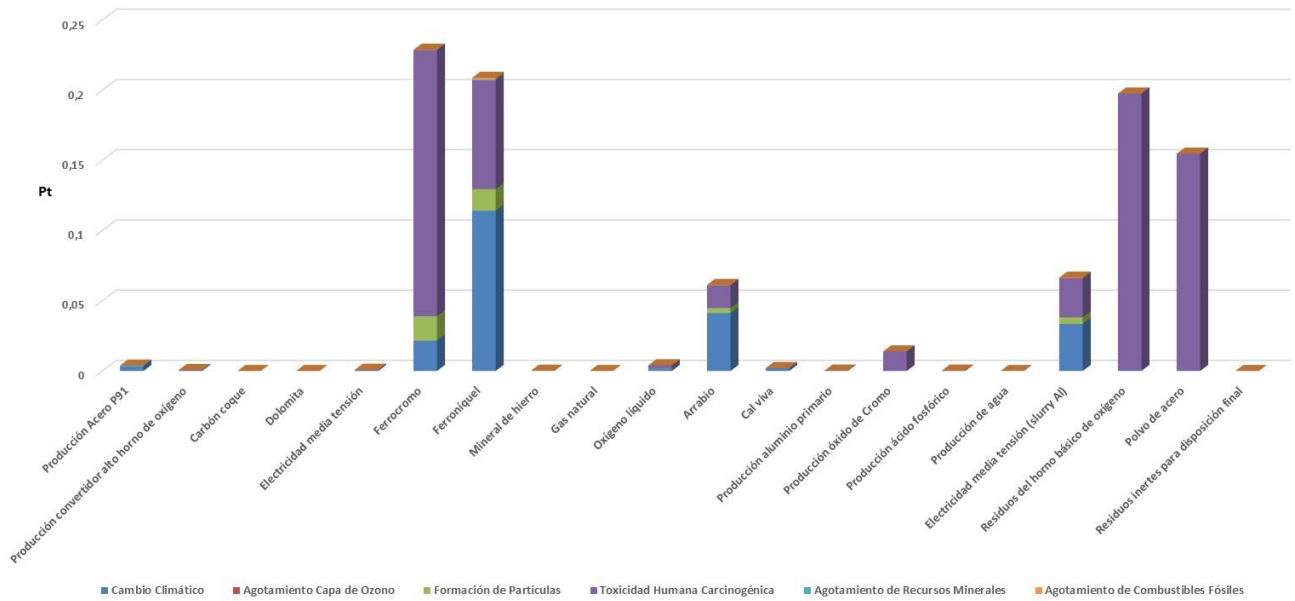


Figura 89: Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 90), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. El Cr_2O_3 del recubrimiento de Slurry de Al genera aproximadamente 0,014 Pt de afectación a salud humana; el consumo eléctrico asociado al proceso del tratamiento térmico en la deposición del recubrimiento genera en torno a 0,017 Pt de afectación a salud humana y 0,023 Pt a ecosistemas. Este último resultado del consumo eléctrico es idéntico al de los sustratos recubiertos de Ni50Cr.

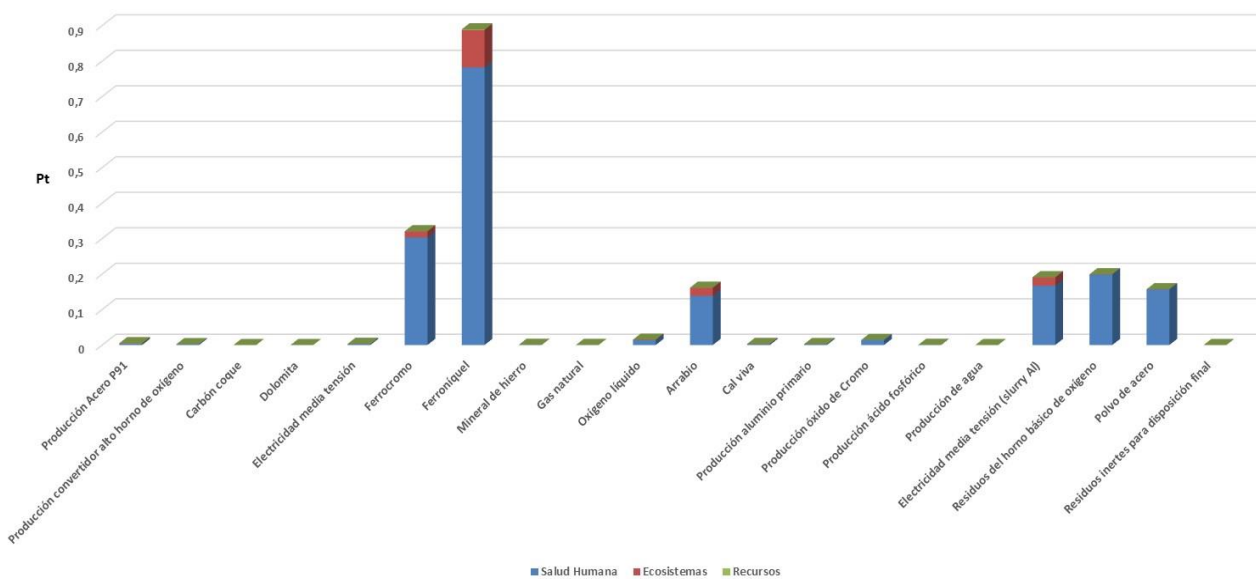


Figura 90: Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P91 con recubrimiento de Slurry Al por pintura y tratamiento térmico de difusión, en la figura 91 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendente de importancia, partiendo de 0,329 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferróniquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento. No aparecen entre las principales contribuciones los procesos de tratamiento de residuos de dicromato de Na (incluido en los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr) ni de producción de electricidad (incluido en el sustrato P92 con recubrimiento de CrN/NbN), sino que se contribución es menor.

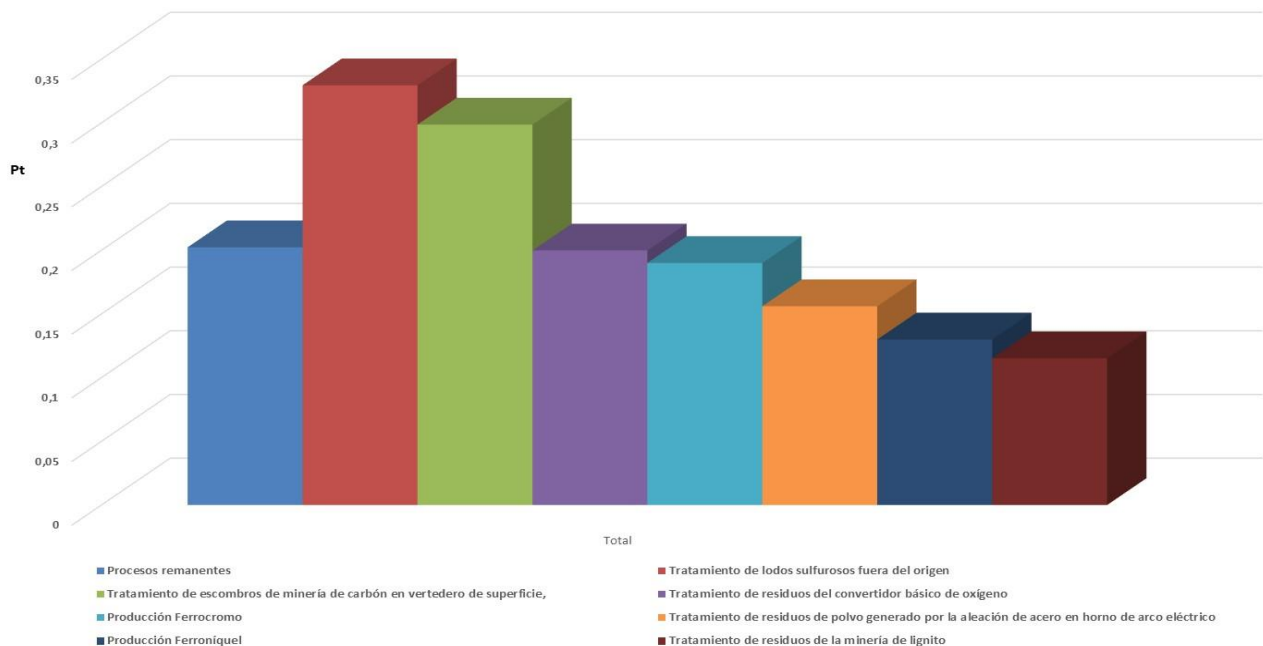


Figura 91: Contribución proceso P91 + Slurry Al Puntuación única.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 92 se representa el diagrama de red de evaluación del daño (salud humana en daly), para un valor de corte del 8,5%, donde se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado. Este valor de corte es representativo de los procesos más importantes del sistema.

Como puede apreciarse, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 43,8% (influencia en el mercado) y 43,7% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 17% tanto en influencia en el mercado como en producción. Se debe mencionar la influencia del recubrimiento mediante la electricidad aplicada en el proceso del tratamiento térmico para la deposición, que contribuye con un impacto de 9,4% (influencia en el mercado) y 8,56% (producción). Asimismo, la contribución del aluminio del recubrimiento de Slurry es insignificante, del orden de impacto del 0,137% (proceso de fundición) partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 0,156%.

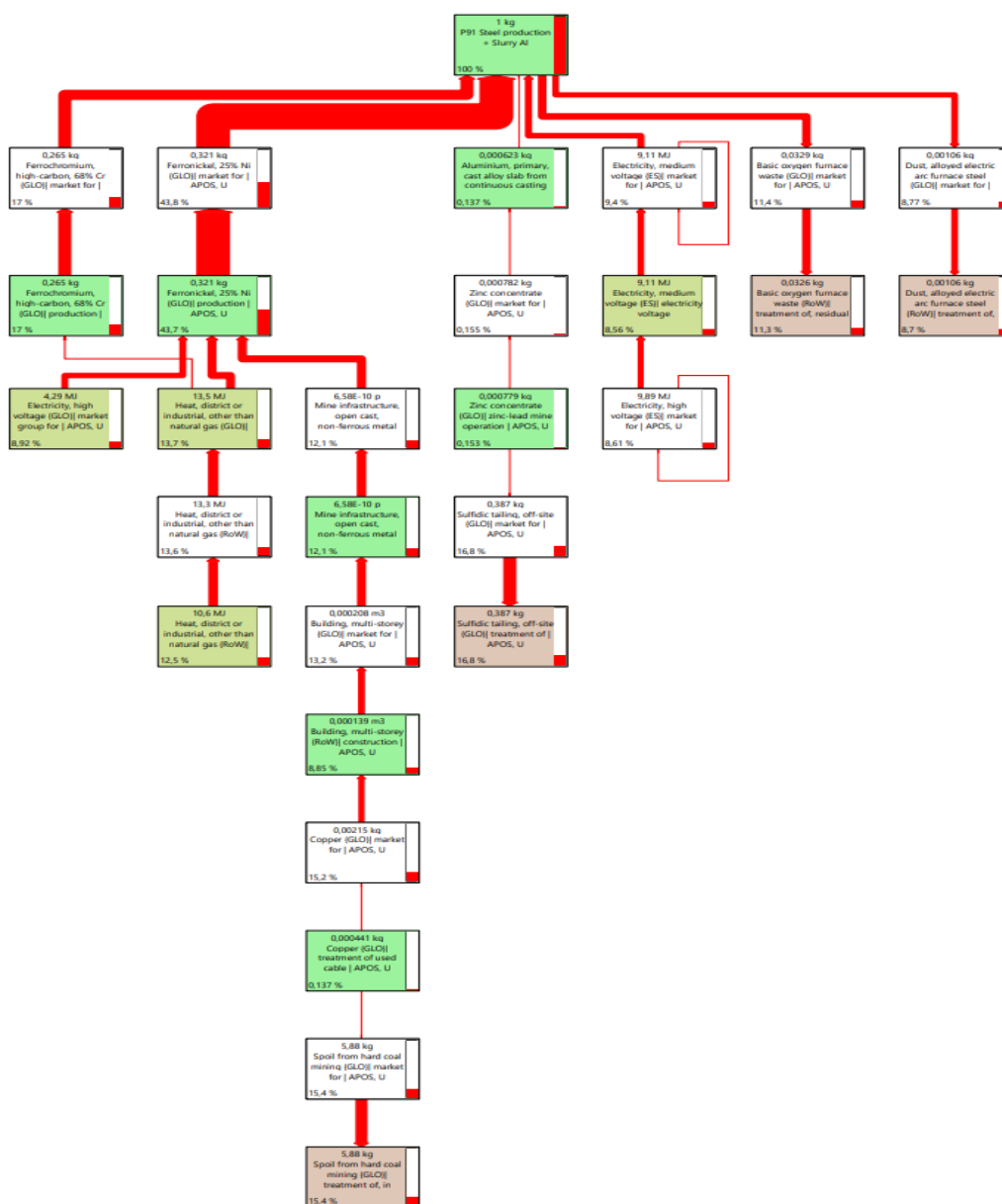


Figura 92: Red P91 + Slurry AI. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

La combinación P91-Slurry Al también produce impactos asociados a la generación y tratamiento de residuos, como puede observarse en la figura 93. Se aprecia que el tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie contribuye en un 15,4% (generado a partir del proceso de tratamiento de cobre usado), el tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen contribuye en un 16,8% (generado a partir del proceso de extracción en la mina del concentrado de zinc-plomo que dará lugar al aluminio primario), el tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno contribuye en un 11,3% y el tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico contribuye en un 8,7%.

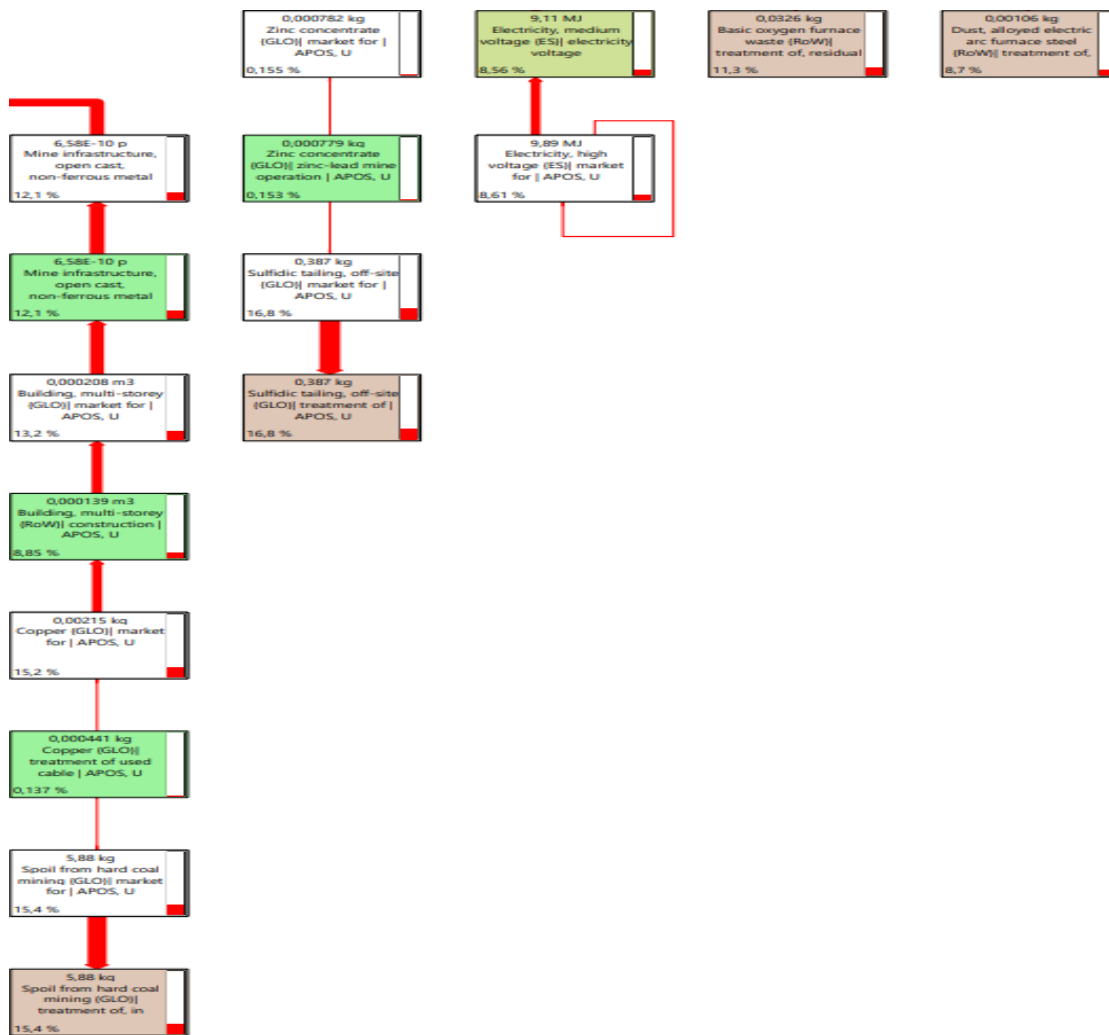


Figura 93: Detalle Red P91 + Slurry Al para residuos de Al y globales. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

La contribución de los procesos asociados al recubrimiento de Slurry de Al son los de menor impacto en la red de entre los estudiados hasta ahora (NiCr y CrN/NbN), lo cual indica el mejor comportamiento de este recubrimiento.

4.4.3.2- Acero ferrítico P92 / Slurry de Al

La combinación de sustrato-recubrimiento P92-Slurry Al origina los datos correspondientes a la Figura 94 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

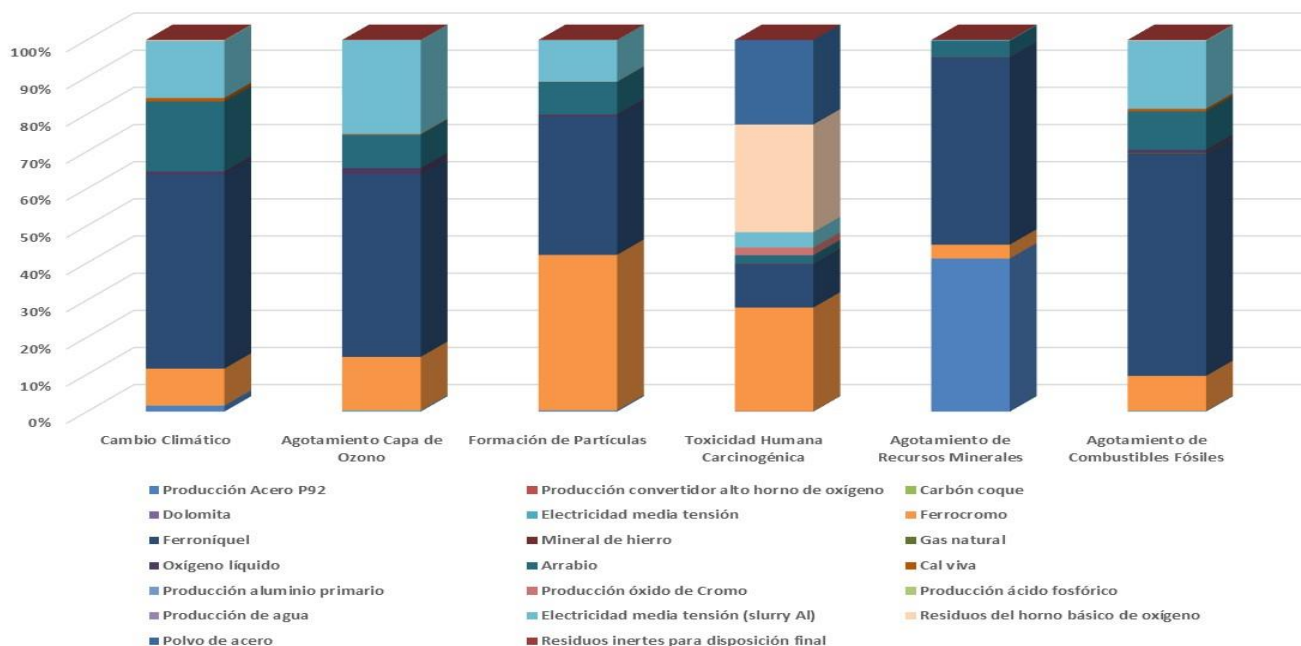


Figura 94: Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la mencionada figura se observa que, del mismo modo que en los sustratos recubiertos con NiCr y con idéntico peso que en el sistema P91-Slurry Al, siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferroníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. También puede observarse, al igual que en el sistema P91-Slurry Al, la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de óxido de cromo correspondiente a la fabricación del recubrimiento de Slurry Al afecta levemente a la toxicidad humana carcinogénica. La producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua (empleados en la fabricación de Slurry Al) tienen un impacto muy leve y casi inapreciable. En cuanto a la electricidad usada en el proceso de deposición del recubrimiento, se constata su influencia en la mayoría de categorías de impacto, excluida el agotamiento de recursos minerales (situación similar a los recubrimientos de NiCr), en donde aparece específicamente el proceso de producción del acero P92. Todo ello se constata en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 95, de evaluación del daño.

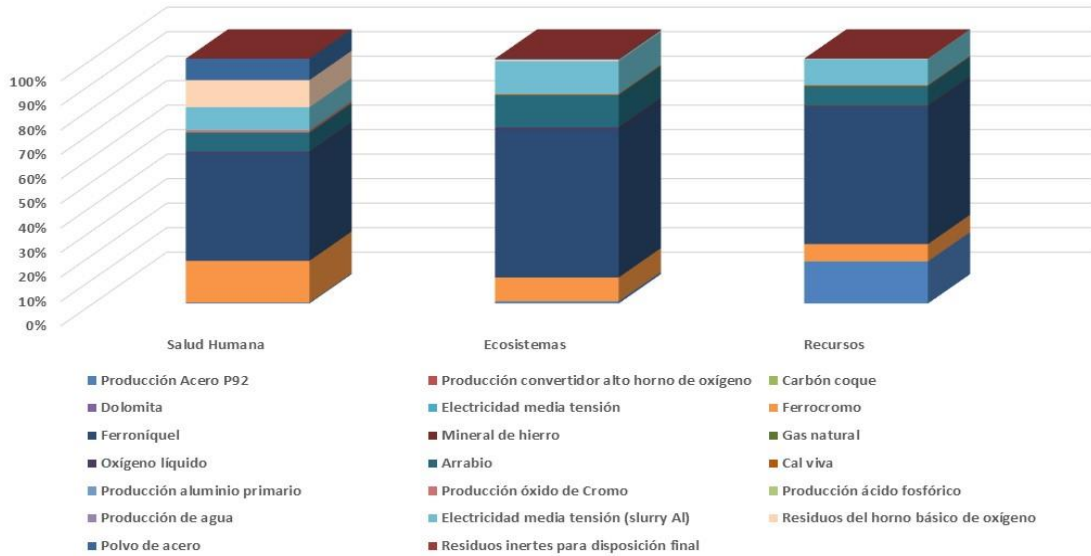


Figura 95: Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 95 de Evaluación del daño se aprecian las tendencias observadas en la gráfica de caracterización para los procesos asociados al recubrimiento de Slurry de Al: mínimo impacto de la producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua, así como leve influencia de la producción de óxido de cromo en el área de salud humana y afectación del uso de electricidad en el proceso de deposición para las tres áreas finales de daño. Cabe comentar que el total de daño de las tres áreas (salud humana expresada en daly, ecosistemas expresada en especies·año y recursos expresada en US dólares) es levemente inferior al correspondiente al sistema P91-Slurry Al y los sistemas sustrato-NiCr, y por supuesto sustrato-CrN/NbN.

Del mismo modo, en la figura 96 de puntuación única por categoría de impacto representada seguidamente, se observa una contribución para la categoría de impacto de la toxicidad humana carcinogénica por parte del recubrimiento de Slurry de Al, del orden de 0,014 Pt debido al Cr_2O_3 presente en la composición de dicho Slurry. El consumo eléctrico afecta de forma reseñable a la categoría de impacto del cambio climático (alrededor de 0,033 Pt) y toxicidad humana carcinogénica (0,028 Pt), de igual modo que en el recubrimiento de Ni50Cr y que en el sistema P91-Slurry Al. No obstante, en ninguno de estos recubrimientos la contribución del consumo eléctrico a las categorías de impacto comentadas es tan reseñable como en el caso del recubrimiento de CrN/NbN. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO

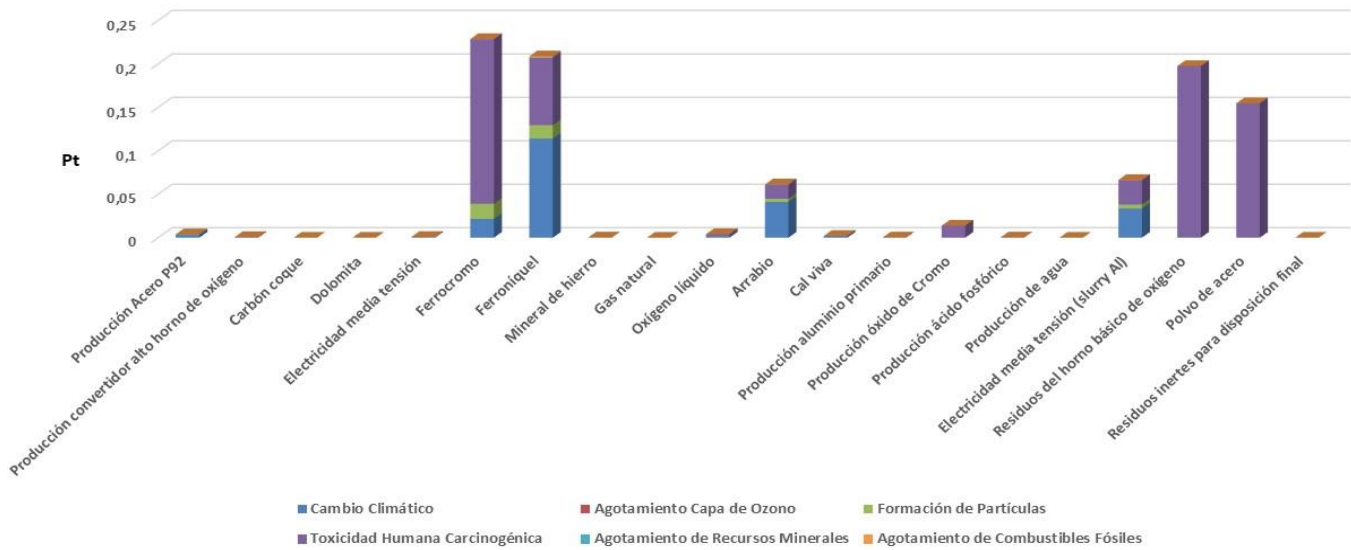


Figura 96: Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 97), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. El Cr₂O₃ del recubrimiento de Slurry de Al genera aproximadamente 0,014 Pt de afectación a salud humana; el consumo eléctrico asociado al proceso del tratamiento térmico en la deposición del recubrimiento genera en torno a 0,017 Pt de afectación a salud humana y 0,023 Pt a ecosistemas. Este último resultado del consumo eléctrico es idéntico al de los sustratos recubiertos de NiCr y al del sistema P91-Slurry Al. El daño total expresado en Pt es menor en el sistema P92-Slurry Al que en el P91-Slurry Al (orden de decimales).

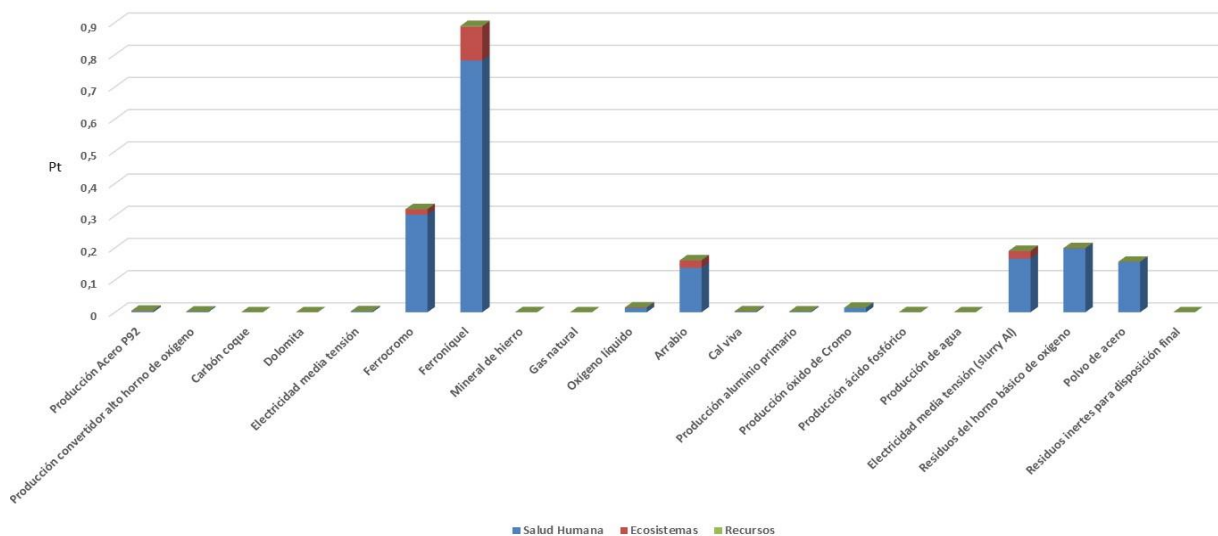


Figura 97: Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Puntuación única. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico P92 con recubrimiento de Slurry Al por pintura y tratamiento térmico de difusión, en la figura 98 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendente de importancia, partiendo de 0,329 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferróniquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento. No aparecen entre las principales contribuciones los procesos de tratamiento de residuos de dicromato de Na (incluido en los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr) ni de producción de electricidad (incluido en el sustrato P92 con recubrimiento de CrN/NbN), sino que su contribución es menor. Vuelve a observarse, como en la figura anterior, que la contribución total de todos los procesos expresada en Pt es menor en el sistema P92-Slurry Al que en el P91-Slurry Al (orden de decimales).

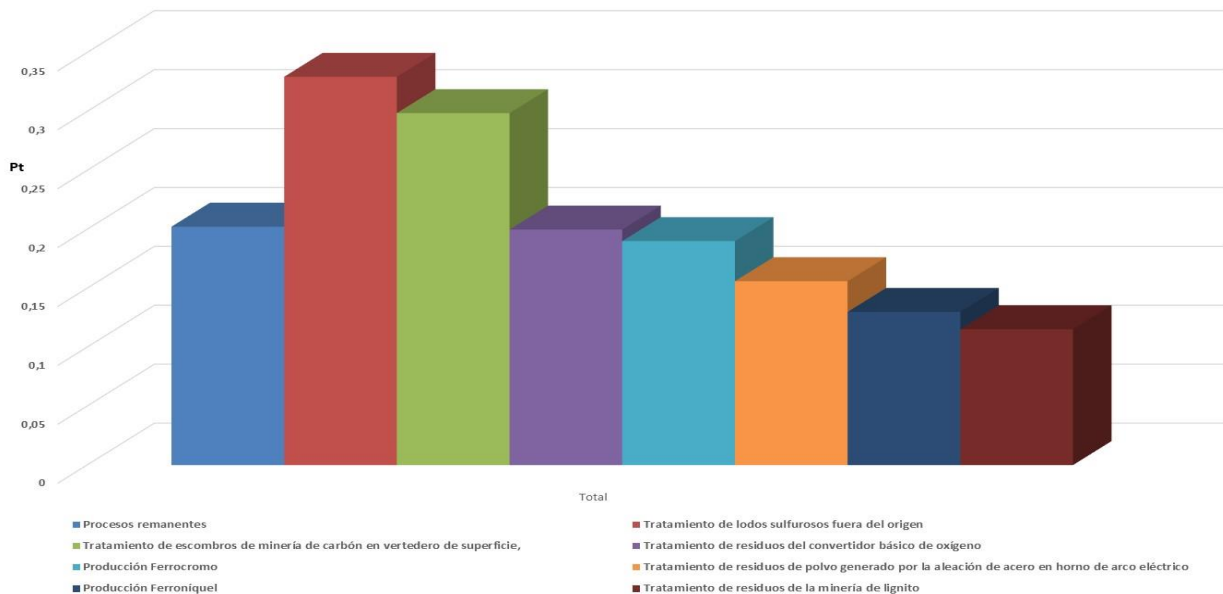


Figura 98: Contribución proceso P92 + Slurry Al. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 99 se representa el diagrama de red de evaluación del daño (salud humana en daly), para un valor de corte del 8,5% que es representativo de los procesos principales del sistema. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado.

Como puede apreciarse, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 43,8% (influencia en el mercado) y 43,7% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 17% tanto en influencia en el mercado como en producción. Se debe mencionar la influencia del recubrimiento mediante la electricidad aplicada en el proceso del tratamiento térmico para la deposición, que contribuye con un impacto de 9,4% (influencia en el mercado) y 8,56% (producción). Todos estos resultados son idénticos que los correspondientes al sistema P91-Slurry Al. Asimismo, la contribución del aluminio del recubrimiento de Slurry es insignificante, del orden de impacto del 0,136% (proceso de fundición) partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 0,152%; dichos valores experimentan variaciones del orden de milésimas con respecto al sistema P91-Slurry Al. Las contribuciones asociadas a la generación y tratamiento de residuos no varían.

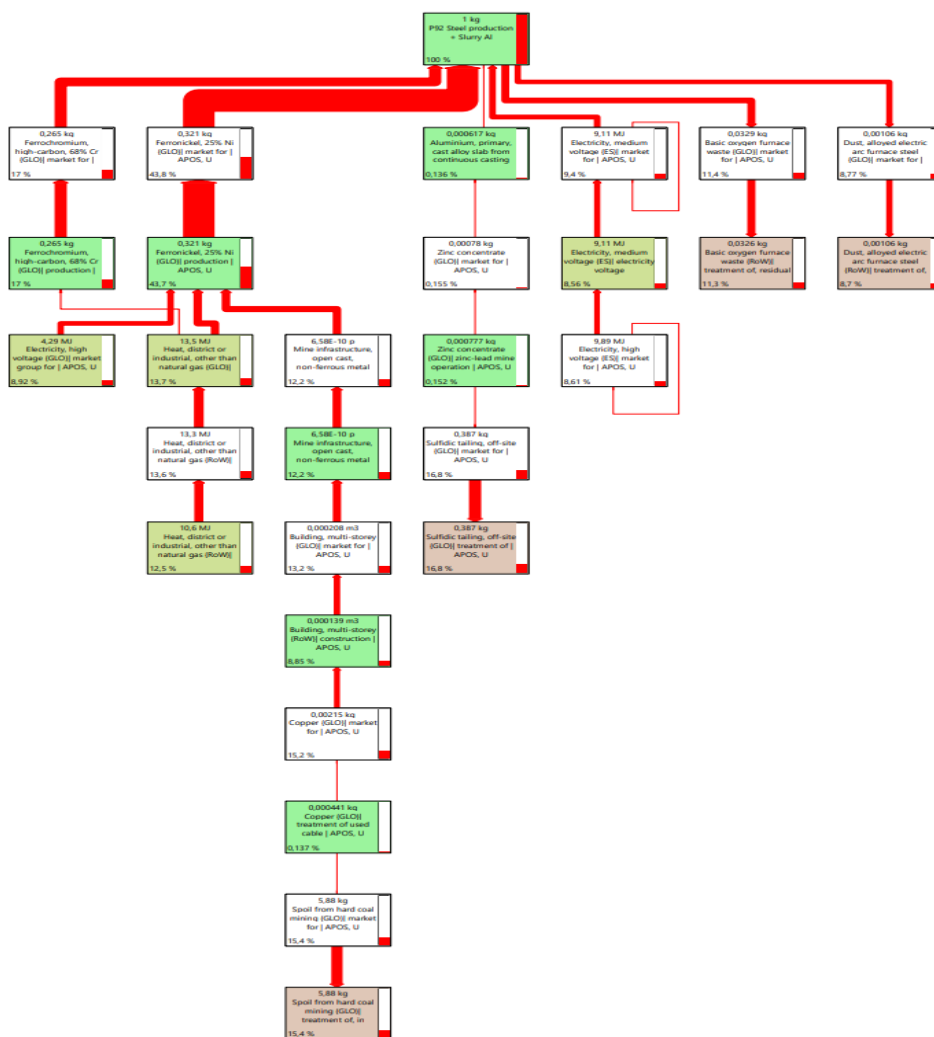


Figura 99: Red P92 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia como Simapro 9.0

4.4.3.3- Acero ferrítico VM12 / Slurry de Al

La combinación de sustrato-recubrimiento VM12-Slurry Al origina los datos correspondientes a la Figura 100 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

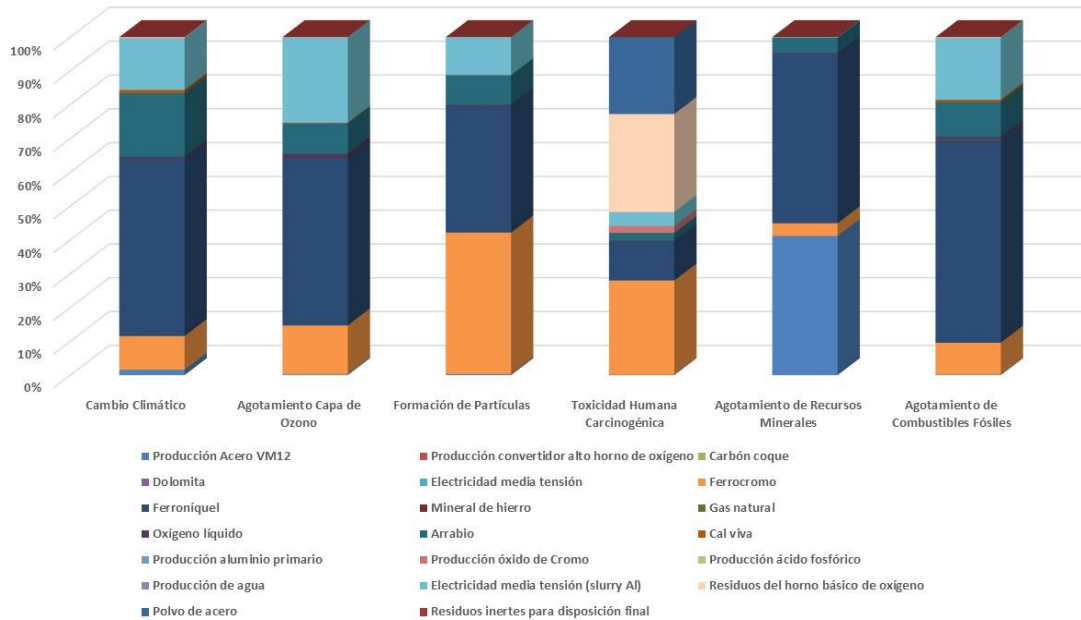


Figura 100: Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la mencionada figura se observa que, del mismo modo que en los sustratos recubiertos con NiCr y con idéntico peso que en los sistemas P91 y P92-Slurry Al, siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferroníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. También puede observarse, al igual que en los sistemas P91 y P92-Slurry Al, la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de óxido de cromo correspondiente a la fabricación del recubrimiento de Slurry Al afecta levemente a la toxicidad humana carcinogénica. La producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua (empleados en la fabricación de Slurry Al) tienen un impacto muy leve y casi inapreciable. En cuanto a la electricidad usada en el proceso de deposición del recubrimiento, se constata su influencia en la mayoría de las categorías de impacto, excluida el agotamiento de recursos minerales (situación similar a los recubrimientos de NiCr), en donde aparece específicamente el proceso de producción del acero VM12. Todo ello se constata en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 101, de evaluación del daño.

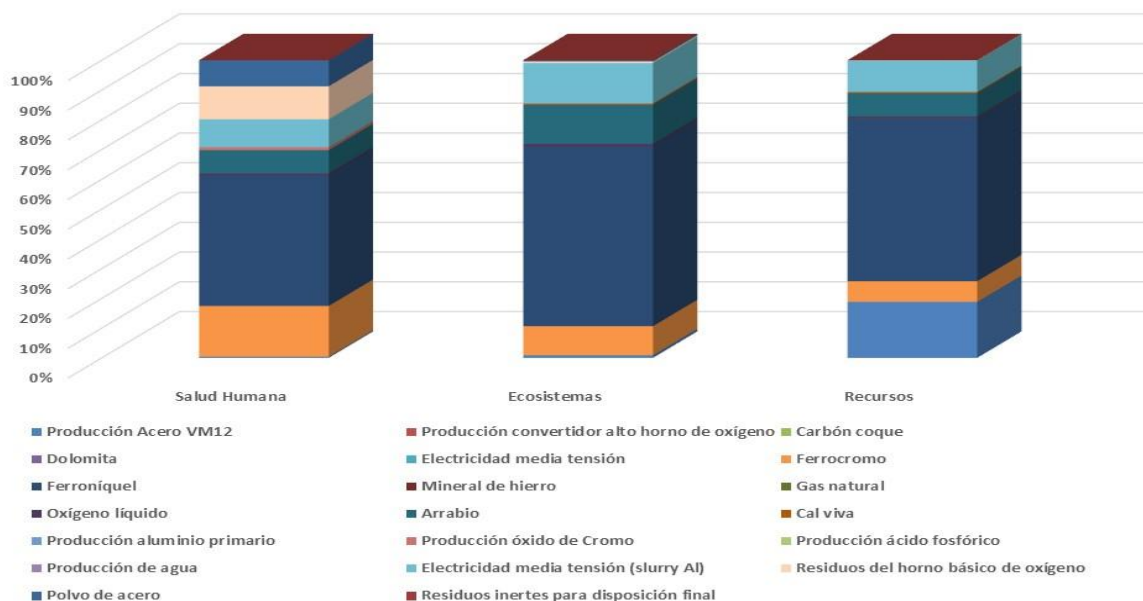


Figura 101: Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 101 de Evaluación del daño se aprecian las tendencias observadas en la gráfica de caracterización para los procesos asociados al recubrimiento de Slurry de Al: mínimo impacto de la producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua, así como leve influencia de la producción de óxido de cromo en el área de salud humana y afectación del uso de electricidad en el proceso de deposición para las tres áreas finales de daño. Cabe comentar que el total de daño de las tres áreas (salud humana expresada en daly, ecosistemas expresada en especies·año y recursos expresada en US dólares) es levemente superior a los correspondientes a los sistemas P91 y P92-Slurry Al, mientras que es inferior al de los sistemas sustrato-NiCr, y por supuesto sustrato-CrN/NbN.

Del mismo modo, en la figura 102 de puntuación única por categoría de impacto representada seguidamente, se observa una contribución para la categoría de impacto de la toxicidad humana carcinogénica por parte del recubrimiento de Slurry de Al, del orden de 0,014 Pt debido al Cr_2O_3 presente en la composición de dicho Slurry. El consumo eléctrico afecta de forma reseñable a la categoría de impacto del cambio climático (alrededor de 0,033 Pt) y toxicidad humana carcinogénica (0,028 Pt), de igual modo que en el recubrimiento de Ni50Cr y que en los sistemas P91 y P92-Slurry Al. No obstante, en ninguno de estos recubrimientos la contribución del consumo eléctrico a las categorías de impacto comentadas es tan reseñable como en el caso del recubrimiento de CrN/NbN. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

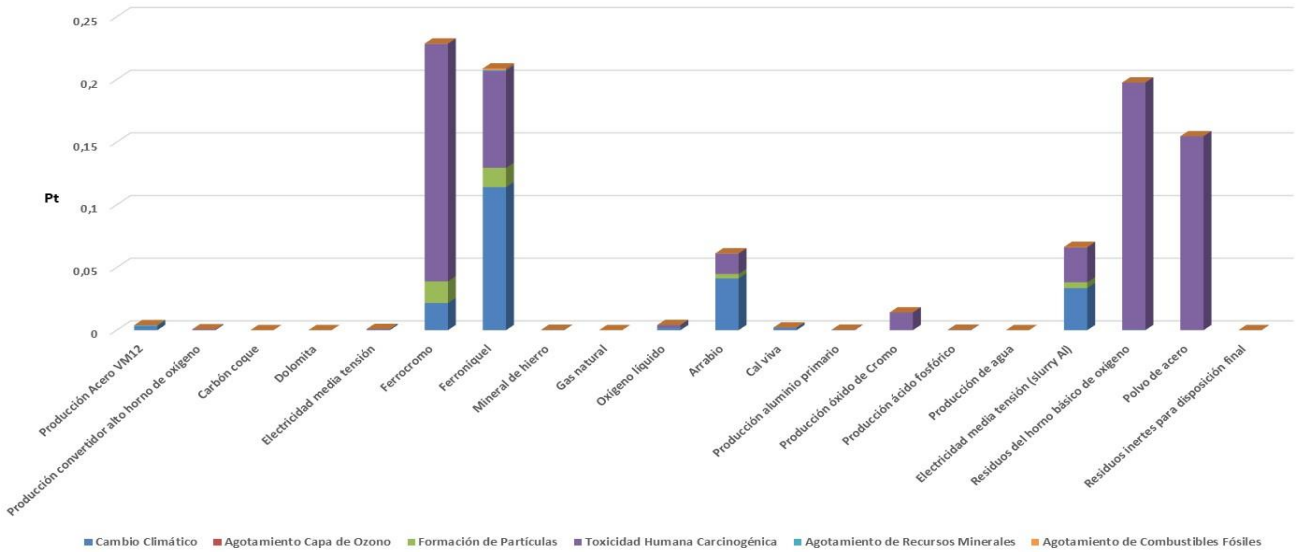


Figura 102: Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 103), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. El Cr_2O_3 del recubrimiento de Slurry de Al genera aproximadamente 0,014 Pt de afectación a salud humana; el consumo eléctrico asociado al proceso del tratamiento térmico en la deposición del recubrimiento genera en torno a 0,017 Pt de afectación a salud humana y 0,023 Pt a ecosistemas. Este último resultado del consumo eléctrico es idéntico al de los sustratos recubiertos de NiCr y al de los sistemas P91 y P92-Slurry Al. El daño total expresado en Pt es mayor en el sistema VM12-Slurry Al que en el P91 y P92-Slurry Al (orden de decimales).

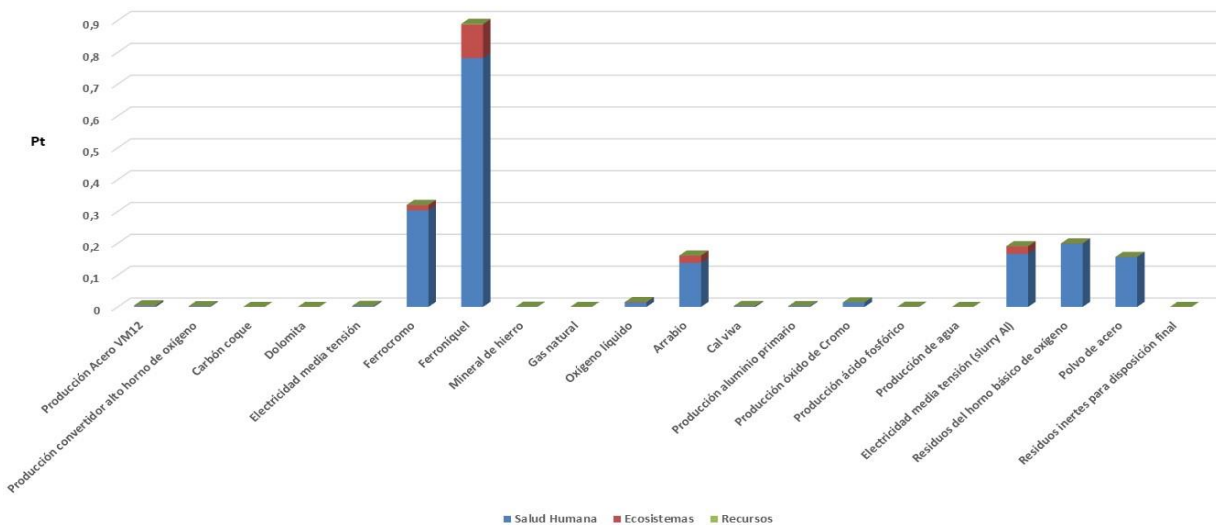


Figura 103: Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Puntuación única. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si analizamos la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero ferrítico VM12 con recubrimiento de Slurry Al por pintura y tratamiento térmico de difusión, en la figura 104 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendente de importancia, partiendo de 0,329 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferromniquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento. No aparecen entre las principales contribuciones los procesos de tratamiento de residuos de dicromato de Na (incluido en los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr) ni de producción de electricidad (incluido en el acero P92 con recubrimiento de CrN/NbN), sino que su contribución es menor. Vuelve a observarse, que la contribución total de todos los procesos expresada en Pt es mayor en el sistema VM12-Slurry Al que en el P91 y P92-Slurry Al (orden de decimales).

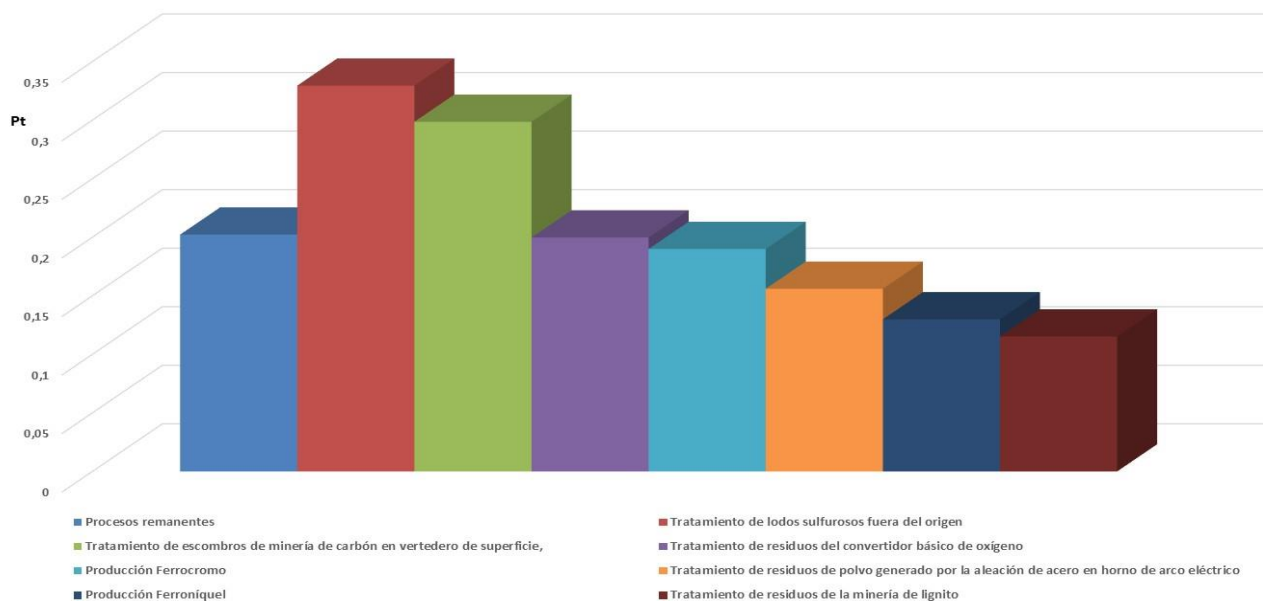


Figura 104: Contribución proceso VM12 + Slurry Al. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 105 se representa el diagrama de red de evaluación del daño (salud humana en daly), para un valor de corte del 8,5% que sería representativo de los elementos más importantes. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, lo cual señala cuáles son los materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado.

Como puede apreciarse, el ferróníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 43,8% (influencia en el mercado) y 43,6% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 17% tanto en influencia en el mercado como en producción. Se debe mencionar la influencia del recubrimiento mediante la electricidad aplicada en el proceso del tratamiento térmico para la deposición, que contribuye con un impacto de 9,4% (influencia en el mercado) y 8,56% (producción). Todos estos resultados son idénticos que los correspondientes a los sistemas P91, P92-Slurry Al, salvo por una décima en la producción de ferróníquel. Asimismo, la contribución del aluminio del recubrimiento de Slurry es insignificante, del orden de impacto del 0,139% (proceso de fundición) partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 0,153%; dichos valores siguen experimentando variaciones del orden de milésimas con respecto al resto de sustratos con recubrimiento de Slurry Al. Pasa lo mismo con las contribuciones asociadas a la generación y tratamiento de residuos.

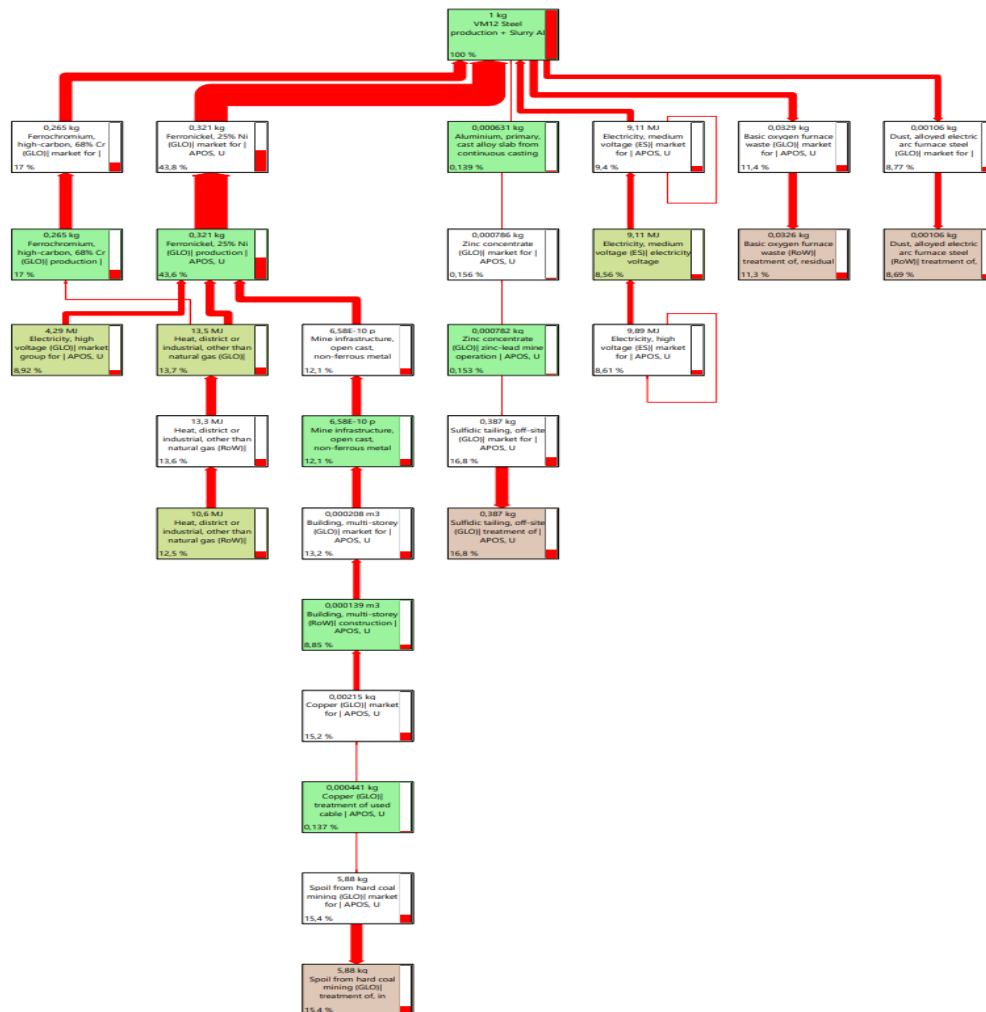


Figura 105: Red VM12 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

4.4.3.4- Acero austenítico AISI 347H / Slurry de Al

La combinación de sustrato-recubrimiento AISI 347H-Slurry Al genera los datos correspondientes a la Figura 106 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

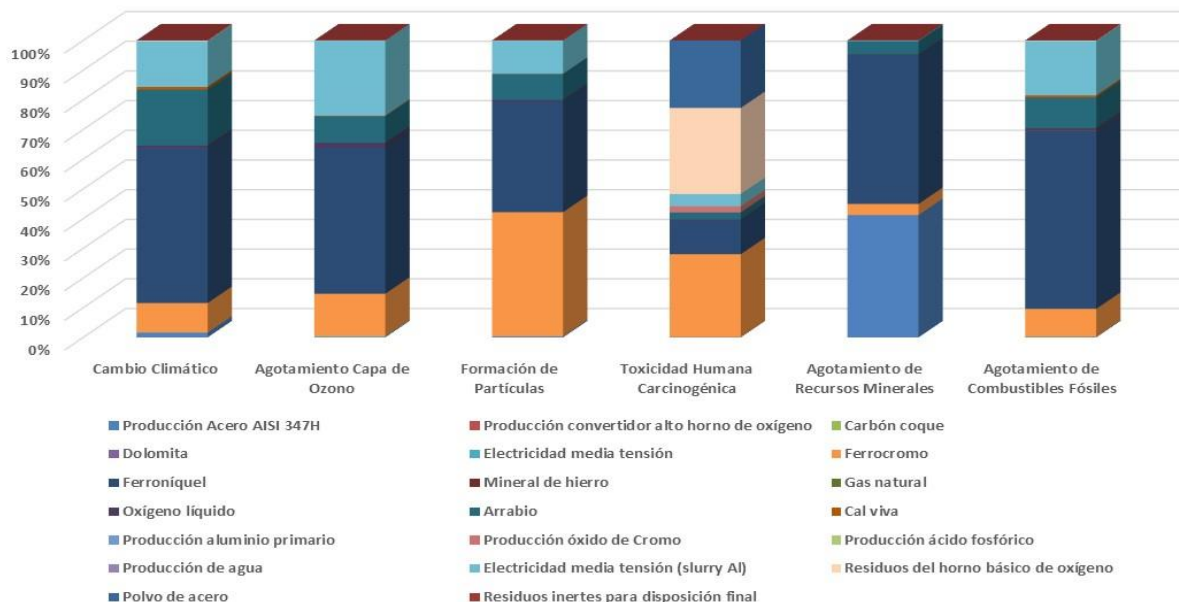


Figura 106: Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la mencionada figura se observa que, del mismo modo que en los sustratos recubiertos con NiCr y con idéntico peso que en los sistemas P91, P92 y VM12-Slurry Al, siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferróniquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. También puede observarse, al igual que en los sistemas P91, P92 y VM12-Slurry Al, la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de óxido de cromo correspondiente a la fabricación del recubrimiento de Slurry Al afecta levemente a la toxicidad humana carcinogénica. La producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua (empleados en la fabricación de Slurry Al) tienen un impacto muy leve y casi inapreciable. En cuanto a la electricidad usada en el proceso de deposición del recubrimiento, se constata su influencia en la mayoría de las categorías de impacto, excluida el agotamiento de recursos minerales (situación similar a los recubrimientos de NiCr), en donde aparece específicamente el proceso de producción del acero AISI 347H. Todo ello se constata en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 107, de evaluación del daño.

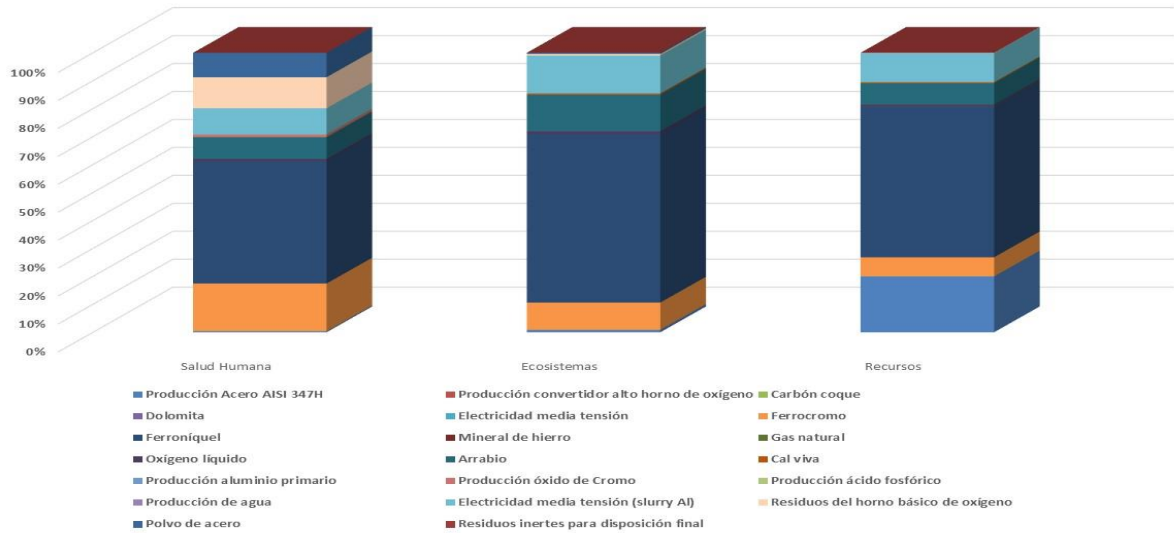


Figura 107: Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 107 de Evaluación del daño se aprecian las tendencias observadas en la gráfica de caracterización para los procesos asociados al recubrimiento de Slurry de Al: mínimo impacto de la producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua, así como leve influencia de la producción de óxido de cromo en el área de salud humana y afectación del uso de electricidad en el proceso de deposición para las tres áreas finales de daño. Cabe comentar que el total de daño de las tres áreas (salud humana expresada en daly, ecosistemas expresada en especies·año y recursos expresada en US dólares) es del orden de los sistemas P91, P92 y VM12-Slurry Al (con el máximo valor de todos en el área de recursos), mientras que es inferior al de los sistemas sustrato-NiCr, y por supuesto sustrato-CrN/NbN.

Del mismo modo, en la figura 108 de puntuación única por categoría de impacto representada seguidamente, se observa una contribución para la categoría de impacto de la toxicidad humana carcinogénica por parte del recubrimiento de Slurry de Al, del orden de 0,014 Pt debido al Cr_2O_3 presente en la composición de dicho Slurry. El consumo eléctrico afecta de forma reseñable a la categoría de impacto del cambio climático (alrededor de 0,033 Pt) y toxicidad humana carcinogénica (0,028 Pt), de igual modo que en el recubrimiento de NiCr y que en los sistemas P91, P92 y VM12-Slurry Al. No obstante, en ninguno de estos recubrimientos la contribución del consumo eléctrico a las categorías de impacto comentadas es tan reseñable como en el caso del CrN/NbN. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

MATERIALES Y RECUBRIMIENTOS A ESTUDIO

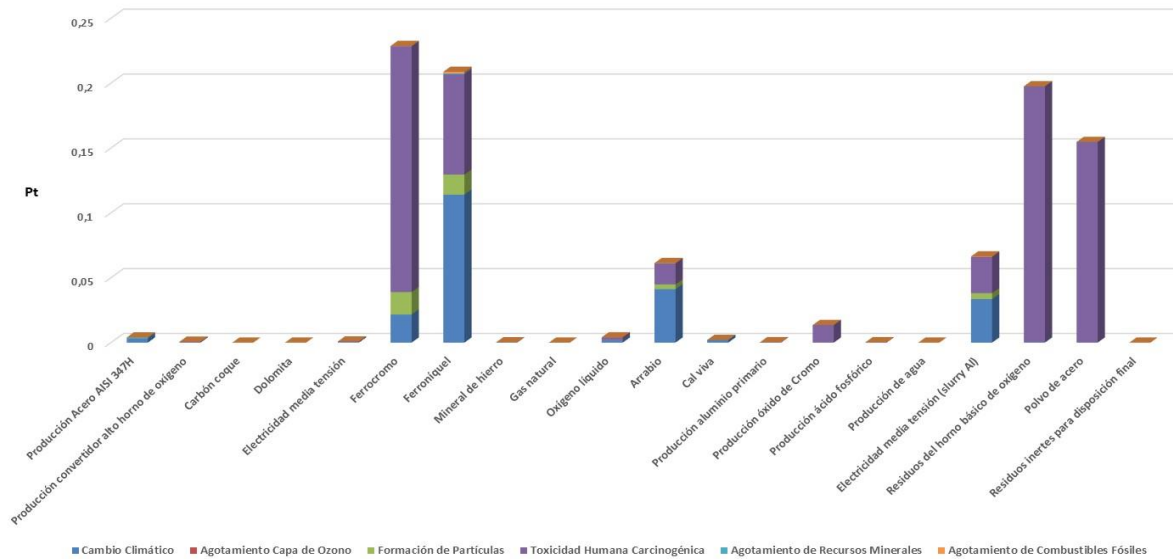


Figura 108: Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 109), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. El Cr₂O₃ del recubrimiento de Slurry de Al genera aproximadamente 0,014 Pt de afectación a salud humana; el consumo eléctrico asociado al proceso del tratamiento térmico en la deposición del recubrimiento genera en torno a 0,017 Pt de afectación a salud humana y 0,023 Pt a ecosistemas. Este último resultado del consumo eléctrico es idéntico al de los sustratos recubiertos de NiCr y al de los sistemas P91, P92 y VM12-Slurry Al. El daño total expresado en Pt es del mismo orden del de dichos sistemas.

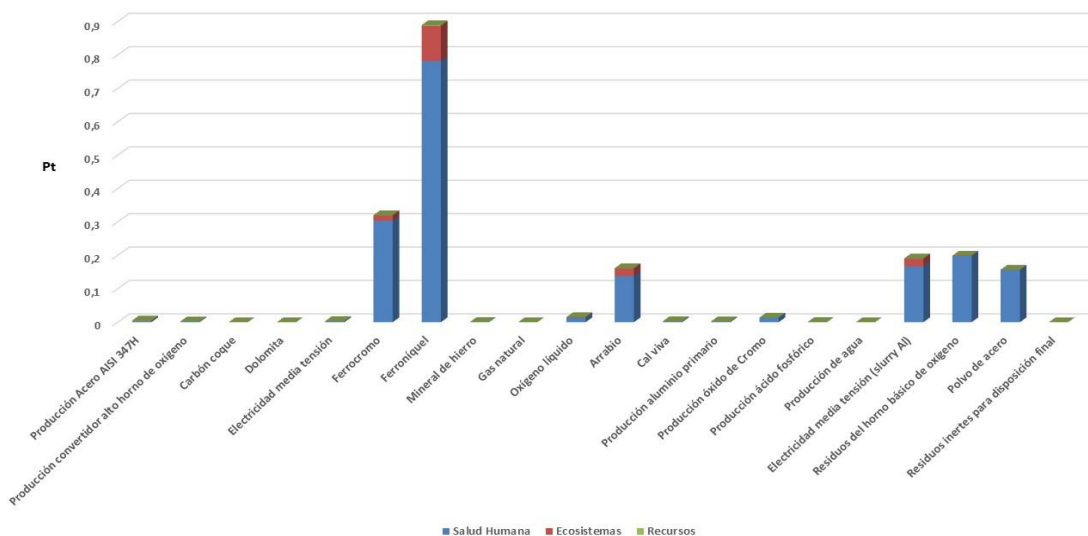


Figura 109: Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Puntuación única. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si analizamos la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero inoxidable austenítico AISI 347H con recubrimiento de Slurry Al por pintura y tratamiento térmico de difusión, en la figura 110 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendente de importancia, partiendo de 0,329 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferróniquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento. No aparecen entre las principales contribuciones los procesos de tratamiento de residuos de dicromato de Na (incluido en los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr) ni de producción de electricidad (incluido en el sustrato P92 con recubrimiento de CrN/NbN), sino que su contribución es menor. Vuelve a observarse, como en la figura anterior, que la contribución total de todos los procesos expresada en Pt es similar a los sistemas P91, P92 y VM12.

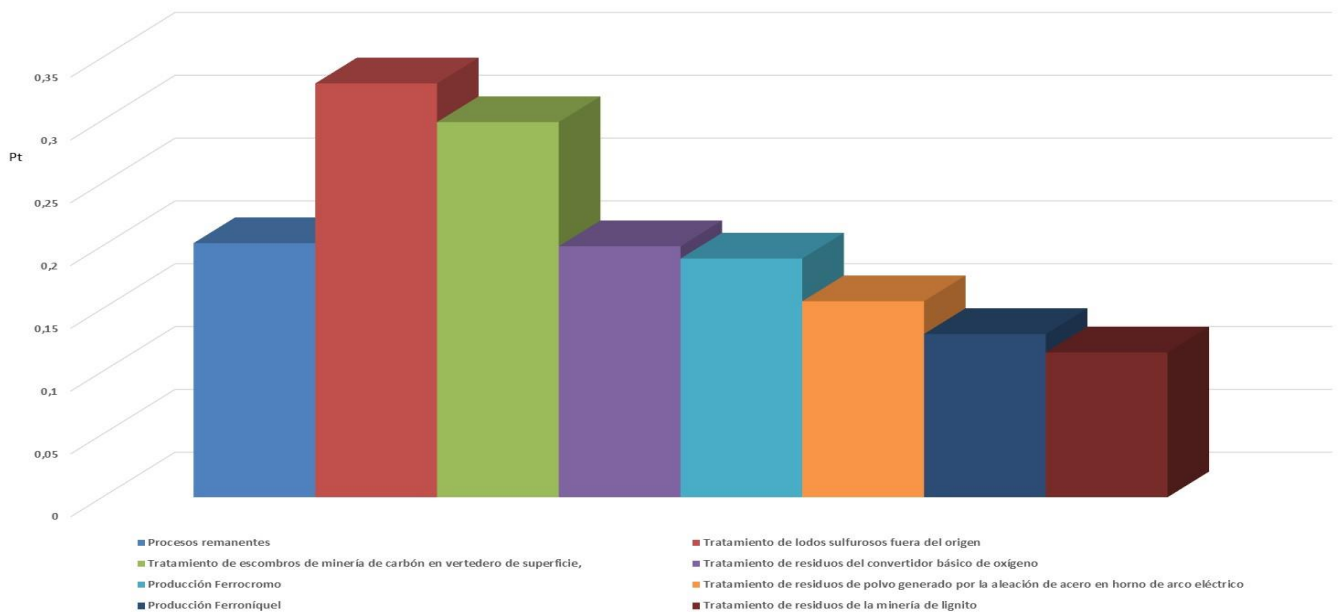


Figura 110: Contribución proceso AISI 347H + Slurry Al. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 105 se representa el diagrama de red de evaluación del daño (salud humana en daly), con un valor de corte del 8,5%, el cual se considera representativo de los elementos principales del sistema. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, señalando cuáles son los materiales y procesos que influyen en mayor o menor medida al impacto causado.

Como puede apreciarse, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 43,8% (influencia en el mercado) y 43,7% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 17% tanto en influencia en el mercado como en producción. Se debe mencionar la influencia del recubrimiento mediante la electricidad aplicada en el proceso del tratamiento térmico para la deposición, que contribuye con un impacto de 9,4% (influencia en el mercado) y 8,56% (producción). Todos estos resultados son idénticos que los correspondientes a los sistemas P91, P92, VM12-Slurry Al. Asimismo, la contribución del aluminio del recubrimiento de Slurry es insignificante, del orden de impacto del 0,134% (proceso de fundición) partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 0,152%; dichos valores siguen experimentando variaciones del orden de milésimas con respecto al resto de sustratos con recubrimiento de Slurry Al. Las contribuciones asociadas a la generación y tratamiento de residuos no varían.

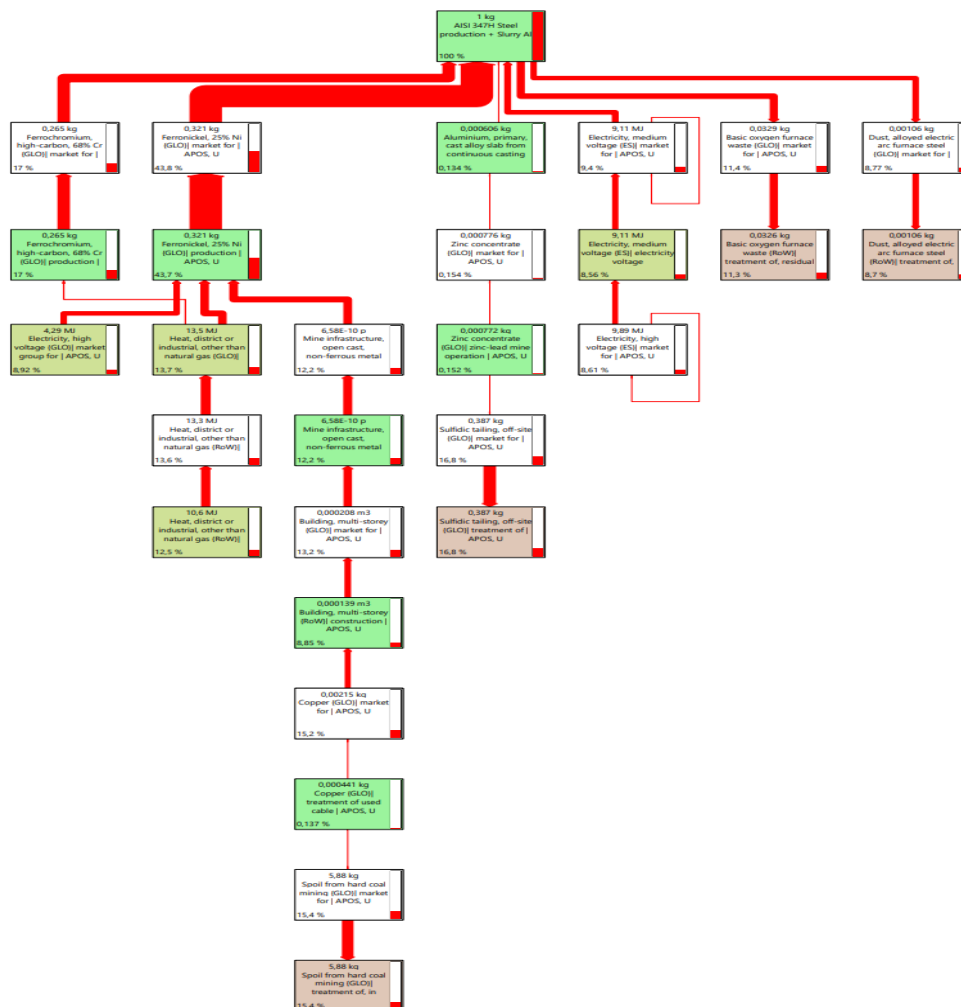


Figura 111: Red AISI 347H + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia com Simapro 9.0

4.4.3.5- Acero austenítico AISI 321 / Slurry de Al

La combinación de sustrato-recubrimiento AISI 321-Slurry Al genera los datos correspondientes a la Figura 112 que se muestra seguidamente, donde se refleja la caracterización del sistema estudiado. Este gráfico es equivalente al correspondiente a la evaluación del daño por categoría de impacto.

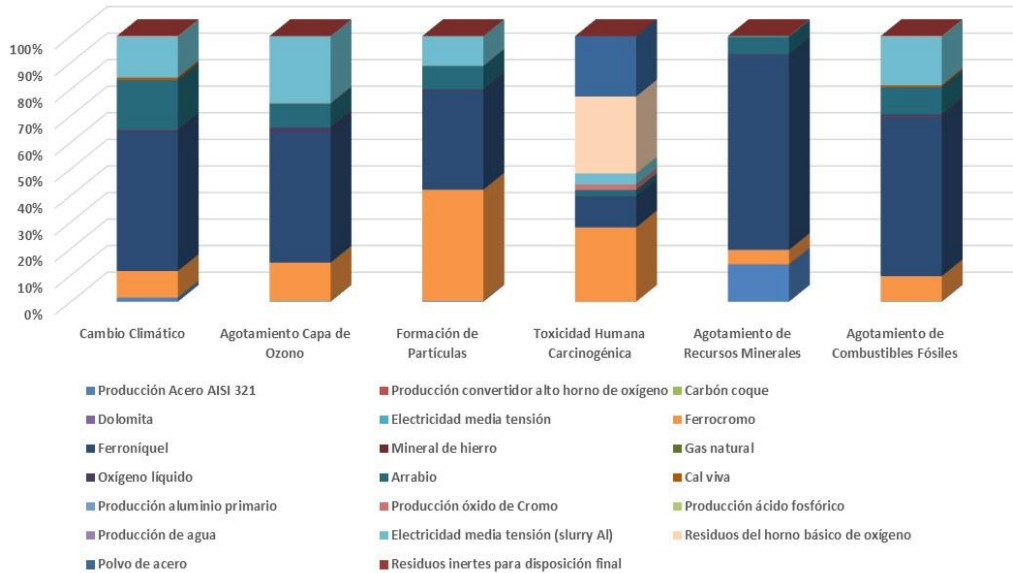


Figura 112: Análisis de impacto AISI 321 + Slurry Al. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la mencionada figura se observa que, del mismo modo que en los sustratos recubiertos con NiCr y con idéntico peso que el resto de los sistemas con Slurry Al, siguen teniendo importancia las aleaciones de ferrocromo y ferróníquel empleadas en el proceso de fabricación del acero empleado como sustrato. También puede observarse, al igual que en el resto de los sistemas con Slurry Al, la aportación de más elementos a las distintas categorías de impacto que en el caso del sustrato desnudo; por ejemplo, se constata que la producción de óxido de cromo correspondiente a la fabricación del recubrimiento de Slurry Al afecta levemente a la toxicidad humana carcinogénica. La producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua (empleados en la fabricación de Slurry Al) tienen un impacto muy leve y casi inapreciable. En cuanto a la electricidad usada en el proceso de deposición del recubrimiento, se constata su influencia en la mayoría de categorías de impacto, excluida el agotamiento de recursos minerales (situación similar a los recubrimientos de NiCr), en donde aparece específicamente el proceso de producción del acero AISI 321. Todo ello se constata en la siguiente gráfica de análisis de impacto, figura 113, de evaluación del daño.

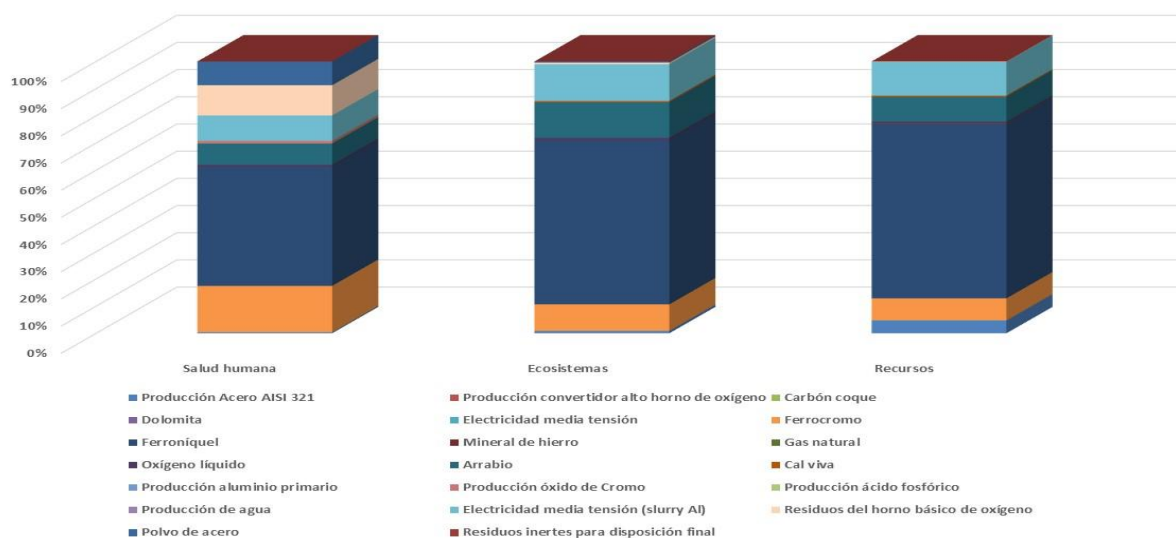


Figura 113: Análisis de impacto AISI 321+ Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 113 de Evaluación del daño se aprecian las tendencias observadas en la gráfica de caracterización para los procesos asociados al recubrimiento de Slurry de Al: mínimo impacto de la producción de aluminio primario, ácido fosfórico y agua, así como leve influencia de la producción de óxido de cromo en el área de salud humana y afectación del uso de electricidad en el proceso de deposición para las tres áreas finales de daño. Cabe comentar que el total de daño de las tres áreas (salud humana expresada en daly, ecosistemas expresada en especies·año y recursos expresada en US dólares) es del orden del resto de sistemas con Slurry Al (con el mínimo valor de todos en el área de recursos), mientras que es inferior al de los sistemas sustrato-NiCr, y por supuesto sustrato-CrN/NbN.

Del mismo modo, en la figura 114 de puntuación única por categoría de impacto representada seguidamente, se observa una contribución para la categoría de impacto de la toxicidad humana carcinogénica por parte del recubrimiento de Slurry de Al, del orden de 0,014 Pt debido al Cr_2O_3 presente en la composición de dicho Slurry. El consumo eléctrico afecta de forma reseñable a la categoría de impacto del cambio climático (alrededor de 0,033 Pt) y toxicidad humana carcinogénica (0,028 Pt), de igual modo que en el recubrimiento de NiCr y que en el resto de los sistemas con Slurry Al. No obstante, en ninguno de estos recubrimientos la contribución del consumo eléctrico a las categorías de impacto comentadas es tan reseñable como en el caso del CrN/NbN. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

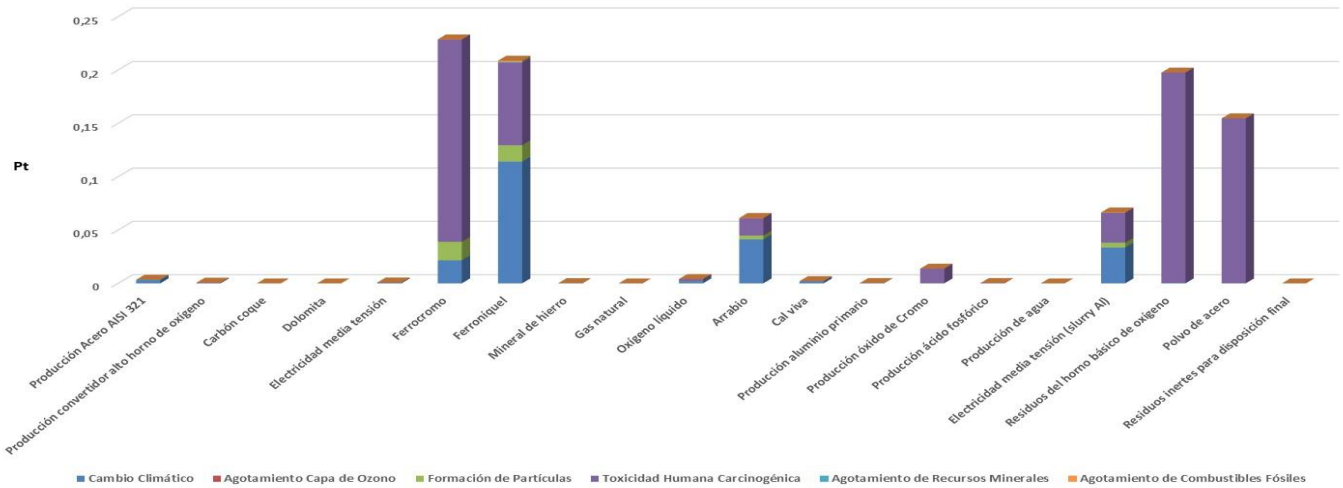


Figura 114: Análisis de impacto AISI 321 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única referida a áreas finales de daño (ver figura 115), se sigue comprobando que el impacto generado por el recubrimiento y su proceso de deposición sigue afectando de una manera mayoritaria a la salud humana, seguida en menor medida de ecosistemas y recursos. El Cr_2O_3 del recubrimiento de Slurry de Al genera aproximadamente 0,014 Pt de afectación a salud humana; el consumo eléctrico asociado al proceso del tratamiento térmico en la deposición del recubrimiento genera en torno a 0,017 Pt de afectación a salud humana y 0,023 Pt a ecosistemas. Este último resultado del consumo eléctrico es idéntico al de los sustratos recubiertos de NiCr y al del resto de sistemas con Slurry Al. El daño total expresado en Pt es del mismo orden del de dichos sistemas, si bien se observa el menor valor del área recursos para el sistema AISI 321-Slurry Al.

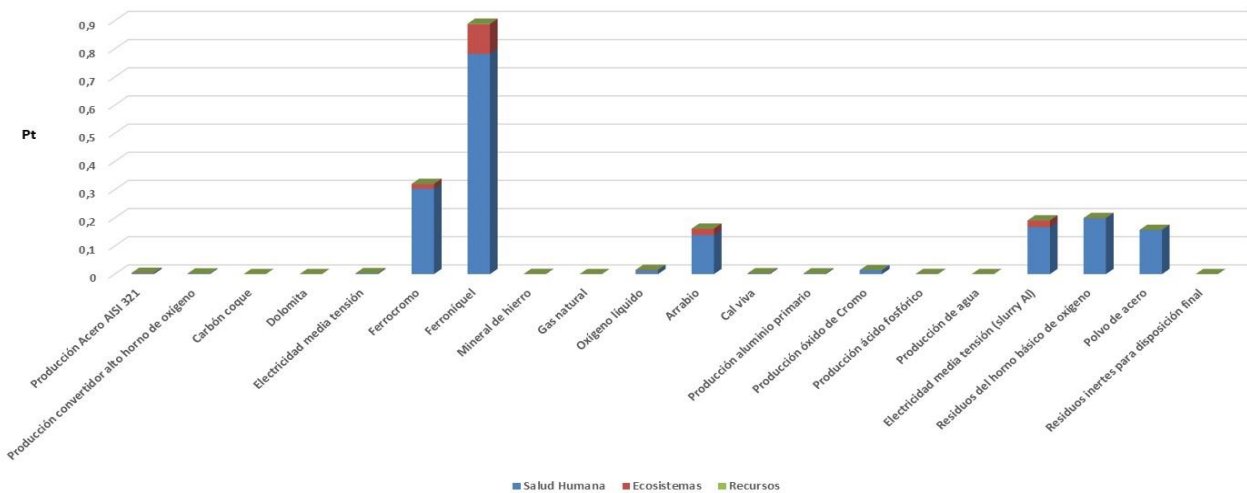


Figura 115: Análisis de impacto AISI 321 + Slurry Al. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si analizamos la puntuación única en contribución de procesos (resultados expresados en Pt) que dan lugar a 1 kg de acero inoxidable austenítico AISI 321 con recubrimiento de Slurry Al por pintura y tratamiento térmico de difusión, en la figura 116 se muestra en primer lugar la contribución de los procesos remanentes y posteriormente la contribución del resto de procesos en orden descendente de importancia, partiendo de 0,329 Pt. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen, tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie, tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno, producción de ferrocromo, tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico, y producción de ferróniquel. Los resultados observados tienen mayores valores de Pt con respecto al sustrato sin recubrimiento. No aparecen entre las principales contribuciones los procesos de tratamiento de residuos de dicromato de Na (incluido en los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr) ni de producción de electricidad (incluido en el sustrato P92 con recubrimiento de CrN/NbN), sino que su contribución es menor. Vuelve a observarse, como en la figura anterior, que la contribución total de todos los procesos expresada en Pt es similar al resto de sistemas con Slurry Al.

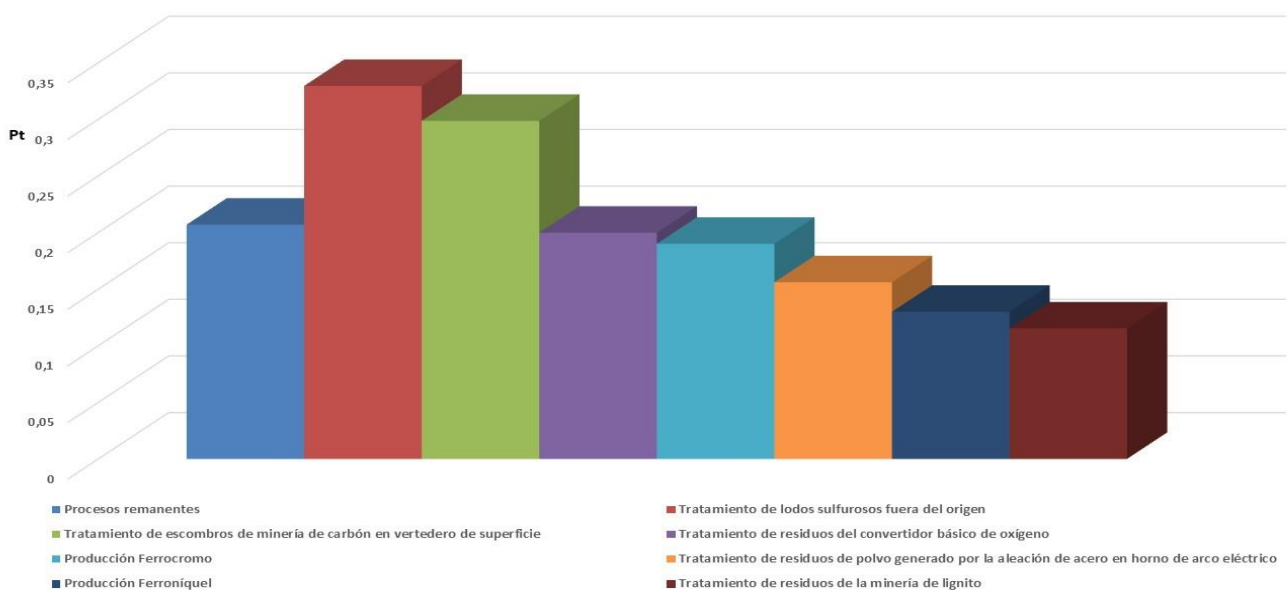


Figura 116: Contribución proceso AISI 321 + Slurry Al. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En el árbol de contribución correspondiente a la figura 117 se representa el diagrama de red de evaluación del daño (salud humana en daly), para un valor de corte del 8,5%; con este valor se pueden visualizar los elementos principales del sistema. Se distinguen una serie de flujos de trazo con mayor o menor grosor, indicativo de materiales y procesos que van a influenciar en mayor o menor medida en el impacto generado.

Como puede apreciarse, el ferroníquel es el elemento que ofrece un trazado más grueso y por este motivo es el que contribuye con un impacto mayor, correspondiendo a un 43,8% (influencia en el mercado) y 43,7% (producción). El ferrocromo es el siguiente elemento en importancia presentando un peso de impacto en porcentaje del 17% tanto en influencia en el mercado como en producción. Se debe mencionar la influencia del recubrimiento mediante la electricidad aplicada en el proceso del tratamiento térmico para la deposición, que contribuye con un impacto de 9,4% (influencia en el mercado) y 8,56% (producción).

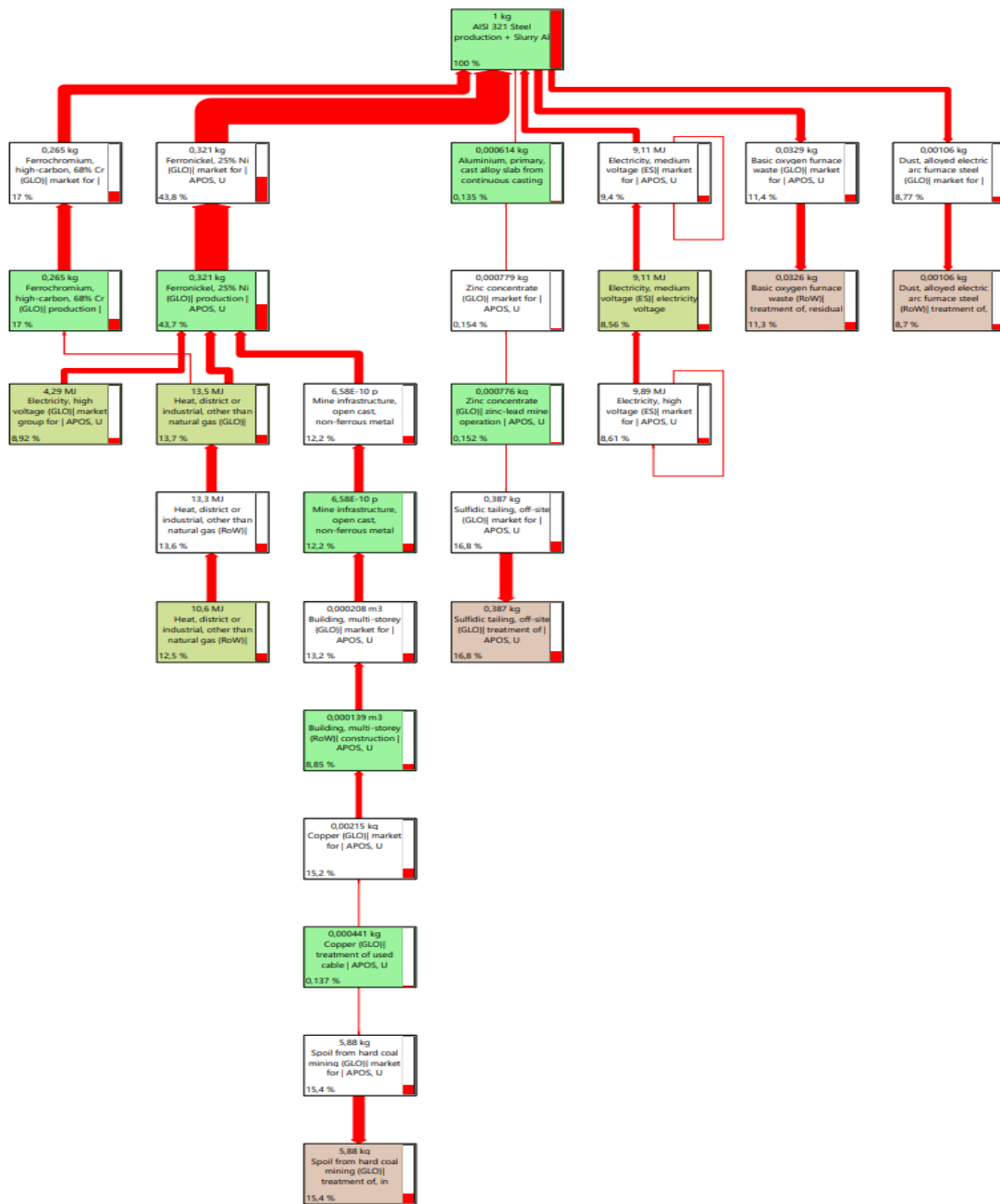


Figura 117: Red AISI 321 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Todos estos resultados son idénticos que los correspondientes al resto de sustratos con recubrimiento de Slurry Al. Además, la contribución del aluminio del recubrimiento de Slurry es insignificante, del orden de impacto del 0,135% (proceso de fundición) partiendo del proceso de extracción en la mina, con el 0,152%; dichos valores siguen experimentando variaciones del orden de milésimas con respecto al resto de sustratos con recubrimiento de Slurry Al. Las contribuciones de generación y tratamiento de residuos no varían.

Puede deducirse por tanto como resumen de todo lo analizado hasta ahora que los sistemas sustrato-recubrimiento incrementan los impactos ambientales correspondientes al sustrato desnudo, lógicamente debido a la adición del recubrimiento mediante el proceso de deposición elegido. En estos casos, los nuevos procesos tenidos en cuenta en el ACV corresponden a los asociados a la fabricación y generación del recubrimiento. Se comprueba que los resultados para sustratos con el mismo tipo de recubrimiento son similares, lo cual da una idea de la gran influencia de la cantidad y composición del recubrimiento, así como del proceso de deposición utilizado. A la vista de los resultados se infiere que los sistemas P92-Slurry Al y AISI 321-Slurry Al son los medioambientalmente más favorables.

5. RESULTADOS: ANÁLISIS DE CICLOS DE VIDA COMPARATIVOS

5.1.- Objetivo y alcance del ACV

Como ya se ha visto, a través del Análisis de Ciclo de Vida de los sustratos, recubrimientos y procesos de deposición de los recubrimientos que son objeto de estudio de la presente tesis, es posible cuantificar los distintos impactos ambientales generados por cada configuración. Siguiendo lo indicado en los apartados correspondientes de las normas ISO 14040 y 14044, se han tenido en consideración las etapas requeridas en la ejecución de los ACV:

- Objetivo y Alcance
- Análisis de Inventario
- Evaluación del Impacto
- Interpretación de Resultados

Se presenta en este apartado el ACV comparativo de las distintas configuraciones con el objetivo primordial de llevar a cabo un análisis comparativo de los posibles impactos ambientales causados por las configuraciones de sustratos, recubrimientos y procesos de deposición de los recubrimientos estudiados. Ello permitirá analizar los resultados y escoger la alternativa medioambientalmente más beneficiosa.

Se seguirá empleado el software informático SimaPro 9.0.0 y utilizado la base de datos Ecoinvent, incorporada al programa, con el fin de obtener una evaluación medioambiental sistemática y robusta de acuerdo con la normativa y alineada con los resultados de los ACV individuales. El método de evaluación de impacto Recipe, ya utilizado en el ACV individual de sustratos y recubrimientos, permitirá obtener indicadores de categorías de impacto y de daño, enfocadas al punto final y medio.

Los resultados generados a través del ACV son expresados en función de los indicadores con sus respectivas unidades, asociados a las categorías de impacto correspondiente (fase de *Caracterización*) de cara a llevar a cabo la evaluación de daños.

La fase de *Normalización* es llevada a cabo con el fin de suprimir las dimensiones en las distintas categorías de impacto y posibilitar el establecimiento de análisis comparativos entre ellas a través de la recopilación de datos asociados a emisiones totales y consumo de recursos efectuados por el sistema de estudio y el cálculo de las categorías de impacto y daño.

La fase de *Ponderación* es un paso opcional donde se incluye la perspectiva social que tiene influencia en la evaluación de las categorías que se alcanza mediante la valoración de un grupo de expertos.

Los análisis y resultados se han estructurado de la forma que se muestra a continuación:

- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros ferríticos P91, P92 y VM12 entre sí, sin recubrimiento.
- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros inoxidable austeníticos AISI 347H y AISI 321 entre sí, sin recubrimiento.
- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros ferríticos con recubrimiento.
- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros inoxidable austeníticos con recubrimiento.
- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros sin recubrimiento frente a los aceros con el recubrimiento correspondiente.
- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los procesos de recubrimiento entre sí.
- Análisis de Ciclo de vida comparativo de los aceros frente a los procesos de recubrimiento correspondientes.
- Análisis económico de los aceros con el recubrimiento empleado de cara a evaluar el coste en recursos empleado en cada uno de los casos.

Las unidades funcionales de los sistemas considerados vienen definidas por 1 kg del sustrato designado y por la cantidad correspondiente de recubrimiento depositado para dicha unidad funcional, en función de los datos disponibles en la bibliografía y teniendo en cuenta las características del proceso de deposición empleado (energía requerida para dicha deposición).

Los sustratos y recubrimientos que se ha tenido en consideración para el estudio han sido seleccionados y ampliados partiendo de la base de datos de SimaPro 9.0.0, Ecoinvent 3.

A la hora de efectuar los análisis, se han tenido en cuenta los procesos correspondientes a la producción los distintos sustratos y recubrimientos, así como el transporte asociado a los materiales durante la fabricación de los mismos.

En lo que se refiere al escenario de residuo, se ha tenido en cuenta el reciclado de los materiales incluidos en el estudio.

5.2.- Resultados Obtenidos

Teniendo en consideración los resultados que se obtengan, se valorará de forma comparativa los Análisis de Ciclo de Vida de los correspondientes sustratos ferríticos y austeníticos entre sí, con y sin recubrimiento, de cara a establecer qué material y qué material con recubrimiento presentan el menor impacto medioambiental.

Se llevará a cabo la misma operación para comparar los sustratos frente a los sustratos con el recubrimiento, de cara a evaluar la influencia del recubrimiento en cada uno de ellos.

Posteriormente, se procederá a la evaluación medioambiental comparativa de los procesos de recubrimiento empleados, con el fin de establecer cuál de ellos es medioambientalmente más beneficioso. Asimismo, se evaluará de forma comparativa el sustrato frente al proceso de recubrimiento utilizado en dicho sustrato.

Por otro lado, se efectuará un análisis desde una perspectiva económica de los sustratos y recubrimientos empleados, con el fin de identificar aquéllos con menor coste en recursos y a cotejar su comportamiento medioambiental.

Por último, se presentarán las conclusiones obtenidas a raíz de los análisis precedentes.

5.2.1.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros ferríticos

Con el fin de establecer la comparativa entre los sustratos ferríticos P91, P92 y VM12, se ha realizado el análisis de ciclo de vida individual de cada uno de dichos materiales estableciendo como unidad funcional comparativa la misma en todos los casos, la cual se ha fijado en 1 kg de material.

Al proceder a comparar 1 kg de acero ferrítico P91 con 1 kg de acero ferrítico P92 y 1 kg de acero ferrítico VM12, se obtuvo la figura 118 correspondiente a la caracterización. Puede observarse como los tres sustratos ferríticos tienen resultados idénticos en todas las categorías de impacto revisadas, a excepción del agotamiento de recursos minerales donde el menor peso corresponde al P92 (95% aproximadamente), seguido del P91 (97% aproximadamente) y VM12 (100%).

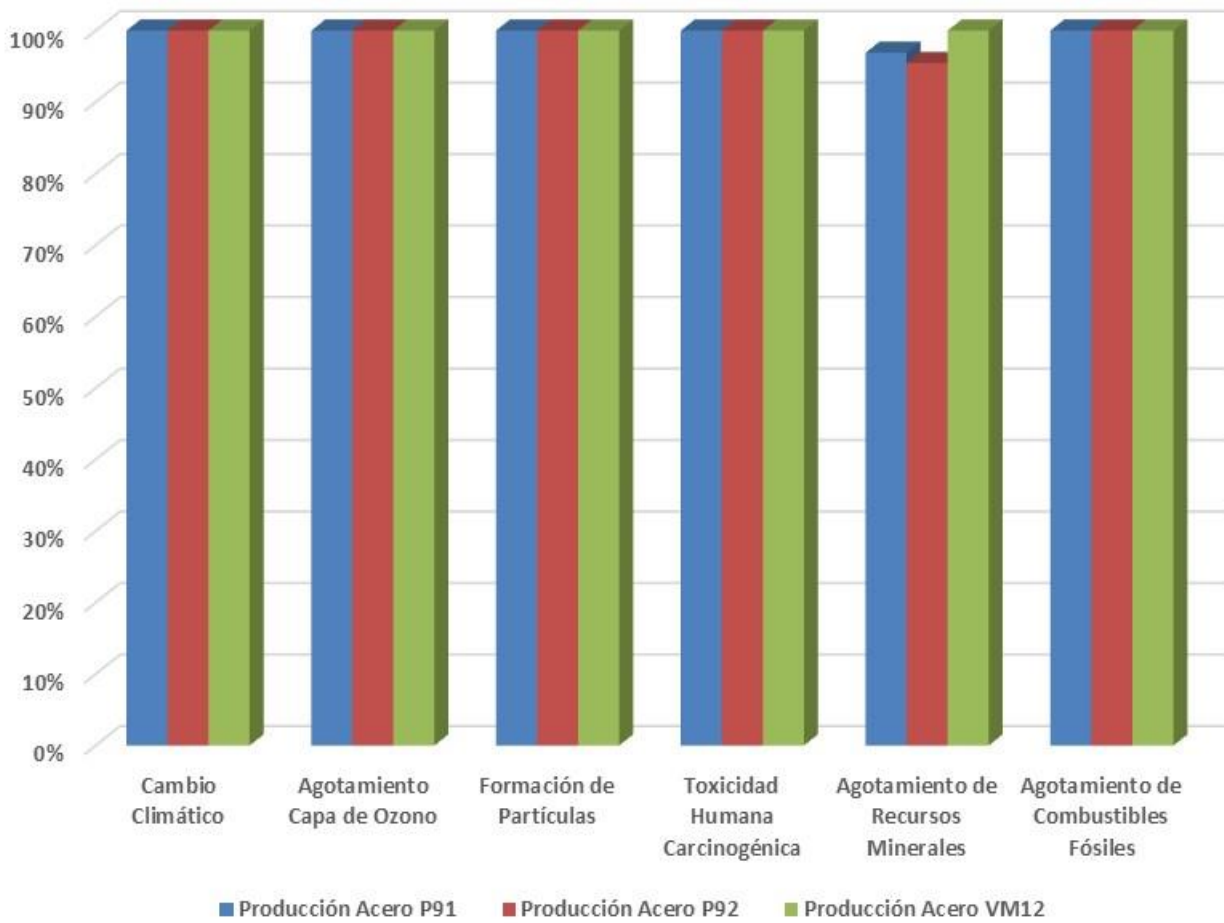


Figura 118: Análisis de impacto comparativo ferríticos. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a la normalización por categoría de impacto estudiada, se dispone de la figura 119. En dicha figura puede apreciarse los resultados prácticamente idénticos obtenidos para los tres sustratos ferríticos. Cabe destacar la importancia, en orden decreciente, de las siguientes categorías de impacto: toxicidad humana carcinogénica (valor del orden de 0,0021), cambio climático (valor del orden de 0,0006) y formación de partículas (valor del orden de 0,0001). Las categorías de impacto correspondientes a agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles tendrían una menor importancia en este gráfico de normalización. Sólo se observan diferencias del orden de decimales entre los aceros ferríticos en la categoría de agotamiento de recursos minerales: el mayor valor corresponde a VM12, seguido de P91 y por último P92, que sería el sustrato medioambientalmente más idóneo.

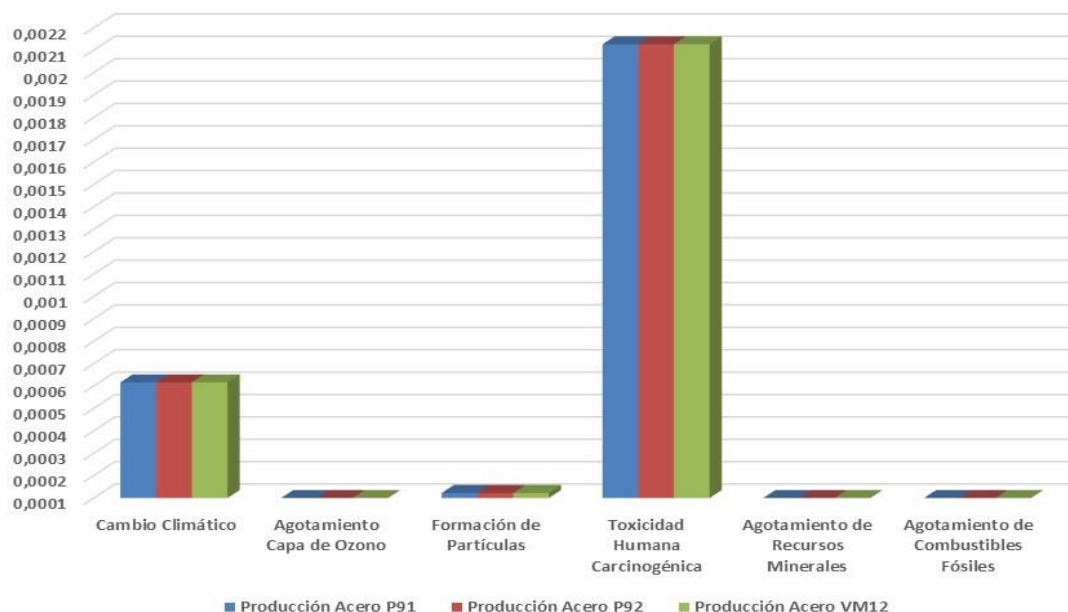


Figura 119: Análisis de impacto comparativo ferríticos. Normalización por categoría de impacto. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por cuanto se refiere a normalización relativa a áreas finales de daño, se observa en la figura 120 que los tres sustratos ferríticos tienen resultados prácticamente idénticos. El área correspondiente a la salud humana tiene una mayor importancia (valor aproximado de 0,0053), seguido a gran distancia de ecosistemas (valor aproximado de 0,0003) y recursos. Sólo se observan diferencias del orden de decimales entre los aceros ferríticos en el área final de daño de recursos: el mayor valor corresponde a VM12, seguido de P91 y por último P92, que sería el sustrato medioambientalmente más idóneo.

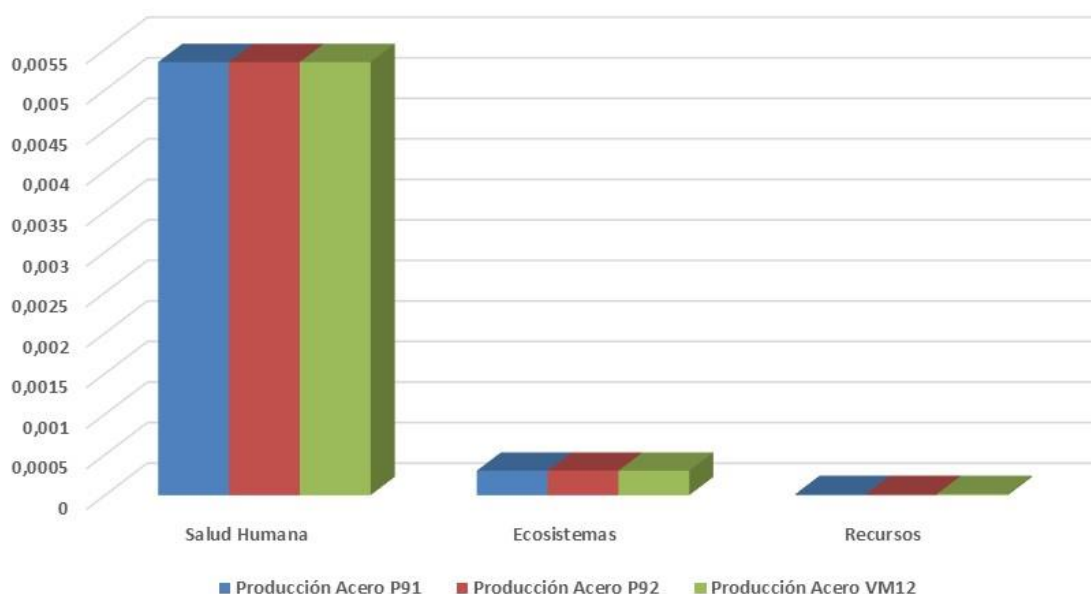


Figura 120: Análisis de impacto comparativo ferríticos. Normalización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única por categoría de impacto, véase en la figura 121 que los resultados son prácticamente idénticos para los tres aceros ferríticos. Se observan distintos valores en la contribución de las distintas categorías de impacto predominantes: toxicidad humana – carcinogénica (0,64 Pt aproximadamente), cambio climático (0,18 Pt aproximadamente), formación de partículas (0,04 Pt aproximadamente) y agotamiento de recursos minerales (0,001 Pt aproximadamente). Las mayores puntuaciones corresponden a la toxicidad humana, como puede corroborarse en el gráfico. El daño total de todas las categorías de impacto expresado en Pt sería mayor en el caso del acero VM12, seguido del P91 y por último el P92, que sería el sustrato medioambientalmente más idóneo debido a su menor valor en la categoría de agotamiento de recursos minerales. Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

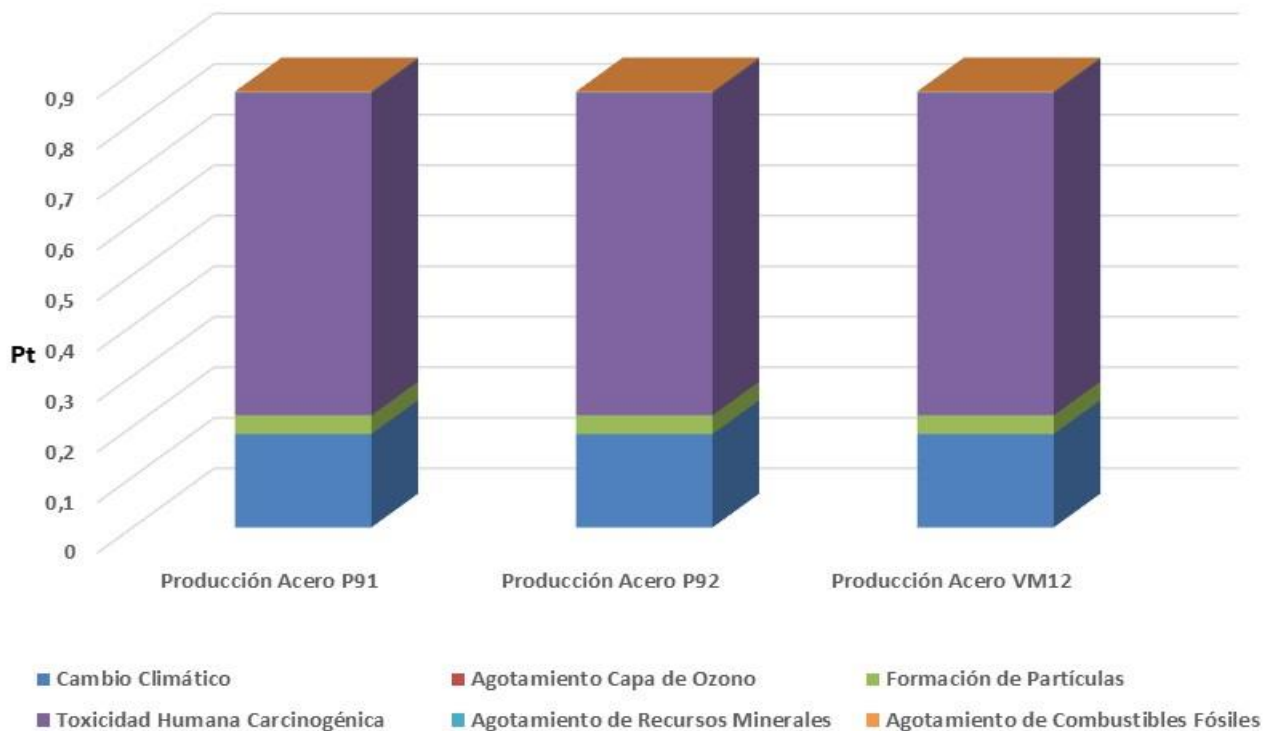


Figura 121: Análisis de impacto comparativo ferríticos. Puntuación única por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la evaluación del daño para salud humana (expresada en DALY) por contribución de procesos que dan lugar a 1 kg de cada uno de los aceros ferríticos estudiados, en la figura 122 se puede comprobar que los resultados reflejados son totalmente idénticos en los tres casos. Se muestran en orden descendente de importancia la contribución de dichos procesos, poniendo en primer lugar la contribución correspondiente a procesos remanentes.

Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen (8,15e-5 DALY aproximadamente), tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie (6,48e-5 DALY aproximadamente), tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno (5,90e-5 DALY aproximadamente), producción de ferrocromo (5,62e-5 DALY aproximadamente), tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico (4,61e-5 DALY aproximadamente), y producción de ferróniquel (3,48e-5 DALY aproximadamente).

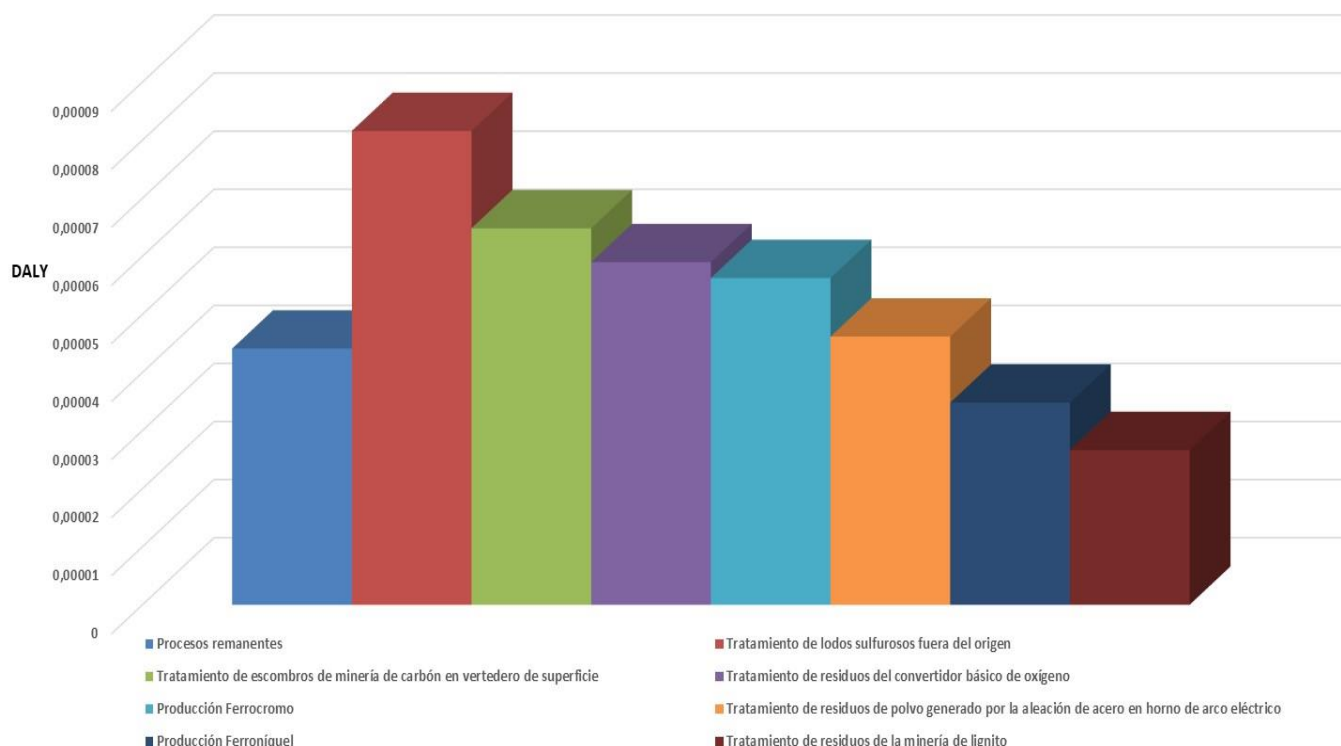


Figura 122: Contribuciones de proceso aceros ferríticos P91, P92 y VM12. Evaluación del daño Human Health.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A la vista de los resultados puede concluirse que se obtienen resultados idénticos para los tres sustratos analizados, a excepción de las diferencias observadas en la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales donde el menor peso corresponde al P92, seguido del P91 y VM12. Con lo cual, se recomienda el uso del acero P92 frente al P91, y de este último frente al VM12, en vista de los resultados de caracterización.

A partir de los datos de normalización por categoría de impacto, se concluye que para todos estos aceros ferríticos las categorías de impacto menos favorecidas medioambientalmente son la toxicidad humana no carcinogénica, la toxicidad humana carcinogénica, el cambio climático y la formación de partículas, si bien en todas estas categorías se han obtenido los mismos resultados.

En lo que respecta a áreas finales de daño, todos los aceros ferríticos impactan de una forma más acentuada en la salud humana en comparación con ecosistemas y recursos, a la vista de los datos de normalización.

Las leves variaciones observados en los valores de los sustratos son debidos fundamentalmente a las diferencias de composición existentes entre los mismos, así como la presencia o no de determinados elementos en algunos de ellos.

5.2.2.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros austeníticos

Con el fin de establecer la comparativa entre los sustratos inoxidable austeníticos AISI 347H y AISI 321, se ha realizado el análisis de ciclo de vida individual de cada uno de dichos materiales estableciendo como unidad funcional comparativa la misma en todos los casos, la cual se ha fijado en 1 kg de material.

Al proceder a comparar 1 kg de acero inoxidable austenítico AISI 347H con 1 kg de acero inoxidable austenítico AISI 321, se obtuvo la figura 123 correspondiente a la caracterización. Puede observarse como los dos sustratos austeníticos tienen resultados idénticos en todas las categorías de impacto revisadas, a excepción del agotamiento de recursos minerales donde el menor peso corresponde al AISI 321 (94% aproximadamente) frente al 100% del AISI 347H. Podría establecerse una analogía en lo que respecta a los sustratos ferríticos, en donde el P92 tenía menor que peso que el P91 y el VM12 en esta misma categoría de impacto.

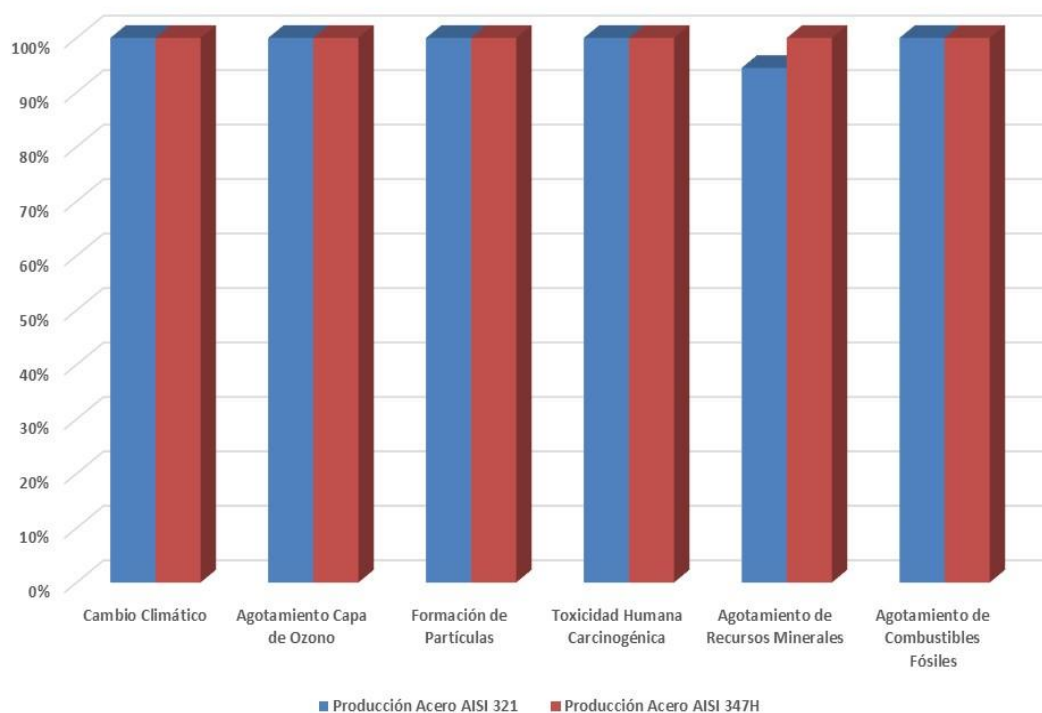


Figura 123: Análisis de impacto comparativo austeníticos. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a la normalización por categoría de impacto estudiada, se dispone de la figura 124. En dicha figura puede apreciarse los resultados casi idénticos obtenidos para los dos sustratos austeníticos.

Cabe destacar la importancia, en orden decreciente, de las siguientes categorías de impacto: toxicidad humana carcinogénica (valor del orden de 0,0021), cambio climático (valor del orden de 0,0006) y formación de partículas (valor del orden de 0,0001). Las categorías de impacto correspondientes a agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de recursos minerales y agotamiento de combustibles fósiles tendrían una menor importancia en este gráfico de normalización. Estos resultados son similares a los obtenidos en la normalización de los sustratos ferríticos. En este caso, la única diferencia observable es el menor impacto (del orden de decimales) generado por el AISI 321 frente al AISI 347H en la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales ($7,2447e-06$ frente a $7,6665e-06$).

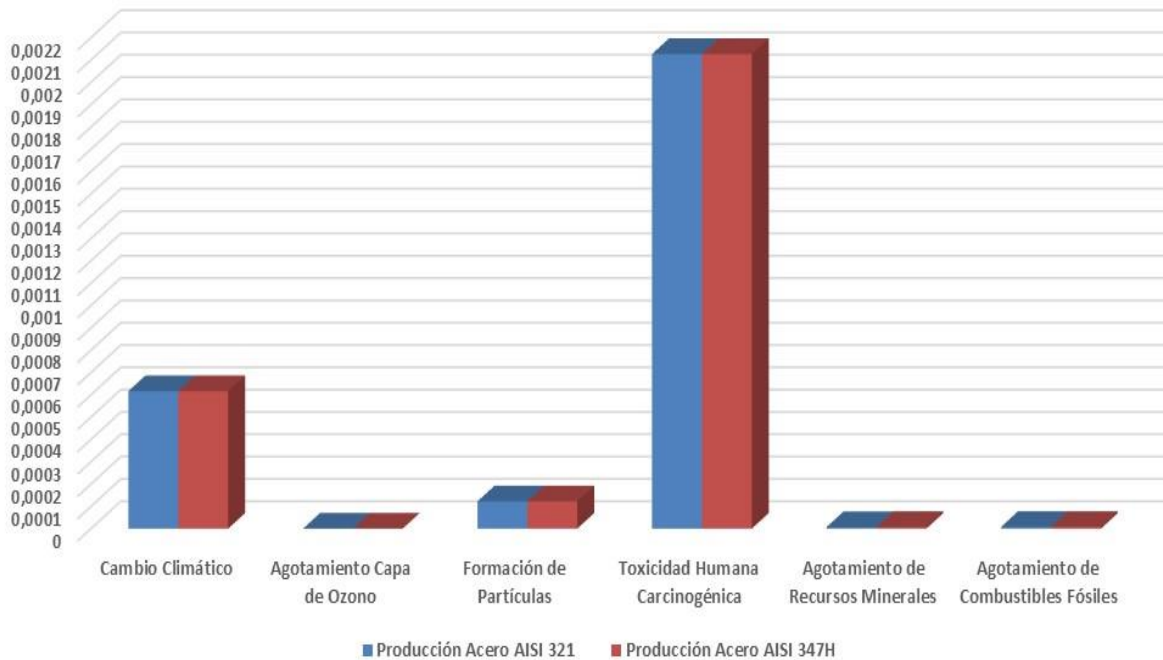


Figura 124: Análisis de impacto comparativo austeníticos. Normalización por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por cuanto se refiere a normalización relativa a áreas finales de daño, se observa en la figura 125 que los dos sustratos austeníticos también tienen resultados casi idénticos. El área correspondiente a la salud humana tiene una mayor importancia (valor aproximado de 0,0053), seguido a mucha distancia de ecosistemas (valor aproximado de 0,0003) y recursos. Estos resultados son similares a los obtenidos en la normalización de las áreas de daño de los sustratos ferríticos. Al igual que con los ferríticos, la diferencia vendría marcada por el menor valor del AISI 321 en el área de recursos, lo cual hace que sea medioambientalmente más viable frente al AISI 347H. Menciona que los valores del AISI 321 son mayores que los de P92 y P91, pero menores que los de VM12,

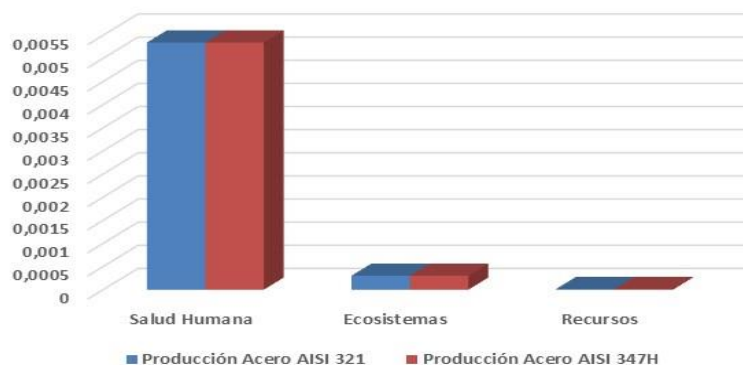


Figura 125: Análisis de impacto comparativo austeníticos. Normalización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única por categoría de impacto, se comprueba en la figura 126 que los resultados son casi idénticos para los dos aceros inoxidable austeníticos. Se observan los siguientes valores en la contribución de las distintas categorías de impacto predominantes: toxicidad humana carcinogénica (0,64 Pt aproximadamente), cambio climático (0,18 Pt aproximadamente), formación de partículas (0,04 Pt aproximadamente) y agotamiento de recursos minerales (0,001 Pt aproximadamente). Las mayores puntuaciones corresponden a la toxicidad humana, como puede corroborarse en el gráfico. Estos resultados son similares a los obtenidos en el análisis de impacto mediante puntuación única por categoría de impacto en los sustratos ferríticos. La diferencia radica en el menor valor en Pt para la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales del AISI 321 (0,001448942 Pt) que del AISI 347H (0,00153331 Pt). Se sigue manteniendo la analogía entre el AISI 321 (austeníticos) y P92 (ferríticos). Asimismo, aunque no se represente, tiene importancia la categoría correspondiente a toxicidad humana no carcinogénica.

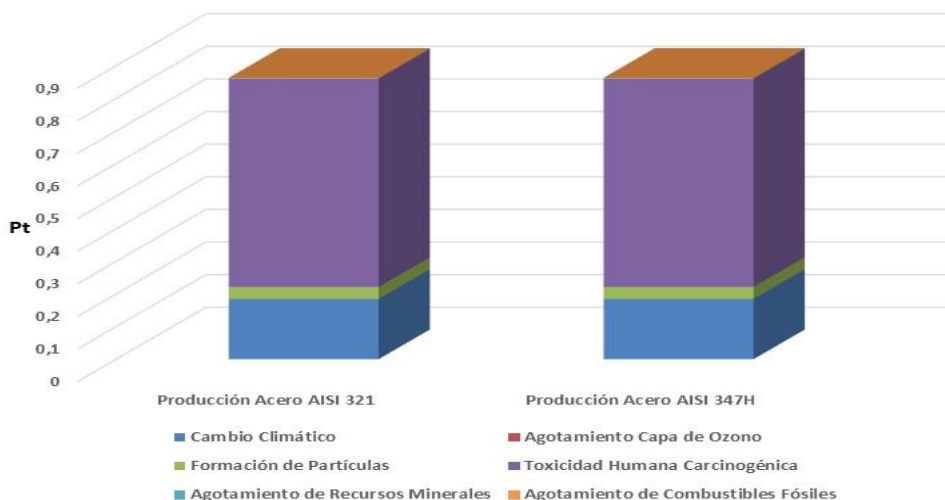


Figura 126: Análisis de impacto comparativo austeníticos. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo concerniente a la evaluación del daño para salud humana (expresada en DALY) por contribución de procesos que dan lugar a 1 kg de cada uno de los aceros austeníticos estudiados, en la figura 127 se puede comprobar que los resultados reflejados son totalmente idénticos en los dos casos, e idénticos también a los resultados de los aceros ferríticos. Se muestran en orden descendiente de importancia la contribución de dichos procesos, poniendo en primer lugar la contribución correspondiente a procesos remanentes. Los principales son: tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen ($8,15e-5$ DALY aproximadamente), tratamiento de escombros de minería de carbón en vertedero de superficie ($6,48e-5$ DALY aproximadamente), tratamiento de residuos del convertidor básico de oxígeno ($5,90e-5$ DALY aproximadamente), producción de ferrocromo ($5,62e-5$ DALY aproximadamente), tratamiento de residuos de polvo generado por la aleación de acero en horno de arco eléctrico ($4,61e-5$ DALY aproximadamente), y producción de ferróniquel ($3,48e-5$ DALY aproximadamente).

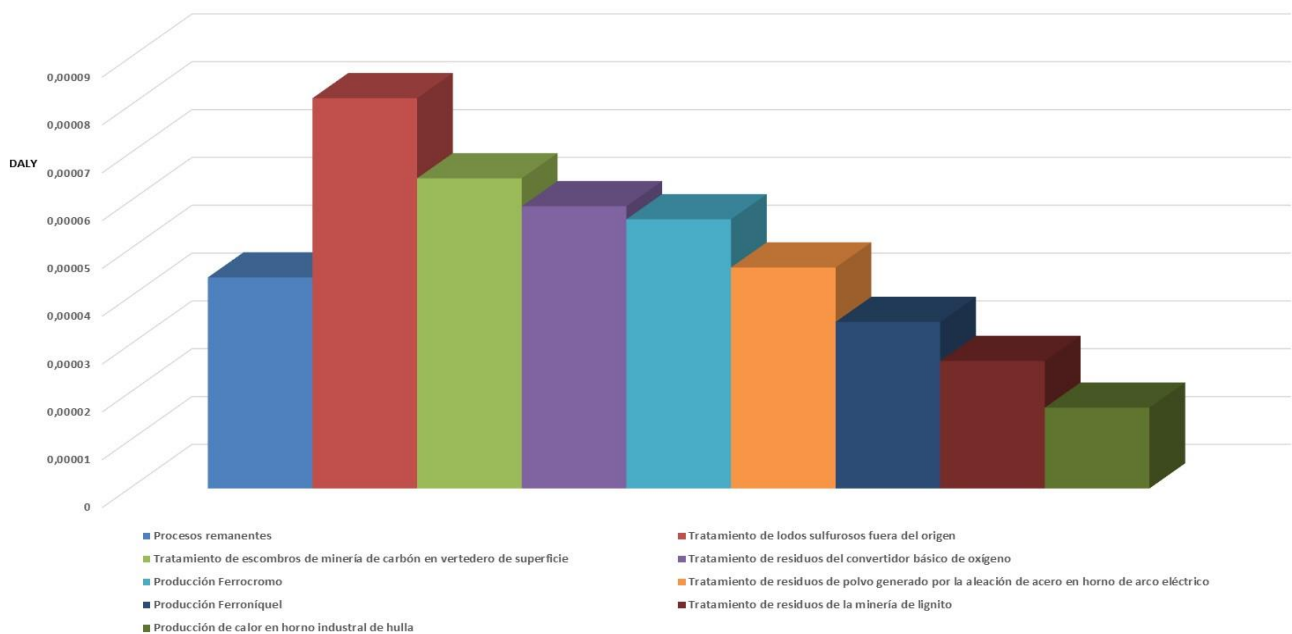


Figura 127: Contribuciones de proceso aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321. Evaluación del daño Human Health.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A la vista de los resultados puede concluirse que se obtienen resultados idénticos para los dos sustratos analizados, a excepción de las diferencias observadas en la caracterización para la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales donde el menor peso corresponde al AISI 321 frente al relativo al AISI 347H. Por lo tanto, de una forma análoga al P92 en los aceros ferríticos, se recomienda el uso del acero AISI 321 frente al AISI347H, en vista de los resultados.

A partir de los datos de normalización por categoría de impacto se concluye que para ambos aceros austeníticos AISI 321 y AISI 347H las categorías de impacto menos favorecidas medioambientalmente son la toxicidad humana no carcinogénica, la toxicidad humana carcinogénica, el cambio climático y la formación de partículas, si bien en todas estas categorías se han obtenido los mismos resultados. Dichos resultados coinciden también con los correspondientes a los aceros ferríticos.

Respecto a áreas finales de daño, ambos aceros austeníticos impactan de forma más acentuada en la salud humana en comparación con ecosistemas y recursos, según los resultados de normalización. Los valores son análogos a los de los aceros ferríticos.

Asimismo, si bien los aceros austeníticos tienen mayor contenido en Ni y Cr, el cual produce un peor comportamiento ambiental general, su influencia no es tan manifiesta como cabría esperar en comparación con los aceros ferríticos. El AISI 321 generaría un impacto menor que el AISI 347H e incluso que el VM12, pero mayor que el P91 y P92 a la vista de los valores obtenidos.

5.2.3.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros ferríticos + recubrimiento

Con el fin de establecer la comparativa entre los sustratos ferríticos (P91, P92 y VM12) con los recubrimientos correspondientes (Ni50Cr, CrN/NbN, Slurry Al) aplicados mediante los procesos de deposición especificados, se ha realizado el análisis de ciclo de vida individual de cada uno de dichas configuraciones estableciendo como unidad funcional comparativa la misma en todos los casos, la cual se ha fijado en 1 kg de sustrato. A dicha unidad funcional se le ha añadido en cada caso el inventario de ACV correspondiente a la cantidad de recubrimiento empleado y a las características del proceso de deposición utilizado.

Al proceder a comparar 1 kg de cada uno de los sustratos ferríticos con la deposición de los recubrimientos correspondientes, se obtuvo la figura 128 correspondiente a la caracterización. La característica predominante en las categorías de impacto analizadas es que el mayor impacto corresponde al sistema P92-CrN/NbN, salvo en la categoría de agotamiento de recursos minerales donde se localiza en el sistema VM12-Slurry Al. Asimismo, con excepción de la mencionada categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales donde los resultados son muy similares, la regla es que después del sistema P92-CrN/NbN, los mayores impactos correspondan a los sistemas P91-Ni50Cr y P92-Ni50Cr, seguidos en último lugar por los sustratos con recubrimiento de Slurry Al (sistemas P91-Slurry Al, P92-Slurry Al y VM12-Slurry Al).

Parece que la influencia del recubrimiento es determinante a la hora de caracterizar los impactos, reflejándose resultados análogos para los sustratos con el mismo recubrimiento. Para el caso particular de la categoría de agotamiento de recursos minerales, el menor impacto correspondería al sistema P92-Slurry Al, por debajo del 95,47%; el resto de sistemas presentarían impactos ligeramente superiores a este valor en dicha categoría. Únicamente es en esta categoría de impacto donde existe más variabilidad con respecto a las situaciones generales comentadas para el resto de categorías analizadas. Puede deducirse con carácter general que el recubrimiento de CrN/NbN presentaría mayor impacto que el correspondiente al Ni50Cr, y éste a su vez que el correspondiente al Slurry Al. Los resultados con menor impacto corresponderían al sistema P92-Slurry Al. La afectación más importante se localiza en las categorías de agotamiento de recursos minerales y toxicidad humana carcinogénica.

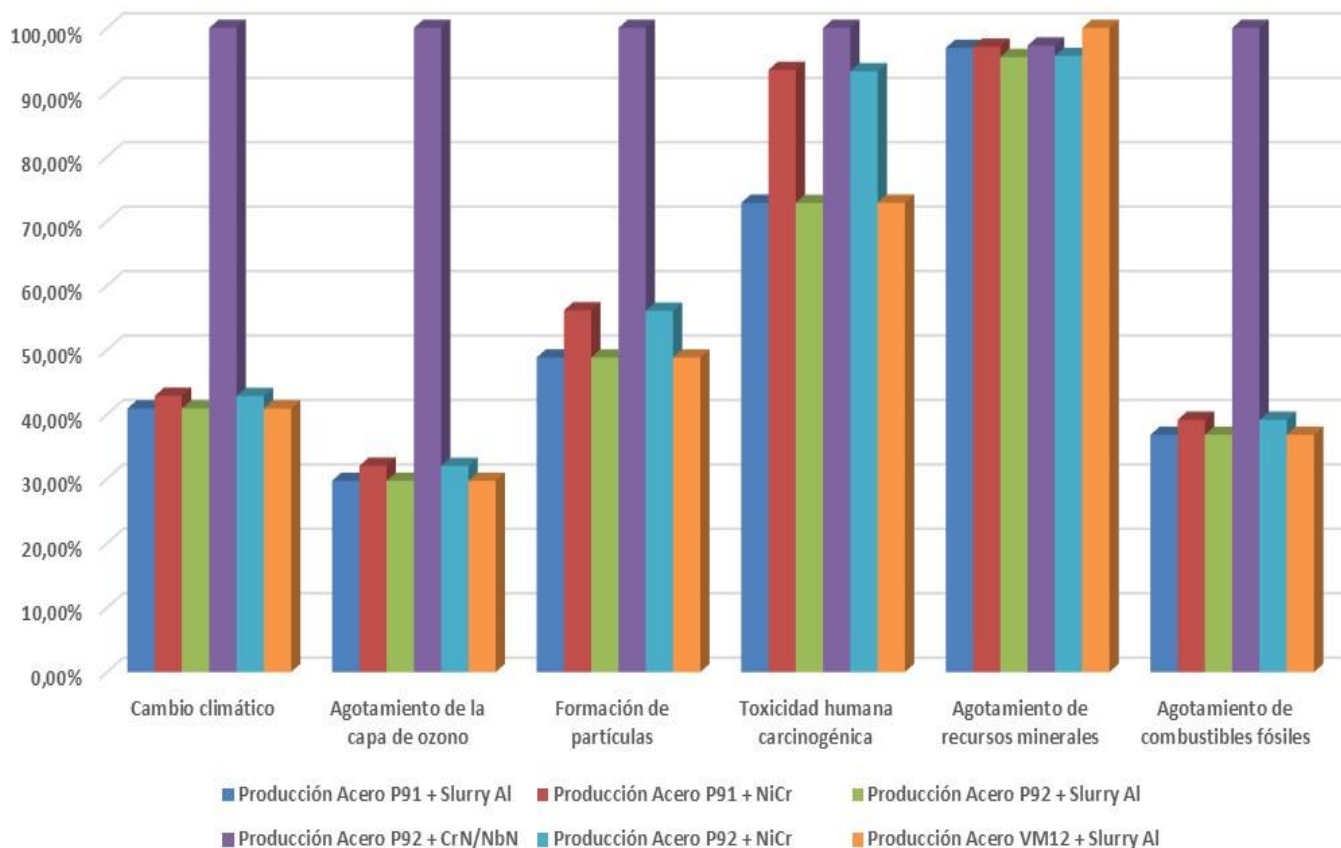


Figura 128: Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a la evaluación del daño, se dispone de la figura 129. En dicha figura puede apreciarse una mayor afectación al área de daño de la salud humana, seguida por la de recursos y finalmente la de ecosistemas. También vuelve a observarse que el mayor impacto corresponde al sistema P92-CrN/NbN, debido a la influencia del recubrimiento y su proceso de deposición.

Por otro lado, después del sistema P92-CrN/NbN, los mayores impactos correspondan a los sistemas P91-Ni50Cr y P92-Ni50Cr, seguidos en último lugar por los sustratos con recubrimiento de Slurry Al (sistemas P91-Slurry Al, P92-Slurry Al y VM12-Slurry Al). Los resultados son idénticos para cada recubrimiento independientemente del sustrato, a excepción del área de recursos, donde fluctúan levemente los impactos del recubrimiento de Slurry Al (sustrato VM12 por encima del 50%, sustratos P91 y P92 por debajo del 50%).

Al igual que en el gráfico de caracterización, se deduce con carácter general que el recubrimiento de CrN/NbN presentaría mayor impacto que el correspondiente al Ni50Cr, y éste a su vez que el correspondiente al Slurry Al. Los resultados con menor impacto corresponderían al sistema P92-Slurry Al. La afectación más importante corresponde al área de daño de salud humana, seguida de recursos.

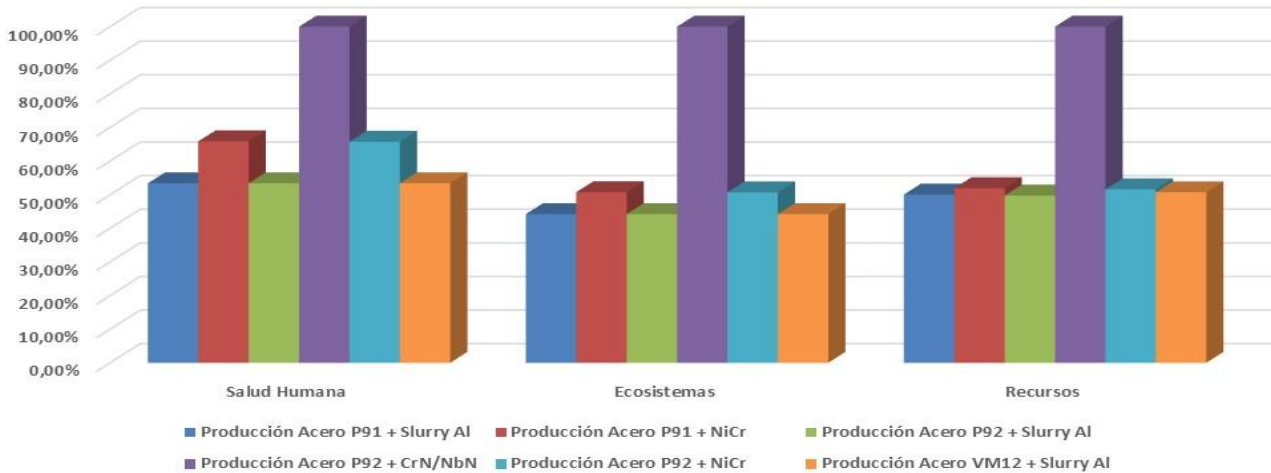


Figura 129: Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única por categoría de impacto (gráfica de la figura 130), se comprueba que el sistema P92-CrN/NbN alcanza un total para la totalidad de categorías de impacto de 3,75 Pt mientras que los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr reflejan 2,40 Pt y los sistemas con recubrimiento de Slurry Al computan menos de 2 Pt. De esta manera se refrenda lo observado en los gráficos anteriores acerca del mayor impacto generado por recubrimiento de CrN/NbN, seguido por el Ni50Cr y el Slurry Al en último lugar. El sistema P91-Ni50Cr tiene peor comportamiento ambiental (valor total en Pt superior) que el sistema P92-Ni50Cr; mientras que en el caso del recubrimiento de Slurry Al, el sistema medioambientalmente más desfavorable sería el VM12-Slurry Al, seguido de P91-Slurry Al y finalmente P92-Slurry Al.

Para las categorías de impacto analizadas, se observa que la contribución de las categorías más importantes aumenta en función del recubrimiento empleado según lo comentado en el párrafo anterior: toxicidad humana carcinogénica (en torno a 0,93 Pt en el sistema P92-CrN/NbN; en torno a 0,87 Pt en los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr; en torno a 0,68 Pt para los sistemas con recubrimiento de Slurry Al); cambio climático (en torno a 0,53 Pt en el sistema P92-CrN/NbN; en torno a 0,23 Pt para los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr y 0,22 Pt para sistemas con Slurry Al).

La toxicidad humana no carcinogénica, no incluida en la gráfica, representa en torno a 1,8 Pt en el sistema P92-CrN/NbN; algo más de 1 Pt para los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr; algo más de 0,8 Pt para los sistemas con recubrimiento de Slurry Al).

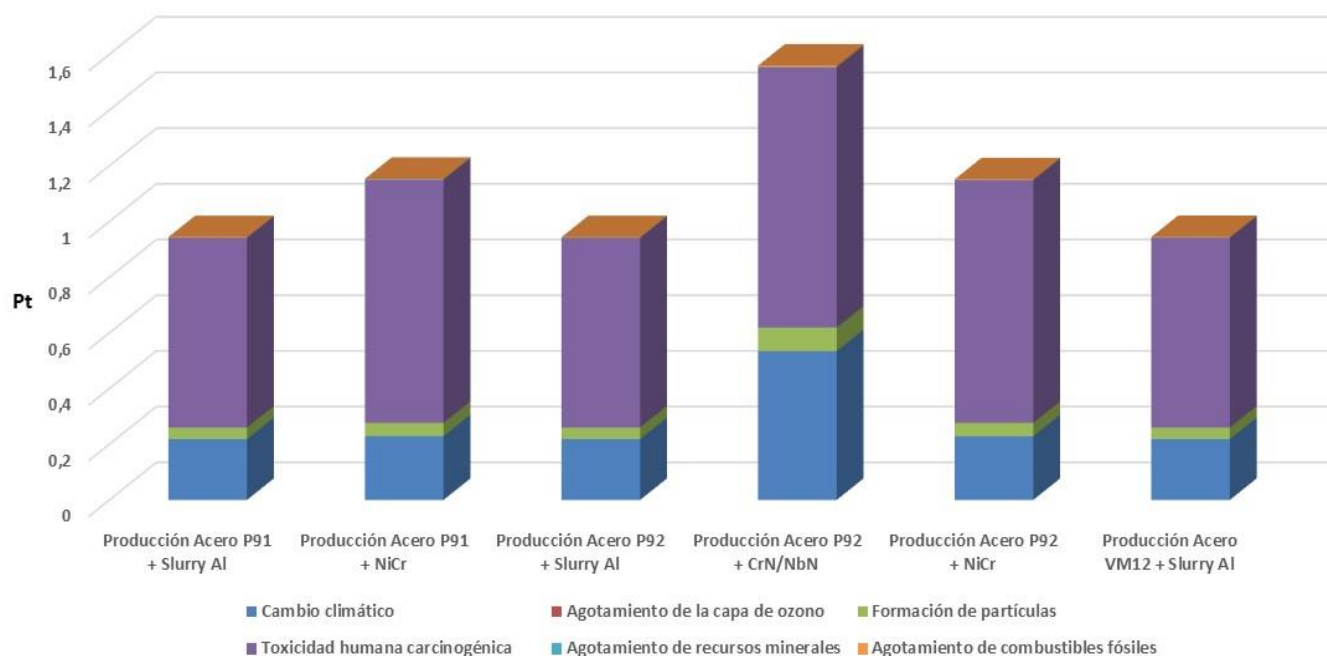


Figura 130: Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Puntuación única por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la figura 131 correspondiente a puntuación única, se observa que el área de salud humana tiene las mayores puntuaciones en todos los recubrimientos, aumentando su valor en función del recubrimiento empleado según lo comentado anteriormente: del orden de 3,34 Pt para el sistema P92-CrN/NbN; del orden de 2,20 Pt para los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr; sobre 1,78 Pt para los sistemas con recubrimiento de Slurry de Al.

Dicha tendencia se observa en menor medida para el área de ecosistemas: del orden de 0,39 Pt para el sistema P92-CrN/NbN; del orden de 0,20 Pt para los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr; cerca de 0,17 Pt para los sistemas con recubrimiento de Slurry de Al.

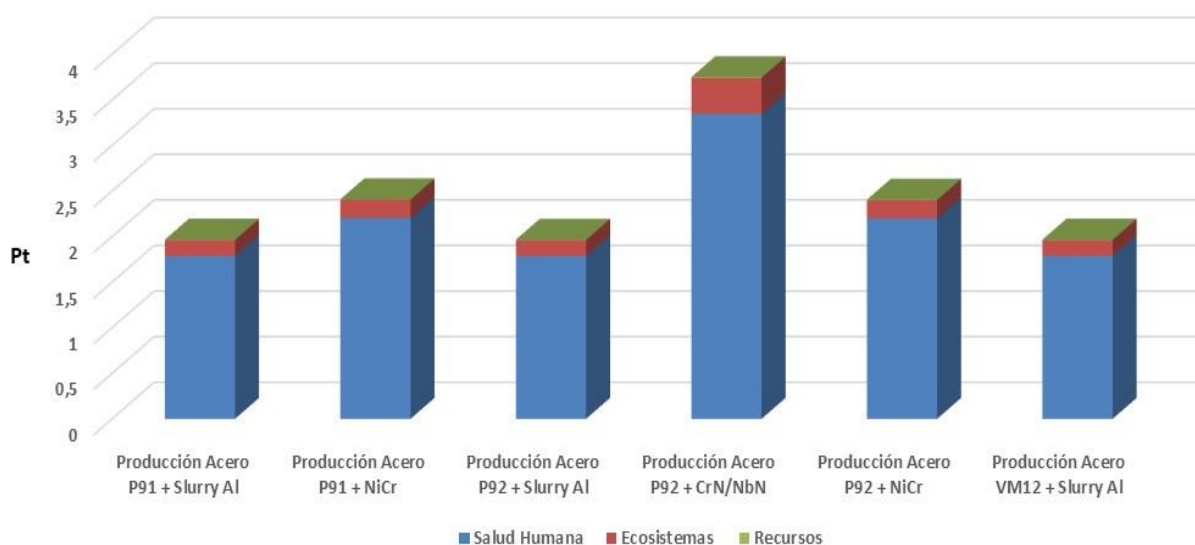


Figura 131: Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Los resultados observados en las dos últimas gráficas son similares para los mismos recubrimientos, independientemente de los sustratos empleados, lo que da una idea bastante aproximada del peso de la influencia del recubrimiento y su proceso de deposición en el impacto medioambiental del sistema.

En lo relativo al análisis comparativo de las puntuaciones únicas de las contribuciones de proceso de los aceros ferríticos con recubrimiento (véanse figuras 71, 78, 84, 91, 98 y 104), se ha observado que el impacto de los procesos es mayor en el sistema con recubrimiento de CrN/NbN (hasta 850 mPt), seguido de los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr (hasta 540 mPt) y finalmente de los sistemas con recubrimiento de Slurry de Al (hasta 320 mPt). Asimismo, para los sustratos con recubrimientos de Ni50Cr aparecen entre las principales contribuciones los procesos de tratamiento de residuos de dicromato de Na y para el sistema con recubrimiento de CrN/NbN aparece el de producción de electricidad. Ninguno de estos procesos aparece como principal para las contribuciones de los sistemas con recubrimiento de Slurry Al.

En base a todo lo anterior, se confirma que los sistemas con recubrimiento de Slurry Al presentan un mejor comportamiento ambiental que el resto en todas las categorías, seguidos de los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr. El sistema P92-CrN/NbN es el más dañino en materia de sostenibilidad, debido a la influencia del recubrimiento.

Este comportamiento se cumple en las categorías de impacto siguientes, nombradas en orden decreciente de mayor a menor impacto, según lo observado en los resultados de caracterización: agotamiento de recursos minerales, toxicidad humana carcinogénica, toxicidad humana no carcinogénica, formación de partículas, cambio climático, agotamiento de combustibles fósiles y agotamiento de la capa de ozono.

Asimismo, se confirma que las diferencias observadas entre los sustratos desnudos se conservan ante la adición de un mismo tipo de recubrimiento. Ante eso, los mejores comportamientos medioambientales corresponderían al sistema P92-Slurry Al. Estos resultados confirman lo observado al analizar los ACV individuales para cada configuración.

5.2.4.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros austeníticos + recubrimiento

Con el fin de establecer la comparativa entre los sustratos inoxidables austeníticos (AISI 347H y AISI 321) con los recubrimientos correspondientes (Slurry Al) aplicados mediante los procesos de deposición especificados, se ha realizado el análisis de ciclo de vida individual de cada uno de dichas configuraciones estableciendo como unidad funcional comparativa la misma en todos los casos, la cual se ha fijado en 1 kg de sustrato. A dicha unidad funcional se le ha añadido en cada caso el inventario de ACV correspondiente a la cantidad de recubrimiento empleado y a las características del proceso de deposición utilizado.

Al proceder a comparar 1 kg de cada uno de los sustratos inoxidables austeníticos con la deposición de los recubrimientos correspondientes, se obtuvo la figura 132 correspondiente a la caracterización. Puede observarse que la influencia del impacto de ambos sustratos austeníticos con recubrimiento de Slurry Al es idéntica para todas las categorías de impacto estudiadas salvo para el agotamiento de recursos minerales, en donde el sistema AISI 321-Slurry Al genera menor impacto (en torno a un 63,15%) que el sistema AISI 347H-Slurry Al.

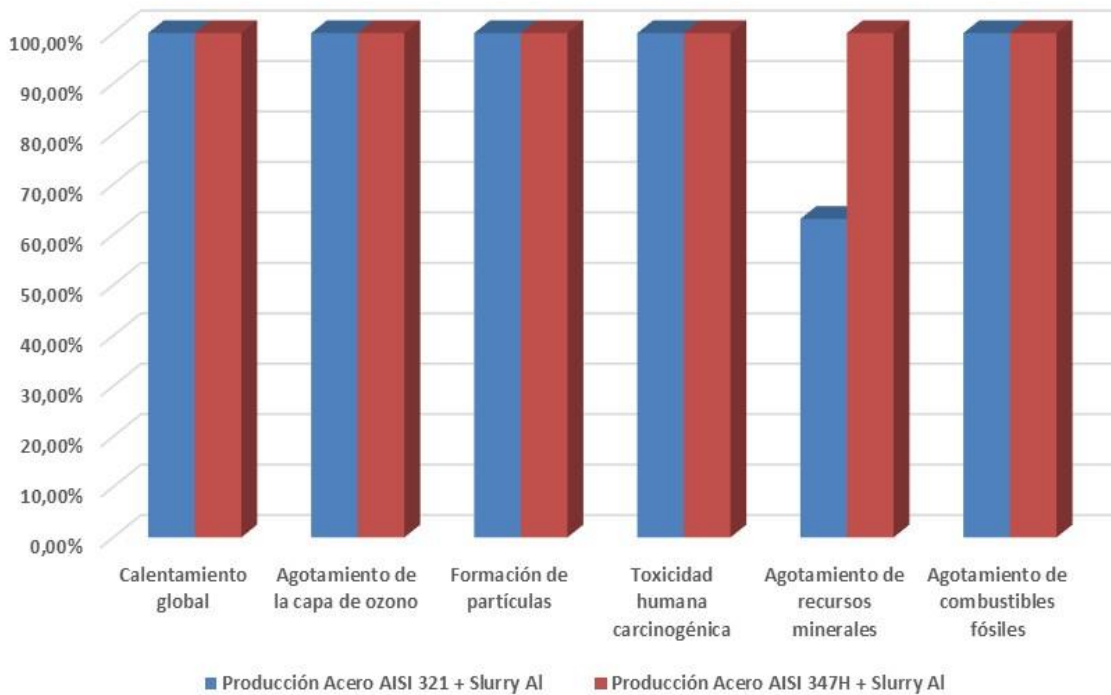


Figura 132: Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El gráfico correspondiente al análisis de impacto con evaluación del daño por categoría de impacto es idéntico al gráfico de caracterización de la figura 132 ya comentado. En lo que respecta a la evaluación del daño, se ha representado este concepto en la figura 133. En dicha figura pueden apreciarse afectaciones similares para las tres áreas de daño por parte de ambos sistemas, con excepción del área de recursos en donde el sistema AISI 321-Slurry Al contribuye en menor medida (por debajo del 84%).

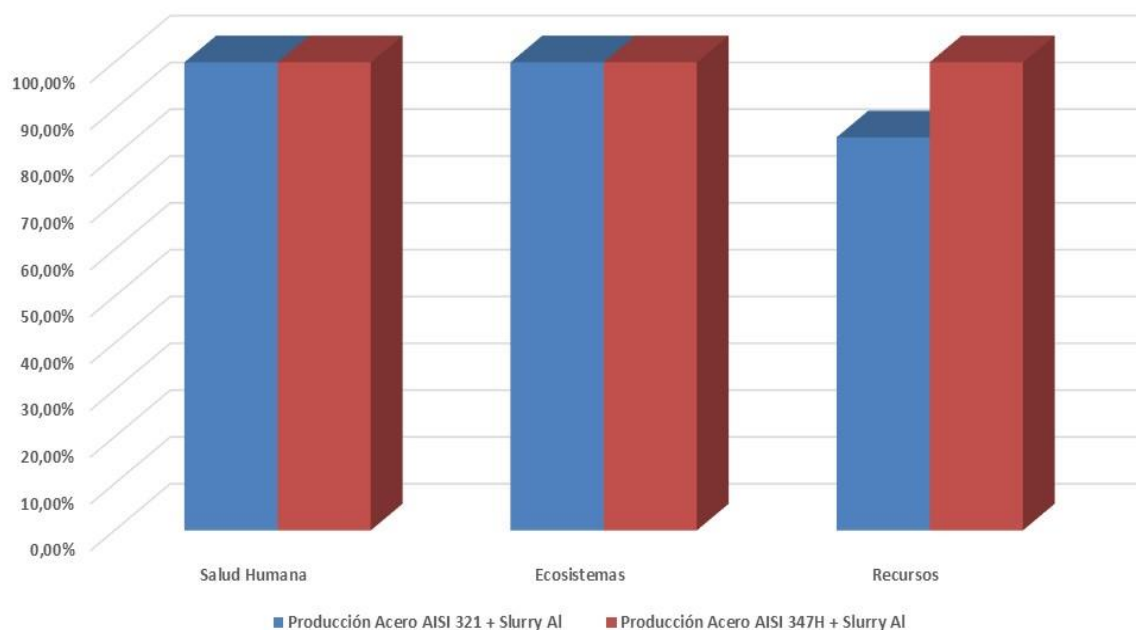


Figura 133: Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a puntuación única por categoría de impacto, se comprueba en la figura 134 que los resultados son prácticamente idénticos en ambos sistemas, si bien se observa menor valor en Pt para el AISI 321 en la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales. Dichos resultados coinciden con los obtenidos para los sustratos ferríticos con el mismo recubrimiento de Slurry Al en lo relativo a las categorías de impacto principales: toxicidad humana carcinogénica (en torno a 0,68 Pt); cambio climático (en torno a 0,22 Pt). Para la toxicidad humana no carcinogénica (categoría de impacto no representada) el valor se sitúa en torno a 0,85 Pt.

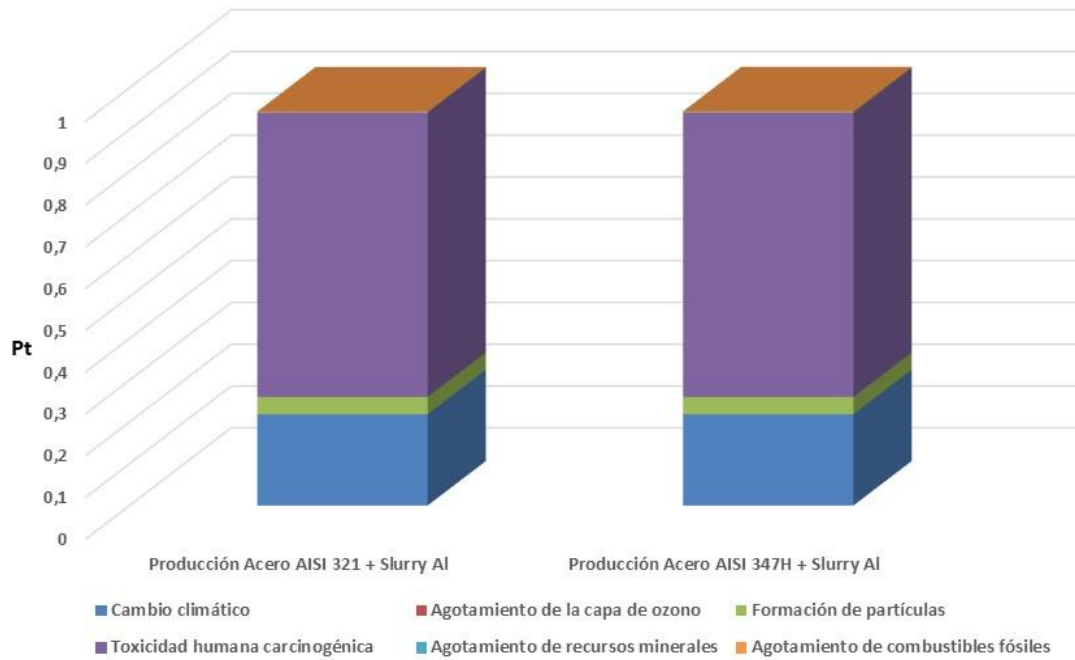


Figura 134: Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Puntuación única por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro

Asimismo, en la figura 135 correspondiente a puntuación única, se observa que el área de salud humana tiene la mayor puntuación (cerca de 1,78 Pt), seguida del área de ecosistemas (cerca de 0,17 Pt). Existen pequeñas diferencias en el área de recursos, donde el menor valor en Pt corresponde al AISI 321-Slurry Al (0,0029) frente al AISI 347H-Slurry Al (0,0035). Estos resultados también coinciden con los obtenidos para los sustratos ferríticos con el mismo recubrimiento de Slurry Al, donde el menor impacto en el área de recursos correspondía al sistema P92-Slurry Al.

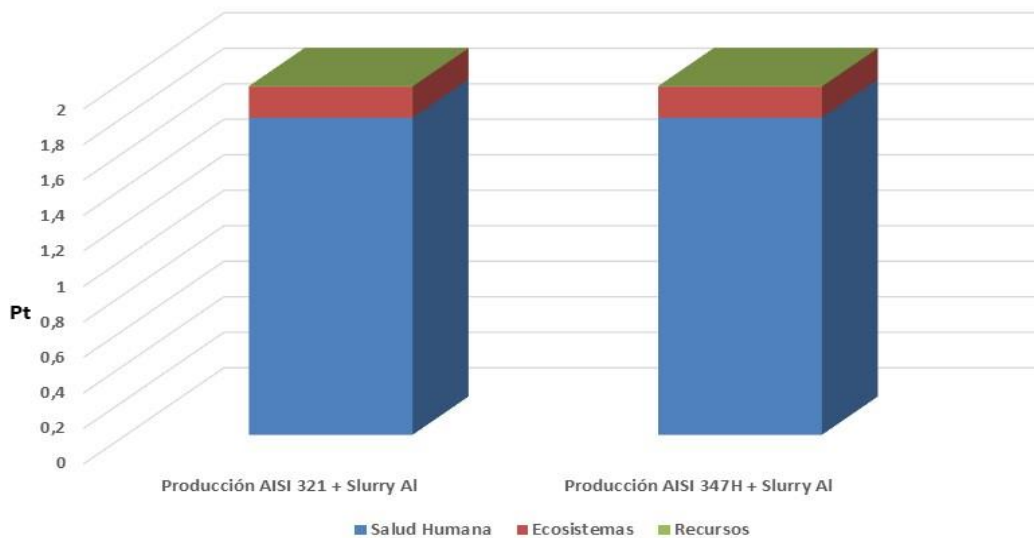


Figura 135: Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Puntuación única.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo relativo al análisis comparativo de las puntuaciones únicas de las contribuciones de proceso de los aceros austeníticos con recubrimiento (véanse figuras 110 y 116), se ha observado un impacto de los procesos de hasta 320 mPt, resultados que coinciden con los correspondientes a los sustratos ferríticos con recubrimiento de Slurry Al.

Con todo lo anterior, podemos confirmar los resultados correspondientes al impacto de ambos sustratos austeníticos con recubrimiento de Slurry Al son idénticos para todas las categorías de impacto estudiadas salvo para el agotamiento de recursos minerales, en donde el sistema AISI 321-Slurry Al genera menor impacto que el sistema AISI 347H-Slurry Al. Este dato mantiene la tendencia observada en la caracterización de ambos sustratos austeníticos sin recubrimiento.

En lo que respecta a la evaluación del daño, existen afectaciones similares para las tres áreas de daño por parte de ambos sistemas, con excepción del área de recursos en donde el sistema AISI 321-Slurry Al contribuye en menor medida que el sistema AISI 347H-Slurry Al.

Las puntuaciones únicas observadas son similares para las categorías de impacto más importantes: toxicidad humana carcinogénica, toxicidad humana no carcinogénica y cambio climático. Estos resultados también coinciden con los obtenidos para los sustratos ferríticos como el mismo recubrimiento de Slurry Al.

5.2.5.- Análisis de Ciclo de Vida comparativo entre aceros y aceros con recubrimiento

Se presentan a continuación los gráficos y conclusiones observados en el ACV comparativo de los sustratos frente a los mismos sustratos con el recubrimiento correspondiente depositado. Esto permite ver de una forma clara el impacto medioambiental generado por el recubrimiento comparando el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato sin recubrimiento. En todos los casos se ha tomado como unidad funcional 1 kg de sustrato, añadiendo en cada caso el inventario de ACV correspondiente a la cantidad de recubrimiento empleado y a las características del proceso de deposición utilizado.

5.2.5.1- Acero ferrítico P91 / Acero ferrítico P91 + NiCr

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P91 frente al sistema P91-Ni50Cr, puede observarse en la figura 136 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en los que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y toxicidad humana carcinogénica, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en el cambio climático.

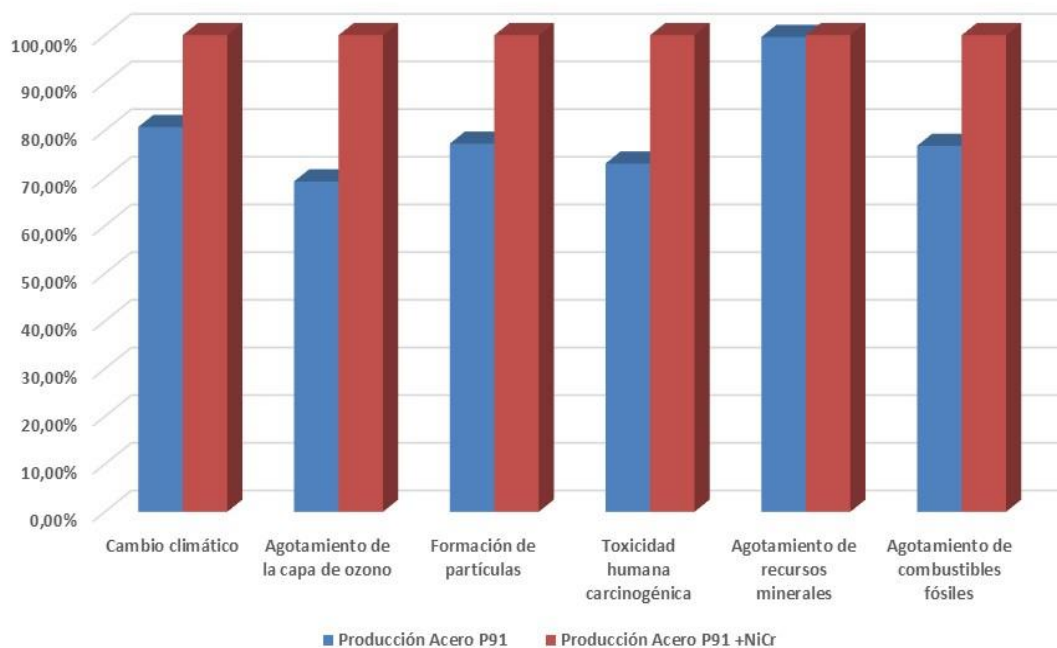


Figura 136: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 137 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo. La diferencia es mayor en el área de salud humana (72,72% corresponde al sustrato), seguida de ecosistemas (75,26% corresponde al sustrato) y recursos (86,03% corresponde al sustrato).

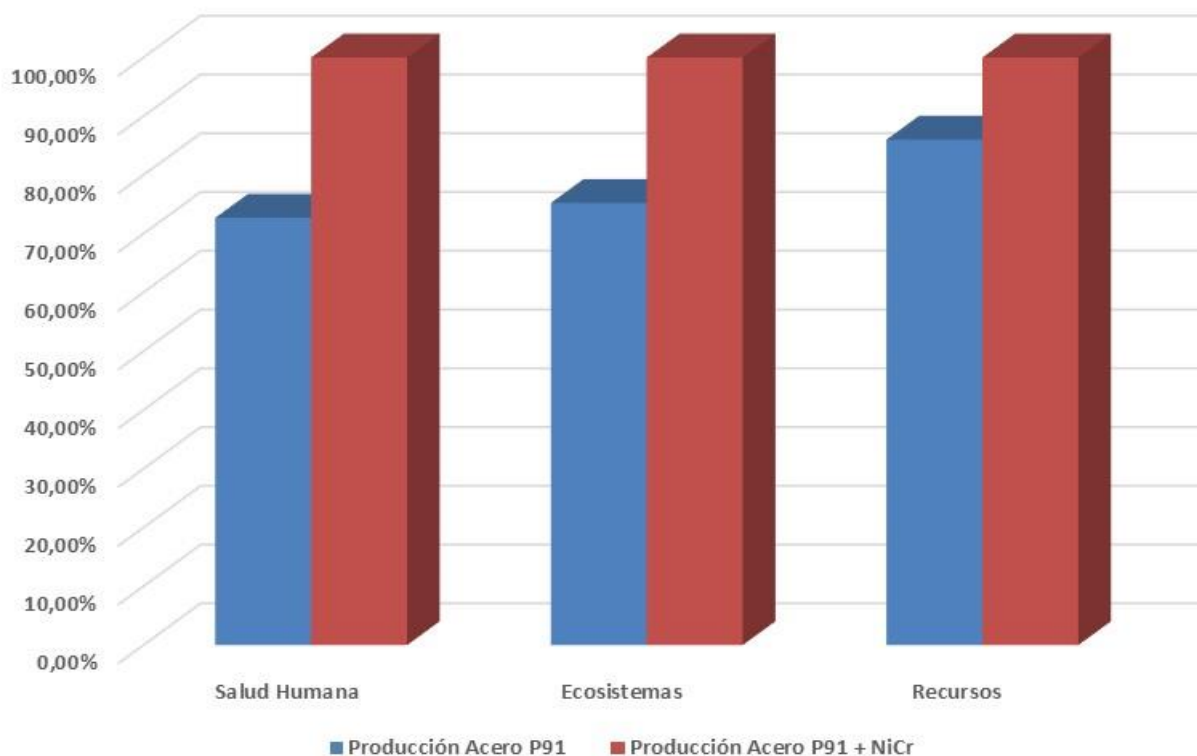


Figura 137: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 138), se constata el mayor valor de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $1,47e-4$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. Puede constatarse también la aparición en el sistema sustrato-recubrimiento, como ya habíamos comentado, del proceso correspondiente a tratamiento de residuos de dicromato de Na entre los principales debido a la influencia del recubrimiento, con puntuación de $5,69e-5$ DALY.

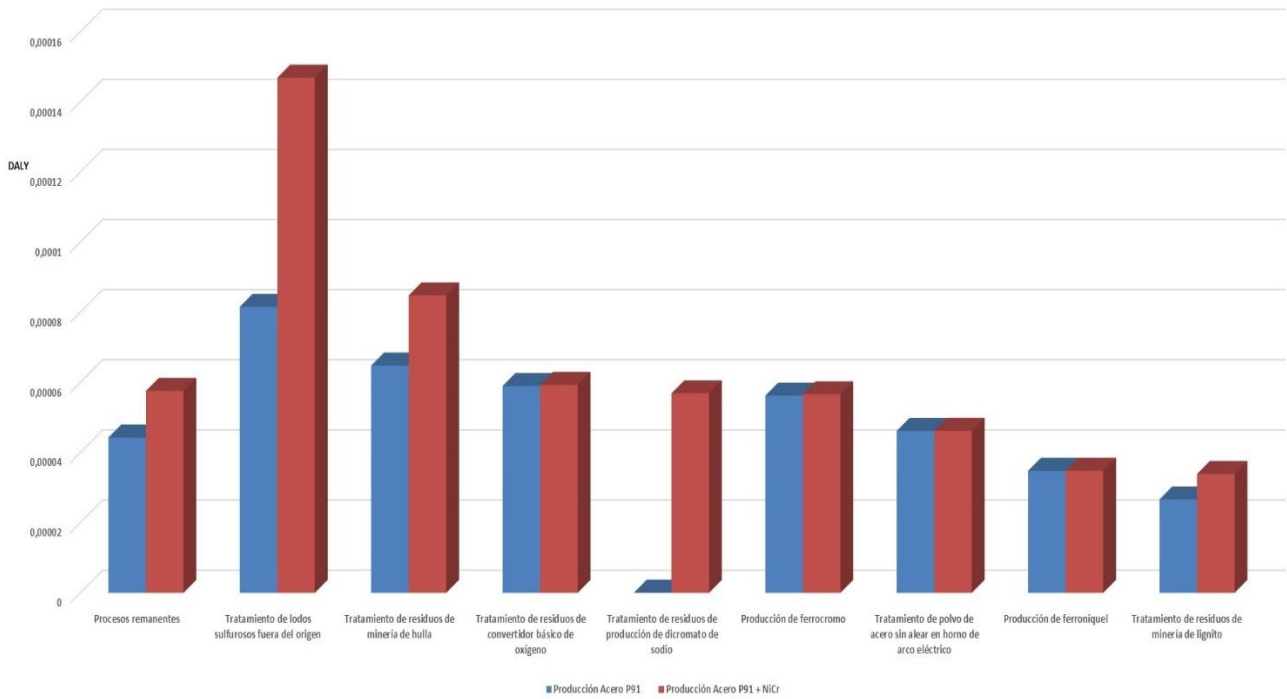


Figura 138: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,11%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 139. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano.

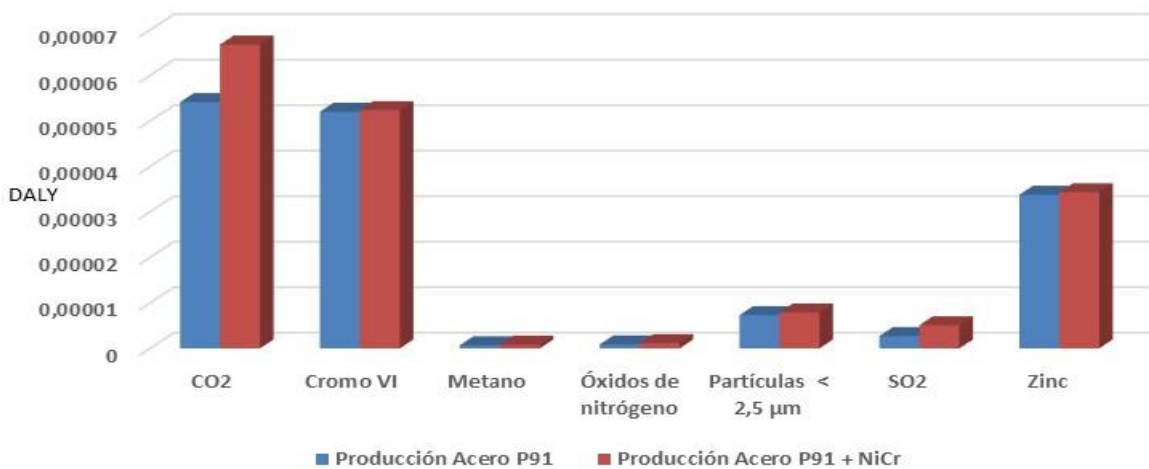


Figura 139: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud Humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la siguiente tabla 23 se resumen los mencionados datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY, correspondientes a la gráfica de la figura 139 anterior. En todos los casos se están analizando los resultados correspondientes al área de salud humana por corresponder a la más significativa y generar los mayores impactos de entre todas las analizadas.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Acero ferrítico P91 + Ni50Cr
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,68005E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,23883E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	8,32256E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,13744E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,90354E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	5,09756E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,43283E-05

Tabla 23: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.2- Acero ferrítico P91 / Acero ferrítico P91 + Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P91 frente al sistema P91-Slurry Al, puede observarse en la figura 140 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en los que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en la toxicidad humana carcinogénica. Esto supone cambios con respecto a recubrimiento de NiCr, donde había diferencias más notables en la toxicidad humana carcinogénica, lo que supone que el impacto del NiCr es más acusado en esta categoría que el del Slurry Al; por el contrario, el impacto del Slurry Al es más importante en el agotamiento de la capa de ozono que el del NiCr.

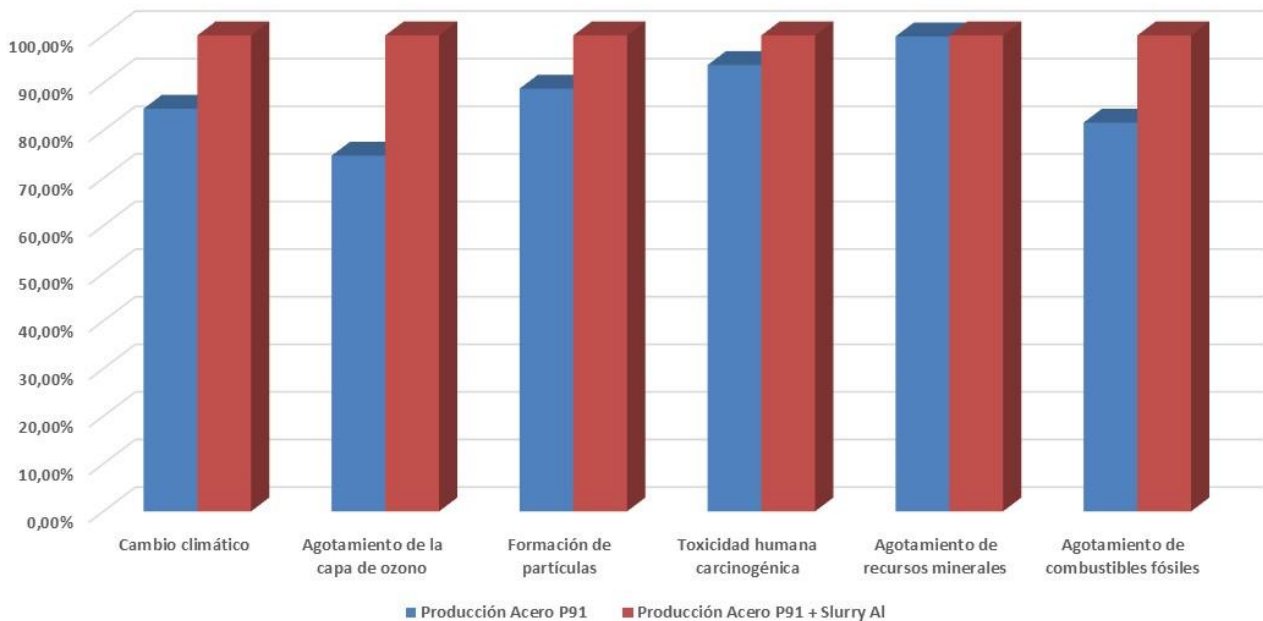


Figura 140: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 141 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo. La diferencia es mayor en el área de ecosistemas (86% corresponde al sustrato), seguida de recursos (89% corresponde al sustrato) y salud humana (90% corresponde al sustrato).

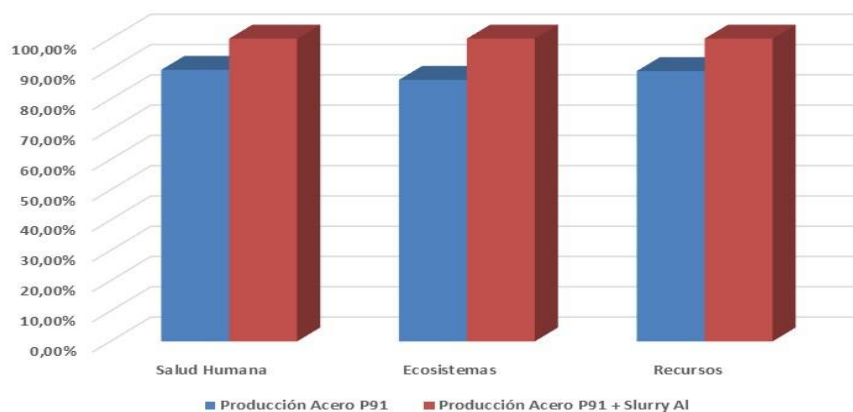


Figura 141: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 142), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $8,95e-5$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. El aumento de DALY sería menor que en el caso del mismo sustrato ferrítico P91 con el recubrimiento de Ni50Cr. Puede constatarse también que el proceso correspondiente a tratamiento de residuos de producción de dicromato de Na no tiene una importancia tan relevante en el sistema P91-Slurry Al que la que tiene en el sistema P91-Ni50Cr. Los valores en DALY para los mismos procesos son ligeramente superiores para el sistema P91-Ni50Cr que para el sistema P91-Slurry Al, lo cual indica un menor impacto ambiental del recubrimiento de Slurry Al en este sentido.

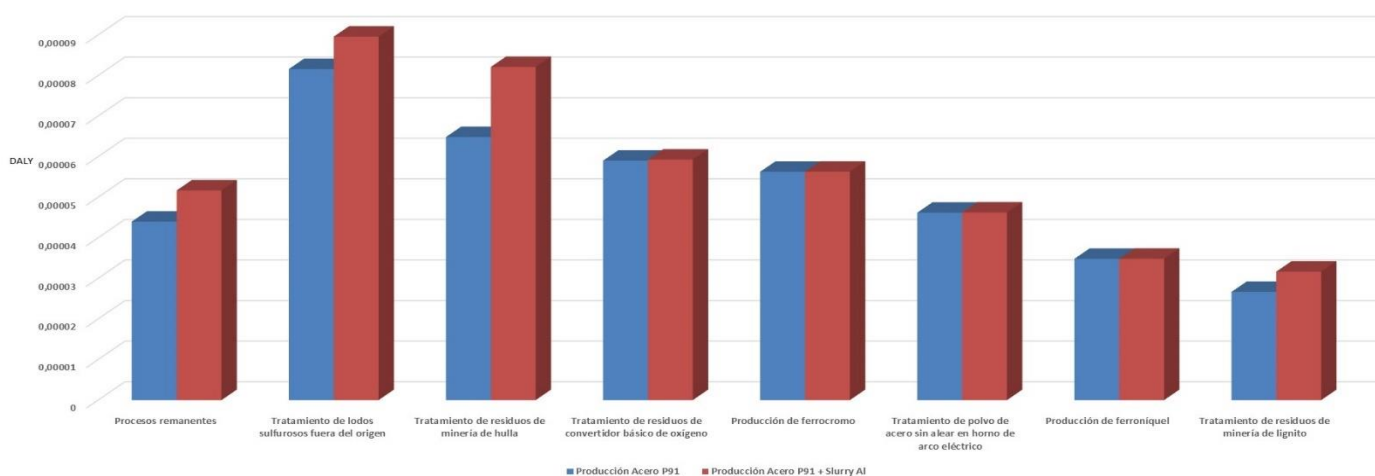


Figura 142: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema, ligeramente inferior al 0,11% inicial del sistema P91-Ni50Cr), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 143. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano. Resultados similares al sistema P91-Ni50Cr, pero observándose la misma situación anterior en la que los valores en DALY para las mismas sustancias son ligeramente superiores para el sistema P91-Ni50Cr que para el sistema P91-Slurry Al, lo cual indica un menor impacto ambiental del Slurry Al.

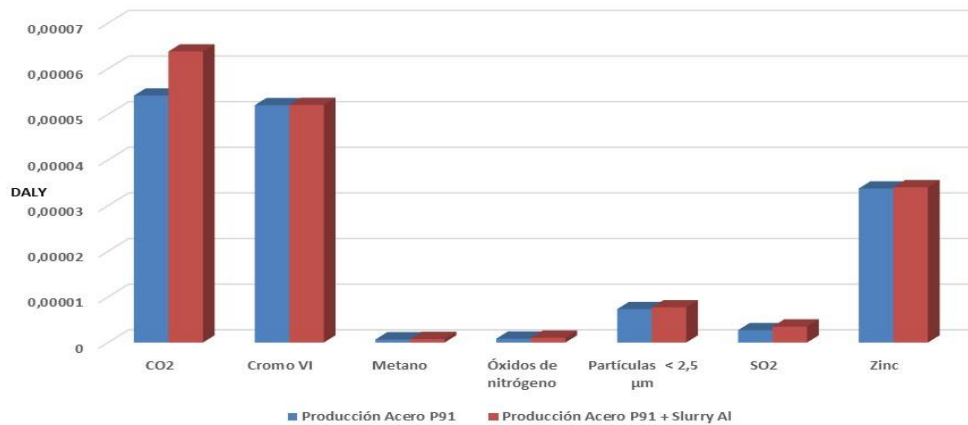


Figura 143: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 24 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con la tabla 23 del apartado anterior, se aprecia lo comentado acerca de que el impacto en DALY correspondiente al sistema P91-Slurry Al es ligeramente inferior al sistema P91-Ni50Cr.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Acero ferrítico P91 + Slurry Al
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,3792E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,20699E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	7,92619E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,07022E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,71007E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	3,51316E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,40374E-05

Tabla 24: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.3- Acero ferrítico P92 / Acero ferrítico P92 + CrN/NbN

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P92 frente al sistema P92-CrN/NbN puede observarse en la figura 144 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en los que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en la toxicidad humana carcinogénica. Las diferencias entre los impactos del sustrato y del sistema sustrato-recubrimiento son las más significativas de entre todos los casos estudiados, lo cual nos da una idea del mal comportamiento medioambiental del recubrimiento CrN/NbN.

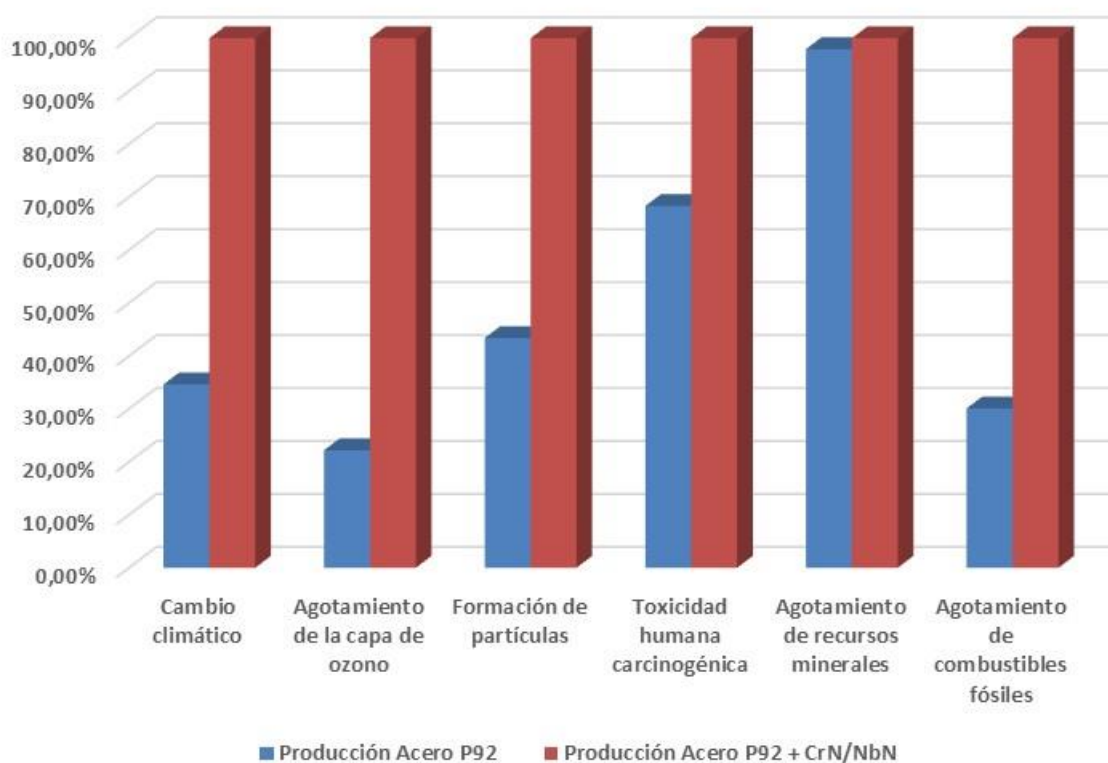


Figura 144: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 145 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo, observándose que el sistema P92-CrN/NbN posee la mayor diferencia con respecto al sustrato desnudo de todos los sistemas sustrato-recubrimiento analizados.

En el caso concreto de la comparativa P92 vs P92-CrN/NbN, la diferencia es mayor en el área de ecosistemas (38% corresponde al sustrato), seguida de recursos (44% corresponde al sustrato) v salud humana (48% corresponde al sustrato).

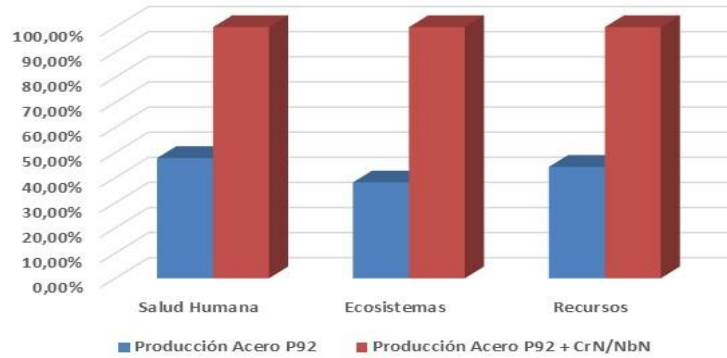


Figura 145: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 146), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de residuos de minería de hulla) obtendría una puntuación de $2,44e-4$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $6,48e-5$ del sustrato desnudo. El aumento de DALY sería mayor que en los casos analizados del sustrato P91 con los recubrimientos de Ni50Cr y Slurry Al. Puede constatarse también la aparición en el sistema sustrato-recubrimiento, como ya habíamos comentado, del proceso correspondiente a producción de electricidad con una puntuación de $6,51e-5$ DALY. Los valores en DALY para los mismos procesos son superiores que para los sistemas P91-Ni50Cr y P91-Slurry Al.

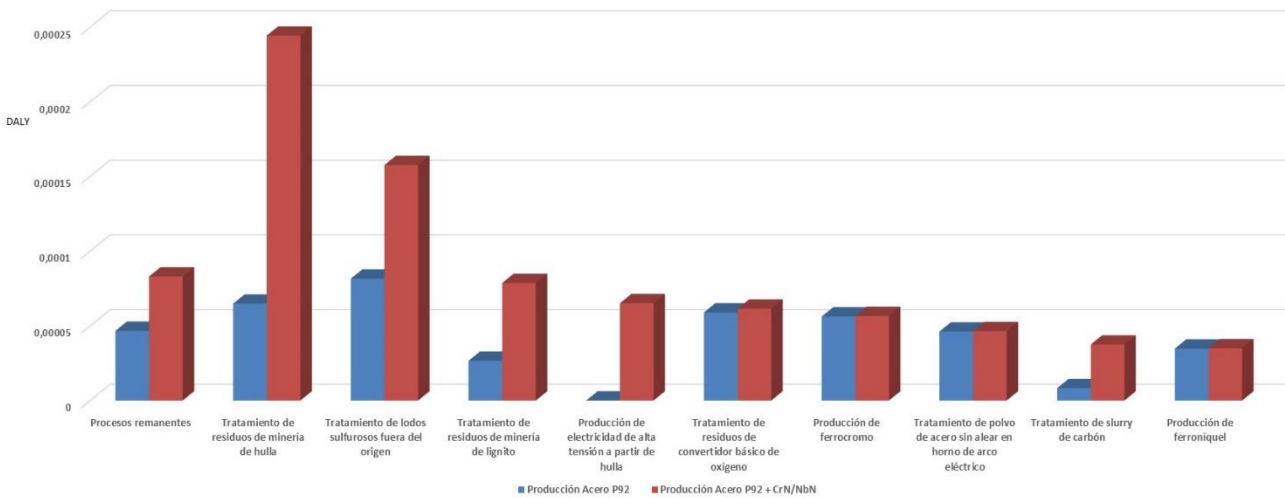


Figura 146: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 147. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano. Estos resultados son similares a los observados para los sistemas de P91 con Ni50Cr y Slurry Al.

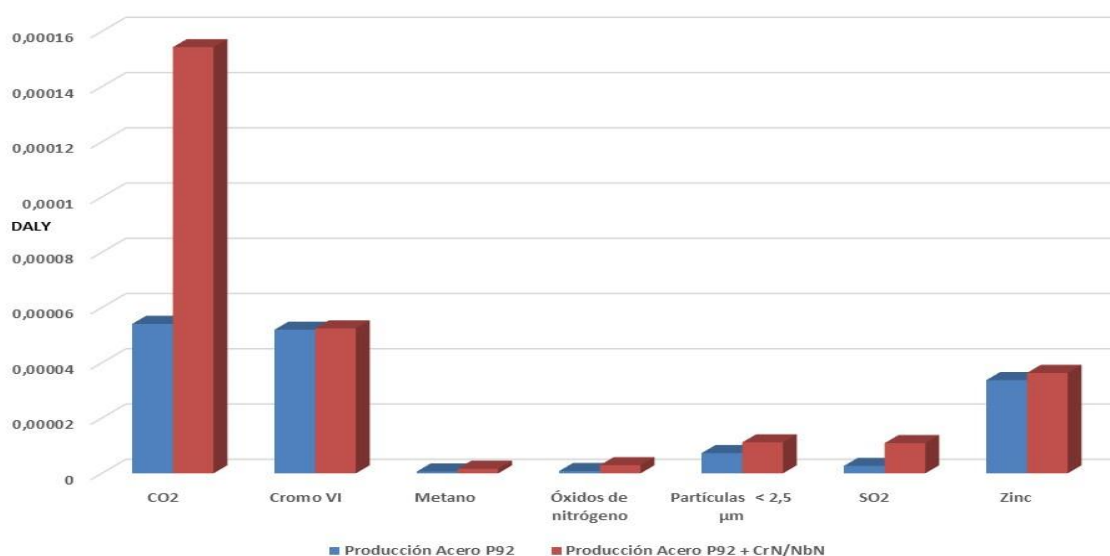


Figura 147: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 25 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con las tablas 23 y 24 de apartados anteriores, se aprecia que el impacto en DALY correspondiente al sistema P92-CrN/NbN es superior al de los sistemas P91-Ni50Cr y P91-Slurry Al.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Acero ferrítico P92 + CrN/NbN
CO ₂	DALY	5,41314E-05	0,00015431
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,25029E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	1,68726E-06
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	2,97293E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	1,1229E-05
SO ₂	DALY	2,71798E-06	1,09594E-05
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,63819E-05

Tabla 25: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.4- Acero ferrítico P92 / Acero ferrítico P92 + NiCr

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P92 frente al sistema P92-Ni50Cr, puede observarse en la figura 148 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en los que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y toxicidad humana no carcinogénica, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en el cambio climático. Resultados similares al sistema P91-Ni50Cr.

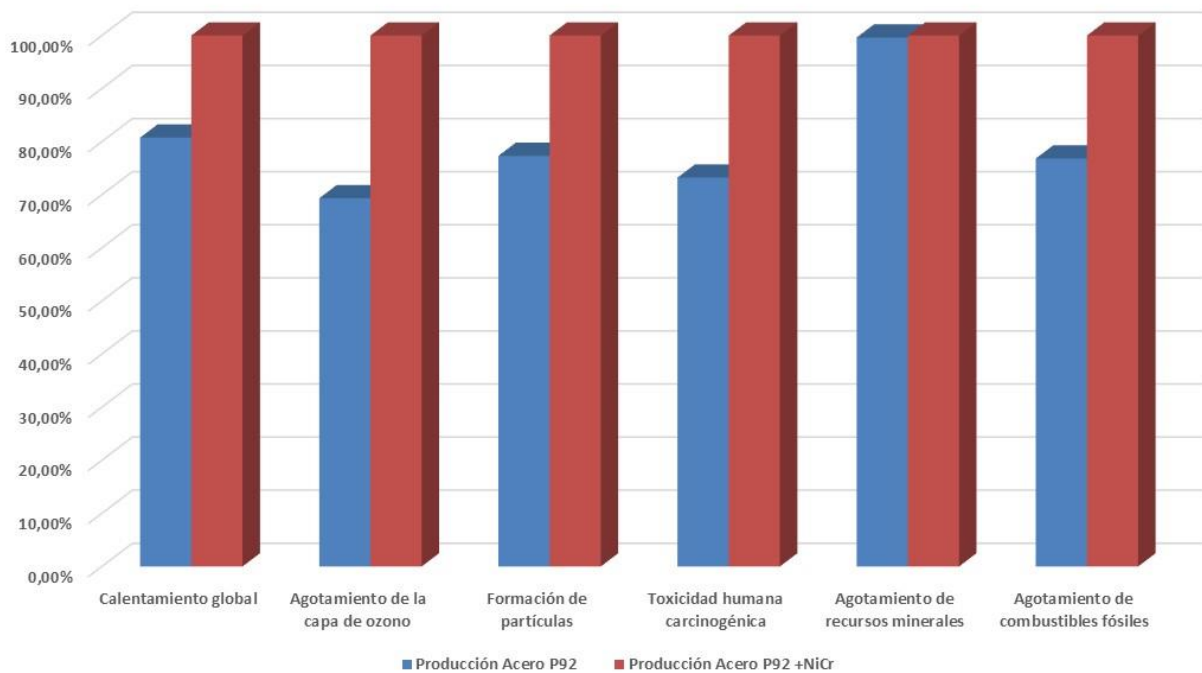


Figura 148: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 149 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo. La diferencia es mayor en el área de salud humana (73% corresponde al sustrato), seguida de ecosistemas (75% corresponde al sustrato) y recursos (86% corresponde al sustrato). Resultados similares al sistema P91-Ni50Cr, con pequeñas variaciones del orden decimales, con menor impacto para el caso del sistema P92-Ni50Cr.

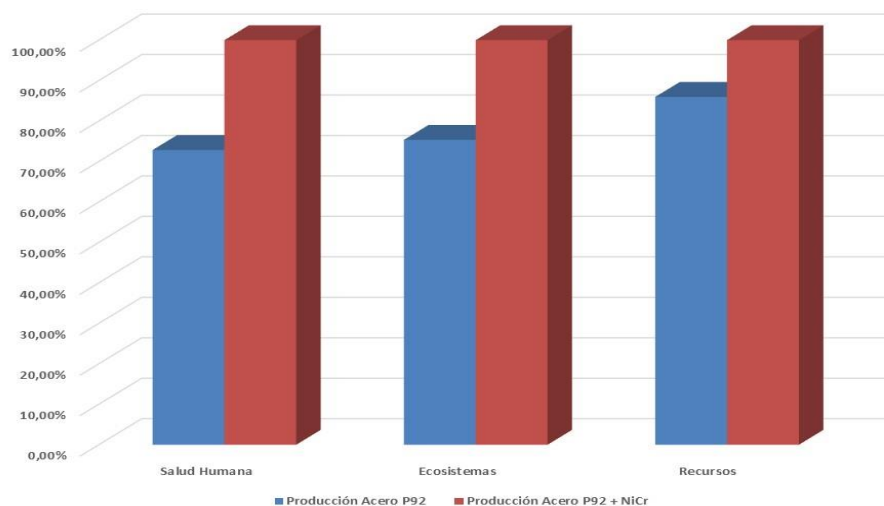


Figura 149: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 150), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $1,46e-4$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. Puede constatarse también la aparición en el sistema sustrato-recubrimiento, como ya habíamos comentado, del proceso correspondiente a tratamiento de residuos de dicromato de Na, con una puntuación de $5,64e-5$ DALY. Resultados similares al sistema P91-Ni50Cr.

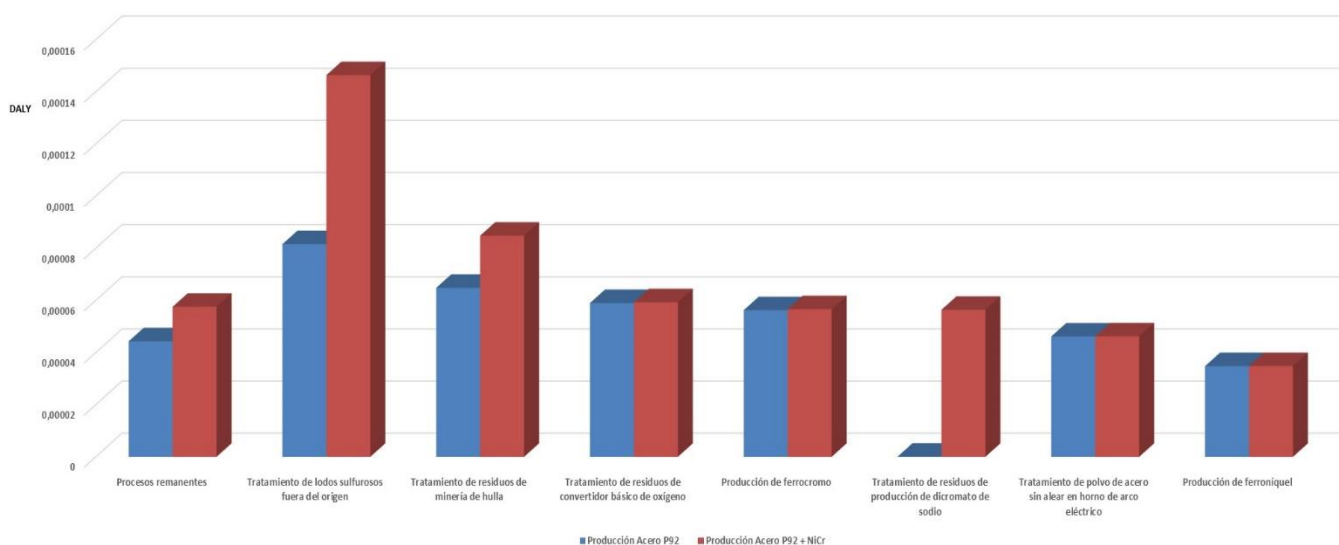


Figura 150: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 151. Al igual que en todos los casos anteriores, el daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano.

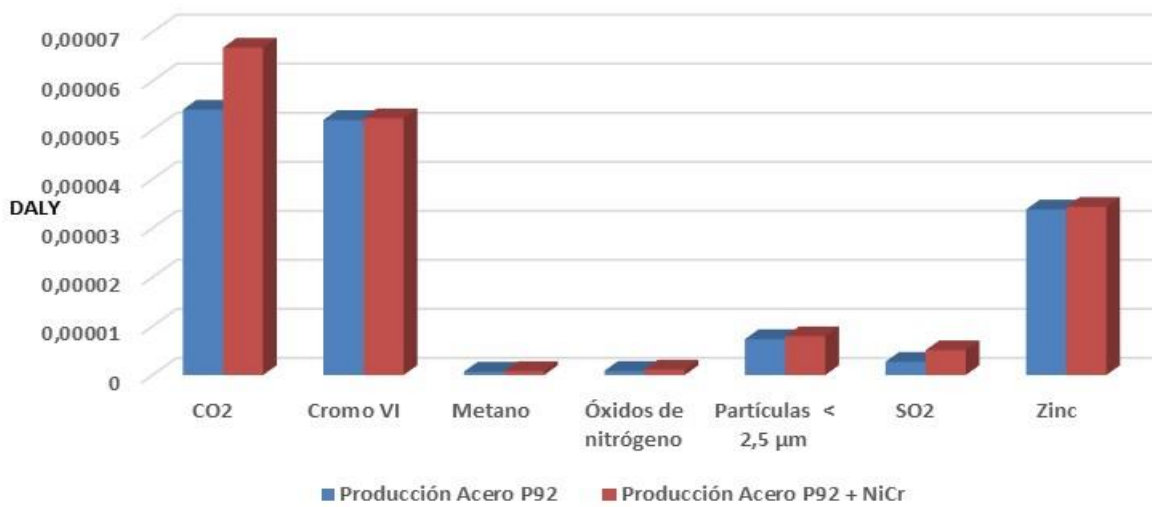


Figura 151: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 26 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con las tablas 23, 24 y 25 de apartados anteriores, se aprecia que el impacto correspondiente al sistema P92-Ni50Cr es similar al del sistema P91-Ni50Cr y ligeramente superior al del sistema P91-Slurry Al. Por otro lado, es inferior al del sistema P92-CrN/NbN.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Acero ferrítico P92 + Ni50Cr
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,67731E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,23854E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	8,31894E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,13683E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,90178E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	5,08322E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,43255E-05

Tabla 26: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.5- Acero ferrítico P92 / Acero ferrítico P92 + Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P92 frente al sistema P92-Slurry Al, puede observarse en la figura 152 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en las que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en la toxicidad humana carcinogénica. Resultados similares al sistema P91-Slurry Al.

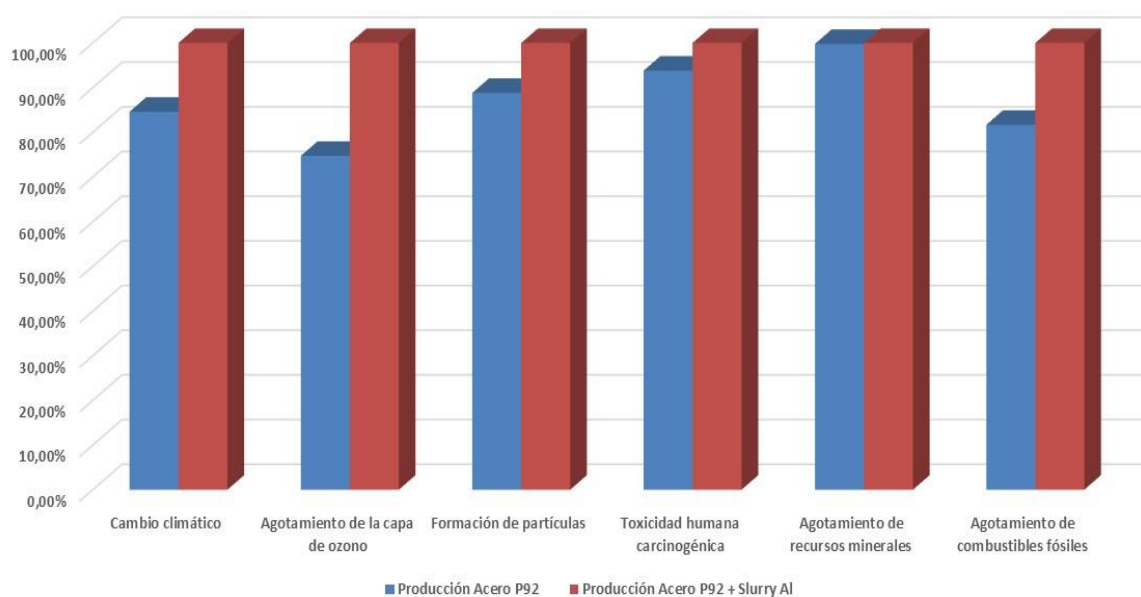


Figura 152: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 153 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo. La diferencia es mayor en el área de ecosistemas (86% corresponde al sustrato), seguida de recursos (89% corresponde al sustrato) y salud humana (90% corresponde al sustrato). Resultados similares al sistema P91-Slurry Al, con pequeñas diferencias del orden de decimales, con menor impacto para el sistema P92-Slurry Al.

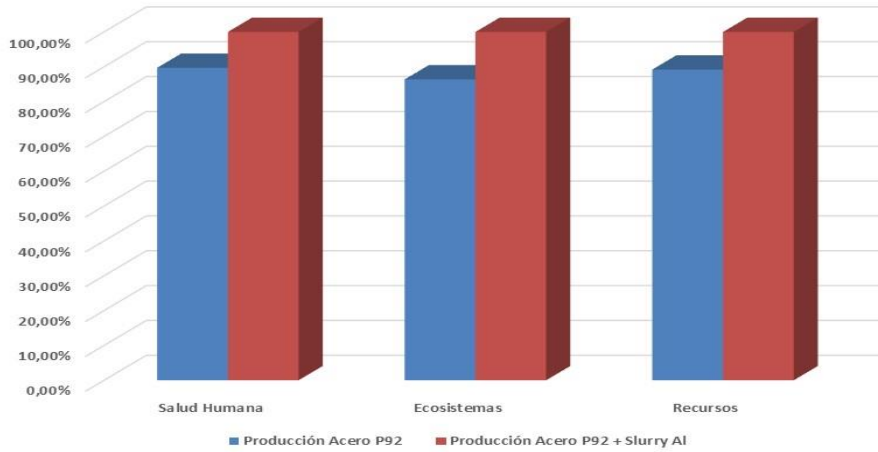


Figura 153: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 154), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $8,95e-5$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. El aumento de DALY sería menor que en el caso del mismo sustrato ferrítico P92 con el recubrimiento de Ni50Cr y por supuesto, que el recubrimiento de CrN/NbN. Los resultados son casi idénticos a los del sistema P91-Slurry Al, con diferencias del orden de varios decimales, y un valor en DALY para el total de procesos inferior por muy poco para el sistema P92-Slurry Al.

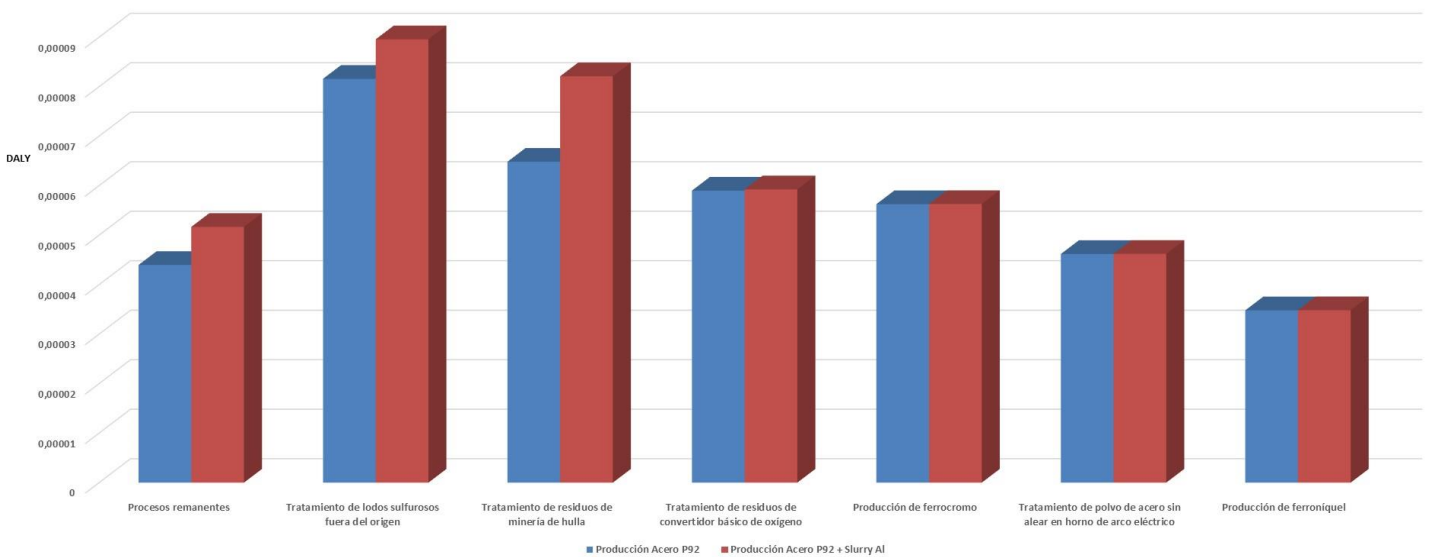


Figura 154: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 155. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano. Resultados similares

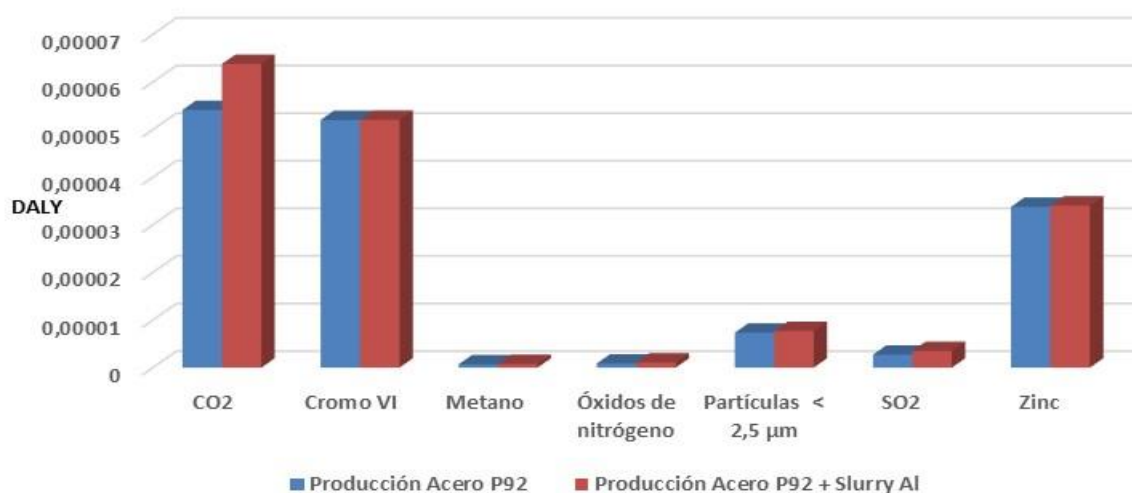


Figura 155: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 27 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con las tablas 23 a 26 de apartados anteriores, se aprecia que el impacto correspondiente al sistema P92-Slurry Al es casi idéntico al del sistema P91-Slurry Al y ligeramente inferior a los sistemas P91 y P92 con Ni50Cr. Por otro lado, es también inferior al del sistema P92-CrN/NbN.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Acero ferrítico P92 + Slurry Al
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,37917E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,20699E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	7,92615E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,07022E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,71006E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	3,51313E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,40373E-05

Tabla 27: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.6- Acero ferrítico VM12 / Acero ferrítico VM12 + Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico VM12 frente al sistema VM12-Slurry Al, puede observarse en la figura 156 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en las que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en la toxicidad humana carcinogénica. Resultados similares a los sistemas de P91 y P92 con Slurry Al.

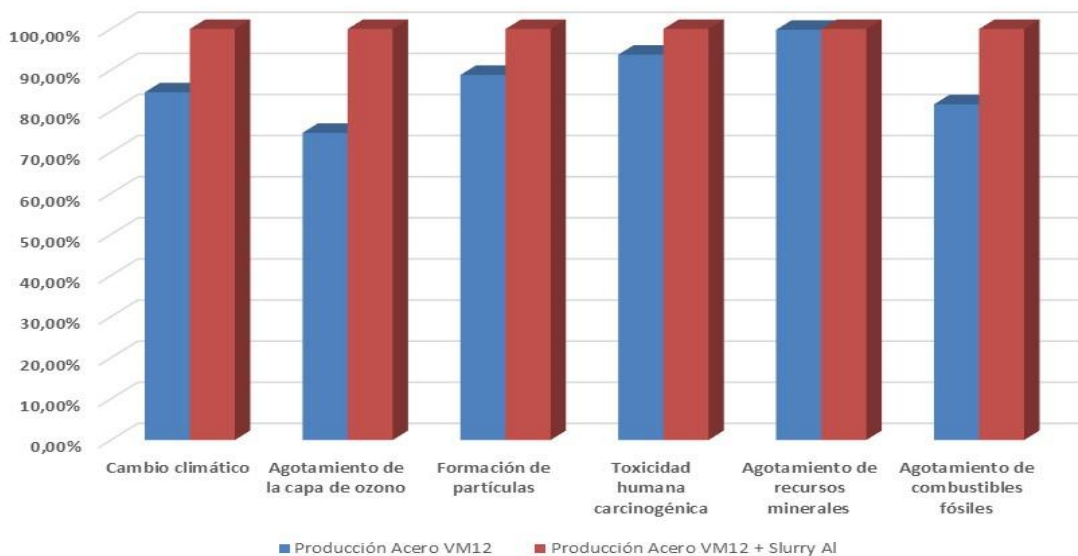


Figura 156: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 157 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo. La diferencia es mayor en el área de ecosistemas (86% corresponde al sustrato), seguida de recursos (89% corresponde al sustrato) y salud humana (90% corresponde al sustrato). Resultados similares a los sistemas P91-Slurry Al y P92-Slurry Al, con pequeñas diferencias del orden de decimales, con el mayor impacto para este sistema VM12-Slurry Al.

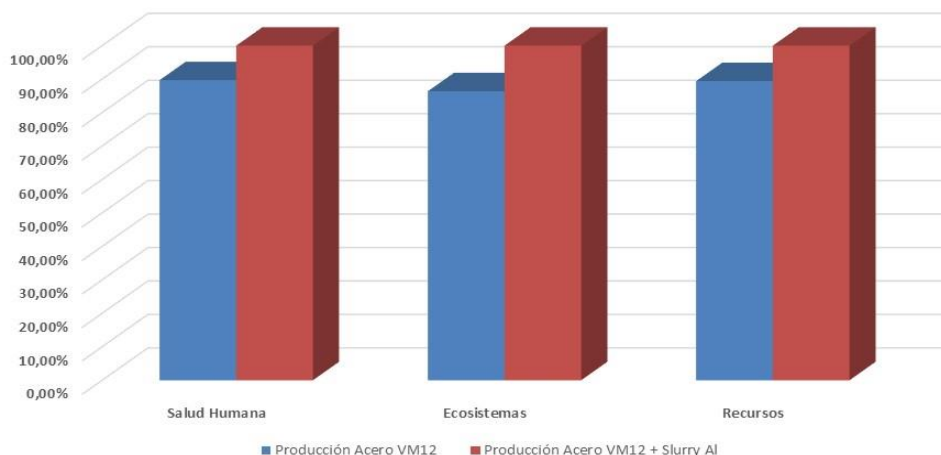


Figura 157: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 158), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo, como en el resto de los casos. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $8,95e-5$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. El aumento de DALY sería menor que en el caso de los sustratos ferríticos con el recubrimiento de Ni50Cr y por supuesto, el recubrimiento de CrN/NbN. Los resultados son similares a los de los otros sustratos ferríticos P91 y P92 con Slurry Al, con diferencias del orden de varios decimales, y un valor en DALY para el total de procesos superior por muy poco para el sistema VM12-Slurry Al.

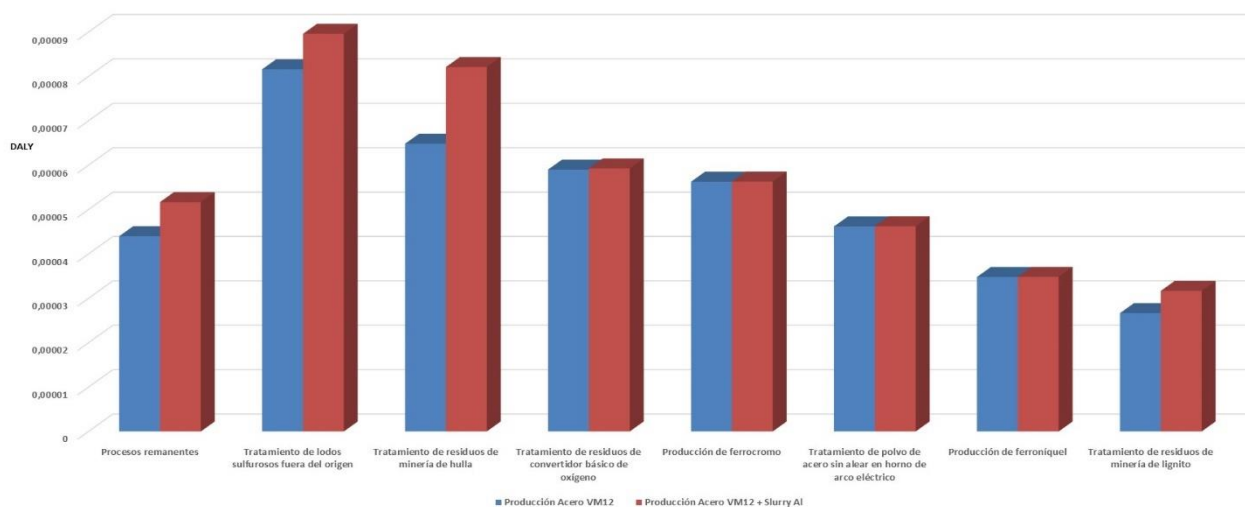


Figura 158: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 159. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano. Resultados similares a los otros sustratos ferríticos P91 y P92 con Slurry Al.

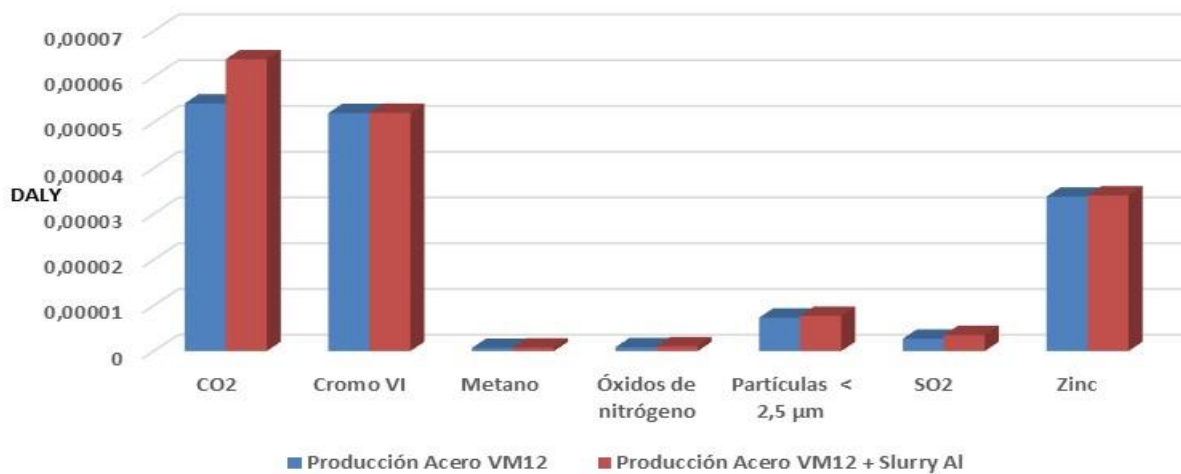


Figura 159: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 28 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con las tablas 23 a 27 de apartados anteriores, se aprecia que el impacto correspondiente al sistema VM12-Slurry Al es similar al de los sistemas P91, P92-Slurry Al y ligeramente inferior a los sistemas P91 y P92 con Ni50Cr. Por otro lado, es también inferior al del sistema P92-CrN/NbN.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico VM12	Acero ferrítico VM12 + Slurry Al
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,37917E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,20699E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	7,92615E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,07022E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,71006E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	3,51313E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,40373E-05

Tabla 28: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12/ acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.7- Acero austenítico AISI 347H / Acero austenítico AISI 347H + Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato austenítico AISI 347H frente al sistema AISI 347H-Slurry Al, puede observarse en la figura 160 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. Las categorías de impacto en los que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que existiría una menor brecha en el agotamiento de recursos minerales y en la toxicidad humana carcinogénica. Resultados similares a los sistemas de P91, P92 y VM12 con Slurry Al.

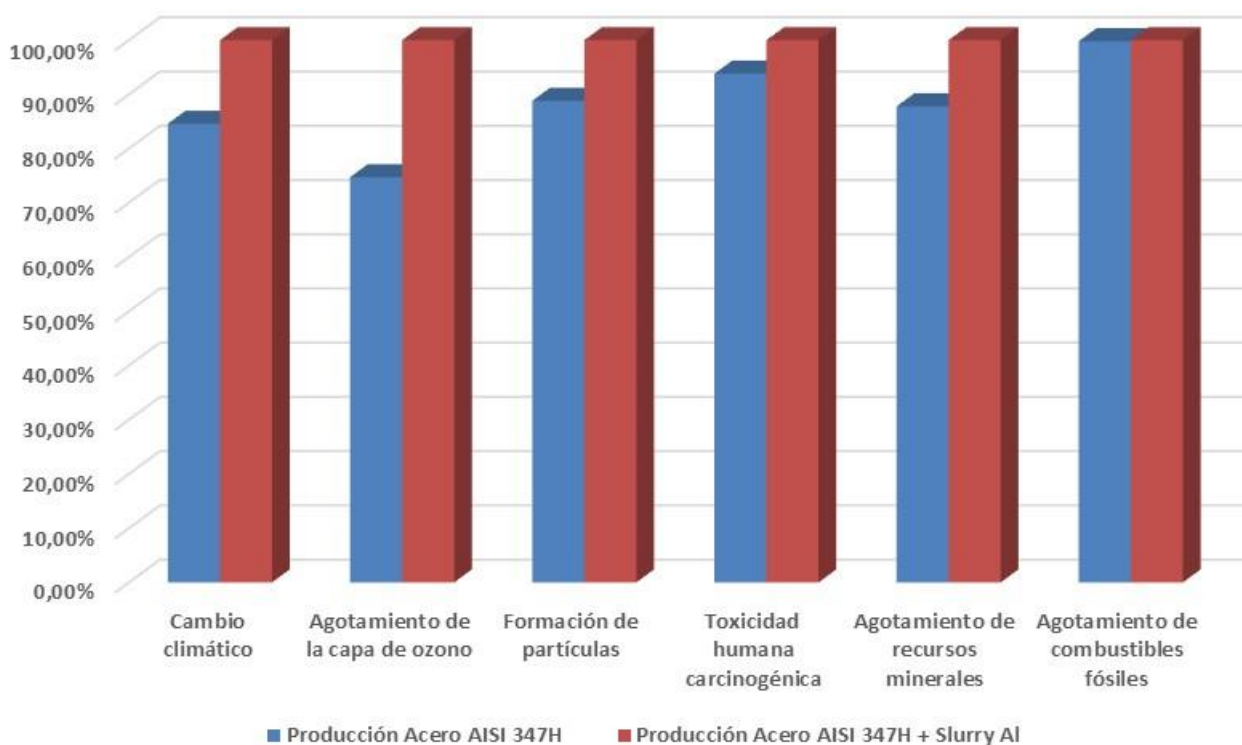


Figura 160: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En lo que respecta a evaluación del daño, en la figura 161 se corrobora que en las tres áreas de daño existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo. La diferencia es mayor en el área de ecosistemas (86% corresponde al sustrato), seguida de recursos (89% corresponde al sustrato) y salud humana (90% corresponde al sustrato). Resultados similares a los sistemas P91, P92, VM12-Slurry Al; con pequeñas diferencias del orden de decimales.

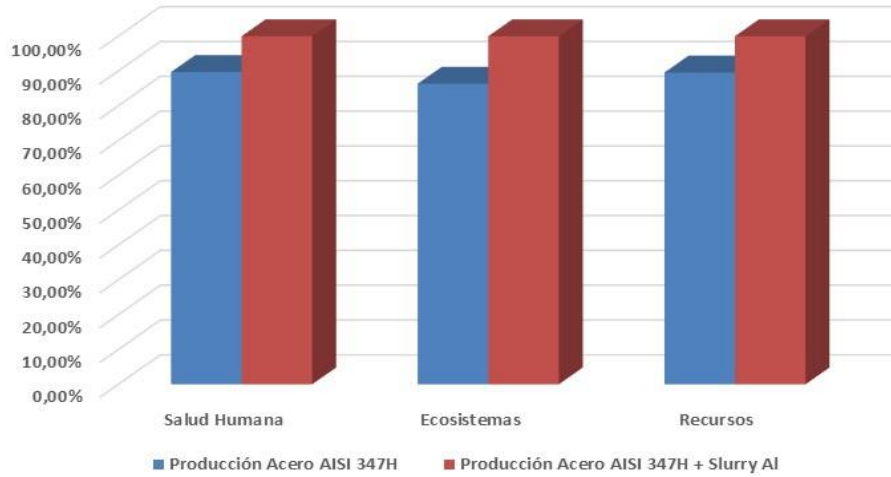


Figura 161: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (ver figura 162), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $8,95e-5$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. El aumento de DALY sería menor que en el caso de los sustratos ferríticos con el recubrimiento de Ni50Cr y por supuesto, el recubrimiento de CrN/NbN. Los resultados son similares a los de los otros sustratos ferríticos P91, P92 y VM12 con Slurry Al.

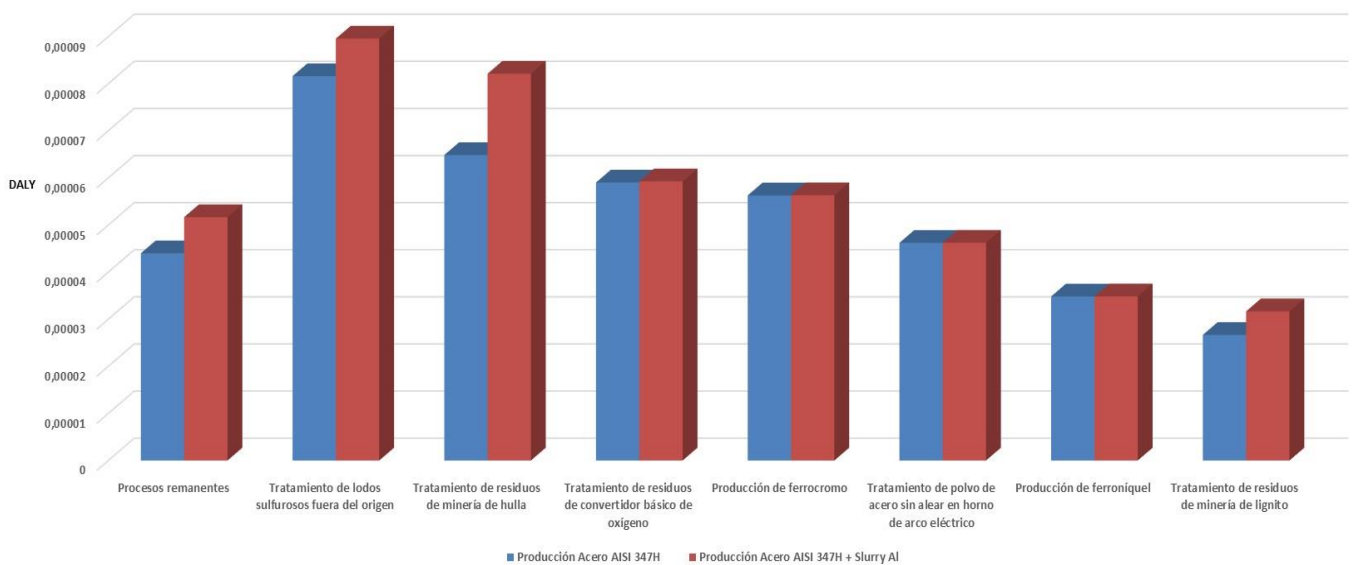


Figura 162: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Finalmente, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 163. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano. Resultados similares a los otros sustratos ferríticos P91, P92 y VM12 con Slurry Al.

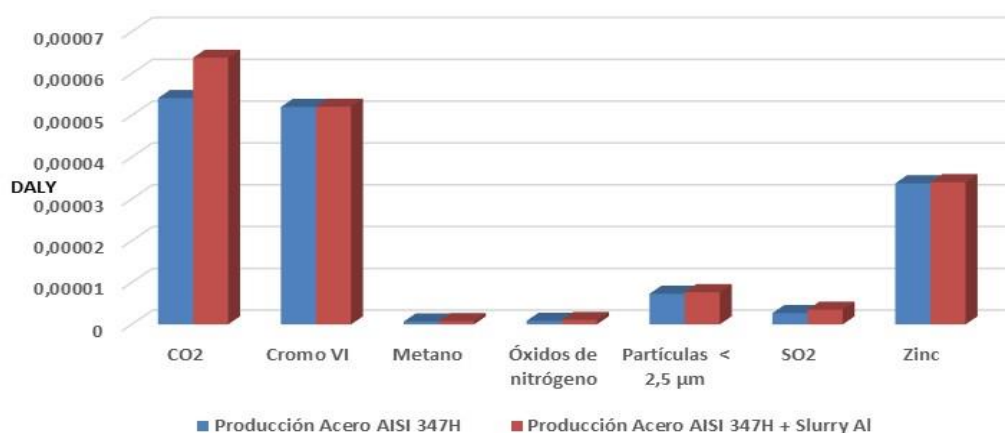


Figura 163: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 29 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con las tablas 23 a 28 de apartados anteriores, se aprecia que el impacto en DALY correspondiente al sistema AISI 347H-Slurry Al es similar al de los sistemas P91, P92, VM12-Slurry Al y ligeramente inferior a los sistemas P91 y P92 con Ni50Cr. Por otro lado, es también inferior al del sistema P92-CrN/NbN.

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 347H	Acero austenítico AISI 347H + Slurry Al
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,37911E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,20699E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	7,92608E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,07021E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,71003E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	3,51308E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,4037E-05

Tabla 29: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H/ acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

5.2.5.8- Acero austenítico AISI 321 / Acero austenítico AISI 321 + Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato austenítico AISI 321 frente al sistema AISI 321-Slurry Al, puede observarse en la figura 164 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja el mayor impacto del sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo, con la única excepción de la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales, donde el sustrato con recubrimiento presenta menor impacto (en torno al 67%) que el sustrato desnudo. Las categorías de impacto en los que la diferencia es más notable corresponderían a agotamiento de la capa de ozono y agotamiento de combustibles fósiles, mientras que existiría una menor brecha en la toxicidad humana carcinogénica.

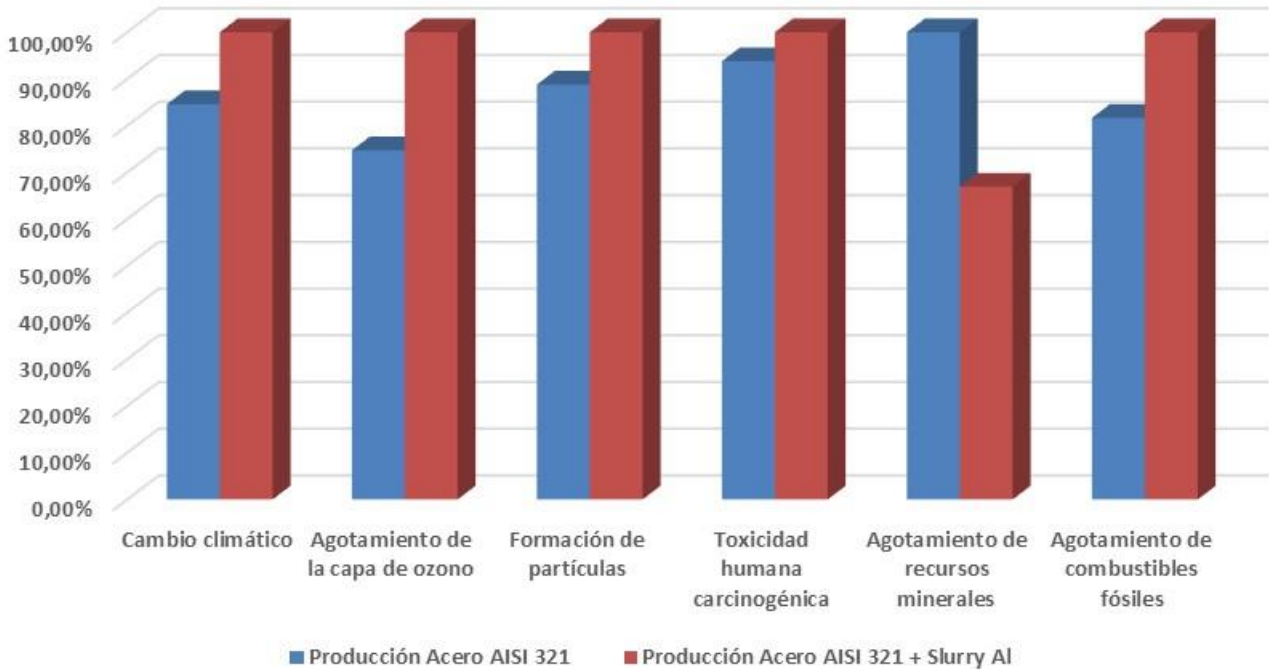


Figura 164: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Para la evaluación del daño, en la figura 165 se corrobora que existe un mayor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento que para el sustrato desnudo en las áreas de daño de ecosistemas (86% corresponde al sustrato) y salud humana (90% corresponde al sustrato). Sin embargo, en el área de recursos existiría mayor impacto para el sustrato que para el sistema sustrato-recubrimiento, con poca diferencia (96% corresponde al sistema sustrato-recubrimiento), en concordancia con lo expuesto anteriormente para la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales.

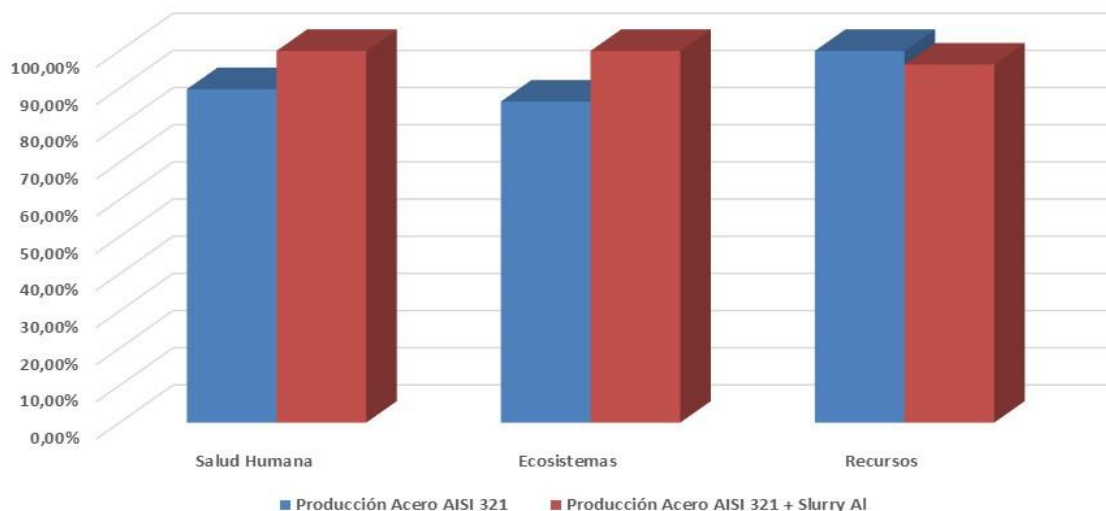


Figura 165: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por otro lado, en la comparativa de las contribuciones de proceso que afectan a la evaluación del daño para la salud humana, expresado en DALY (véase figura 166), se constata el aumento de DALY en el sistema sustrato-recubrimiento frente al sustrato desnudo. De esta forma, el proceso con mayor contribución (tratamiento de lodos sulfurosos fuera del origen) obtendría una puntuación de $8,95e-5$ en el sistema sustrato-recubrimiento, por los $8,15e-5$ del sustrato desnudo. El aumento de DALY sería menor que en el caso de los sustratos ferríticos con el recubrimiento de Ni50Cr y por supuesto, el recubrimiento de CrN/NbN. Los resultados son similares a los de los otros sustratos ferríticos P91, P92 y VM12 y al austenítico 347H con Slurry Al.

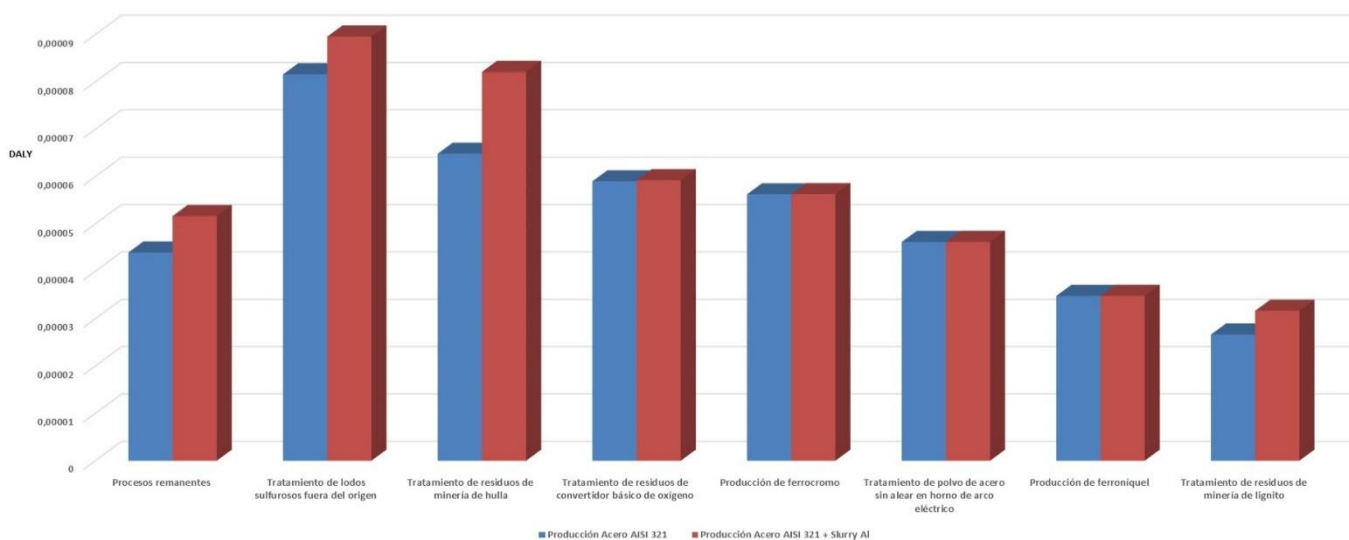


Figura 166: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por último, revisando la evaluación del daño para salud humana, referida a la emisión atmosférica (valor de corte 0,096%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento del sistema), se obtiene el gráfico comparativo de la figura 167. El daño en DALY es superior en el sistema sustrato-recubrimiento que en el sustrato desnudo. La diferencia es más acentuada en algunas sustancias como el CO₂ o el SO₂. Para ambos casos (sustrato desnudo y con recubrimiento), las sustancias con más afectación serían, de mayor a menor orden de magnitud, el CO₂, cromo VI, zinc, partículas menores de 2,5 µm, SO₂, óxidos de nitrógeno y metano. Resultados similares a los de los sustratos ferríticos y el austenítico AISI347H con Slurry Al.

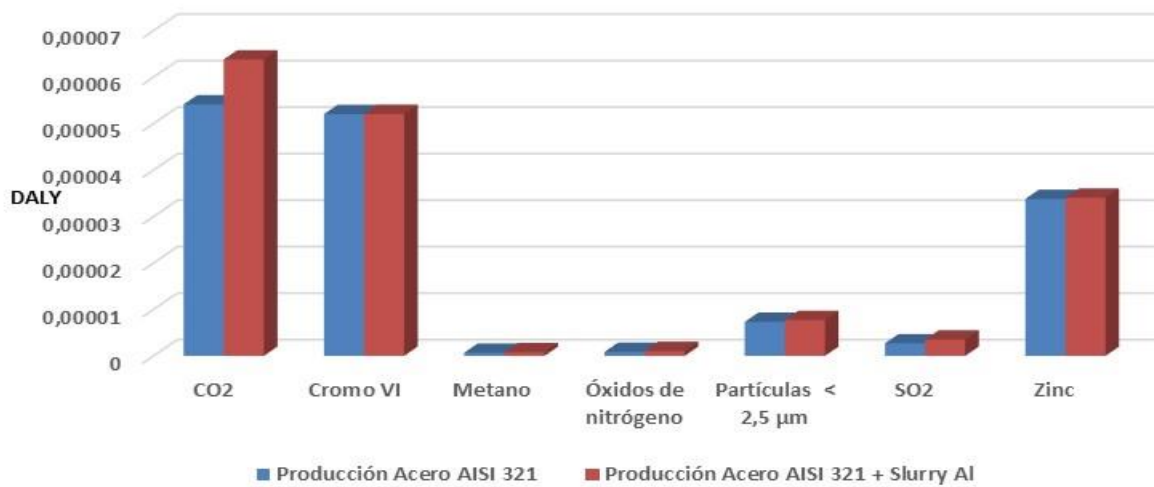


Figura 167: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se compara la tabla 30 inferior que refleja los datos de inventario para la evaluación del daño para salud humana referida a emisión atmosférica en DALY con las tablas 23 a 29 de apartados anteriores, se aprecia que el impacto en DALY correspondiente al sistema AISI 321-Slurry Al es similar al de los sistemas P91, P92, VM12, AISI 347H-Slurry Al y ligeramente inferior a los sistemas P91 y P92 con Ni50Cr. Por otro lado, es también inferior al del sistema P92-CrN/NbN.

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 321	Acero austenítico AISI 321 + Slurry Al
CO ₂	DALY	5,41314E-05	6,37915E-05
Cromo VI	DALY	5,20236E-05	5,20699E-05
Metano	DALY	6,97061E-07	7,92613E-07
Óxidos de Nitrógeno	DALY	8,67262E-07	1,07022E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,33455E-06	7,71005E-06
SO ₂	DALY	2,71798E-06	3,51312E-06
Zinc	DALY	3,37699E-05	3,40372E-05

Tabla 30: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321/ acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Como análisis de resultados de este apartado, puede establecerse que el impacto medioambiental de los sistemas sustrato-recubrimiento es mayor en todos los casos al de los sustratos desnudos, con la única excepción ya comentada del AISI 321 y AISI 321-Slurry Al para la categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales y el área de recursos, donde el sustrato desnudo presenta un impacto ligeramente superior al del sistema sustrato-recubrimiento. Esto puede explicarse por la poca afectación que tiene el AISI 321 en esta categoría y área determinados. Por otro lado, se verifica que las diferencias observadas entre los impactos del sustrato desnudo frente al sustrato con el recubrimiento son mayores en el sistema P92-CrN/NbN, lo que da una idea del gran impacto generado por este recubrimiento y proceso de deposición por HiPIMS en comparación con el resto. Esto confirma el peor comportamiento medioambiental del sistema P92-CrN/NbN debido a la influencia del recubrimiento, en comparación con el resto de los sistemas con recubrimiento de Ni50Cr y de Slurry Al. Para estos dos últimos recubrimientos, los sistemas sustrato-Ni50Cr presentan un impacto algo superior al de los sistemas sustrato-Slurry Al. Todo ello confirma la importancia del recubrimiento y método de deposición del mismo al generar el impacto global del sistema, ya que el mismo tipo de recubrimiento produce afectaciones similares en distintos sustratos. Si bien el sistema P92-Slurry Al se presenta como el medioambientalmente más ventajoso, otro sistema (P92-CrN/NbN) se presenta como el más desfavorable desde el punto de vista ambiental. Asimismo, los sustratos ferríticos empleados para un mismo tipo de recubrimiento (véase P91 y P92 para Ni50Cr; así como P91, P92 y VM12 para Slurry Al) también presentan diferencias en los valores de DALY del orden de decimales, siempre con el menor impacto producido por el P92, seguido de P91 y VM12. Para el caso de los sustratos austeníticos los valores son prácticamente idénticos, con la única diferencia del menor impacto del AISI 321 en este caso desnudo, frente al sistema AISI 321-Slurry Al en la categoría y área mencionados.

5.2.6.- Efecto del proceso de recubrimiento.

5.2.6.1- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de procesos utilizados para el recubrimiento

Se presentan a continuación los resultados correspondientes al análisis de ciclo de vida comparativo de los procesos y recubrimientos empleados para los distintos sustratos (excluyendo dichos sustratos del análisis). Se han tomado los valores de inventario correspondientes a la deposición de Slurry de Al y Ni50Cr en el acero ferrítico P91, así como a la deposición de CrN/NbN en el acero ferrítico P92 (único sustrato con este tipo de deposición).

En el gráfico de caracterización, recogido en la figura 168, puede apreciarse el mayor impacto del recubrimiento de CrN/NbN por HiPIMS en todas las categorías de impacto estudiadas, siendo los impactos generados por la deposición de Ni50Cr mediante HVOF y Slurry Al mediante pintado y tratamiento térmico considerablemente menores. Los impactos generados por las deposiciones de Ni50Cr y Slurry Al son bastante similares, observándose una diferencia algo más sustancial en el agotamiento de recursos minerales (mayor impacto del Slurry Al) así como en la toxicidad humana carcinogénica (mayor impacto del Ni50Cr). Esto puede ser debido, por un lado, a la presencia de muchos elementos y compuestos en la composición del Slurry de Al, y por otro lado, a la presencia de Cr en una proporción del 50% para el recubrimiento de Ni50Cr.

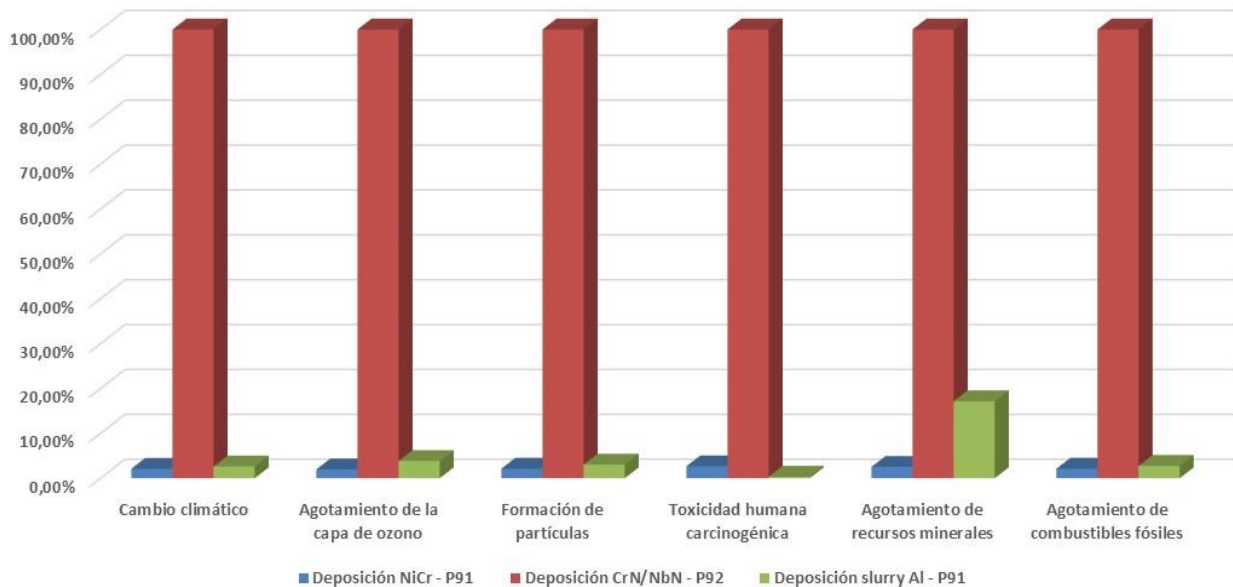


Figura 168: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 169 correspondiente a la normalización de los datos, se verifica el mayor impacto generado por la deposición de CrN/NbN en todas las categorías de impacto, destacando cambio climático (valor de 0,03), formación de partículas (valor de 0,004) y toxicidad humana carcinogénica (valor de 0,63). La deposición de Ni50Cr presenta su máximo en toxicidad humana carcinogénica (valor de casi 0,02). En el resto de las categorías no se aprecian resultados significativos.

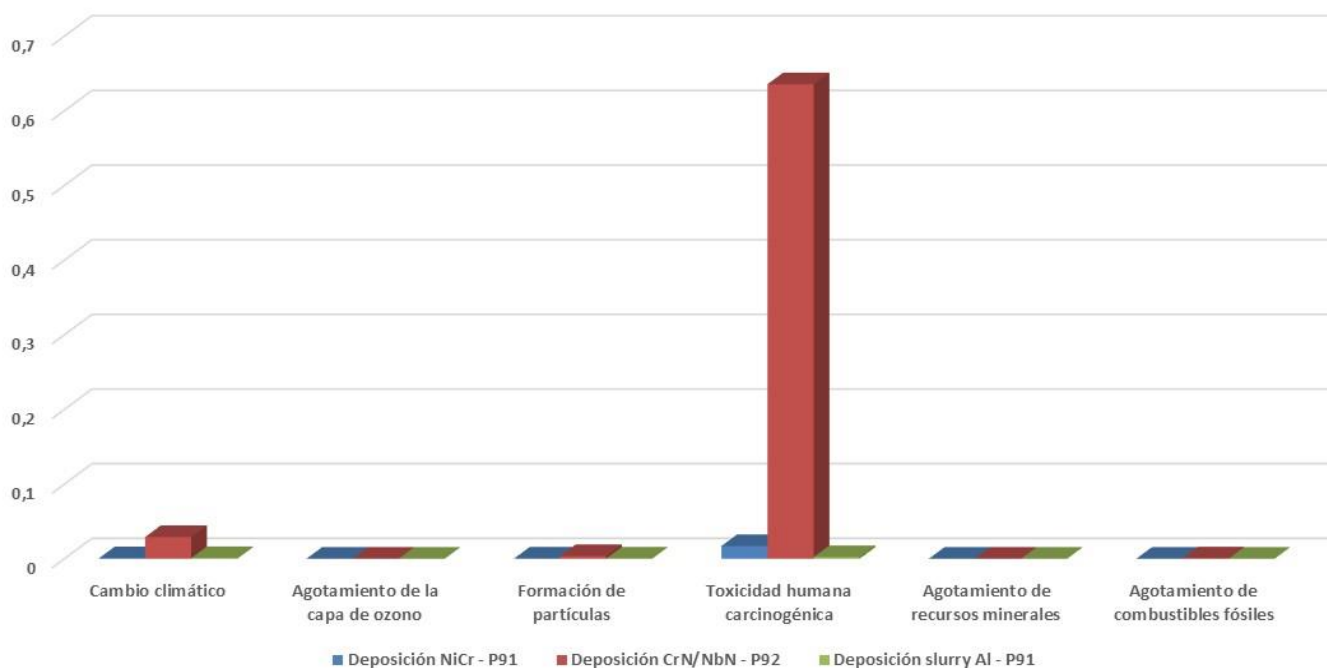


Figura 169: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Normalización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Por lo que respecta a puntuación única por categoría de impacto (recogido en la figura 170), los resultados refrendan lo analizado en los dos gráficos anteriores. Se observa un total de 230 Pt para la deposición de CrN/NbN (de los cuales 25 Pt corresponderían a toxicidad humana no carcinogénica, 190 Pt a toxicidad humana carcinogénica y 8,69 Pt a cambio climático). Por el contrario, la deposición de Ni50Cr y Slurry Al generarían algo más de 6 y 7 Pt cada una en el total de categorías de impacto, siendo la toxicidad humana carcinogénica la categoría predominante en Ni50Cr y la toxicidad humana no carcinogénica la predominante en Slurry Al. Como en el caso anterior, con mayor o menor diferencia, los valores de la deposición de CrN/NbN son los mayores para todas las categorías de impacto, mientras que las deposiciones de Ni50Cr y Slurry Al tienen valores mucho más parejos.

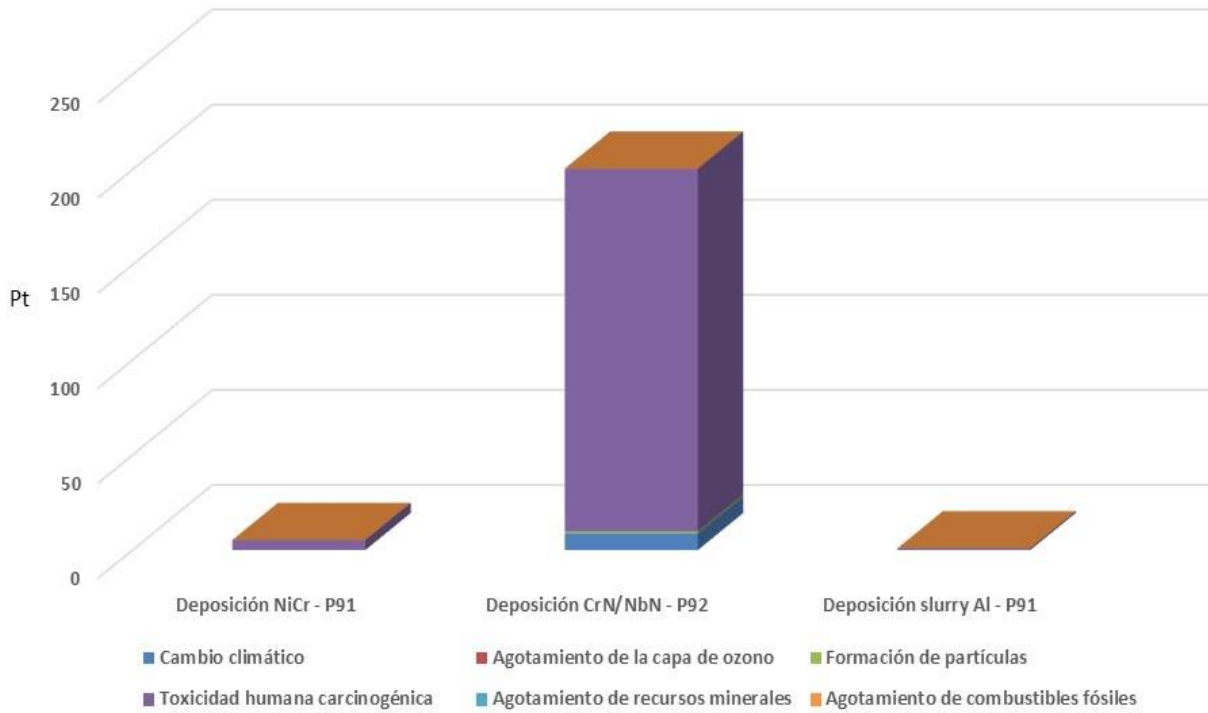


Figura 170: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Puntuación única por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

En la figura 171 de puntuación única se comprueba que el área final de daño principal en las tres deposiciones es la salud humana, seguido de ecosistemas y recursos. Nuevamente se verifica el mayor impacto de la deposición de CrN/NbN en todas las áreas, mientras que el resto de las deposiciones tienen valores similares.

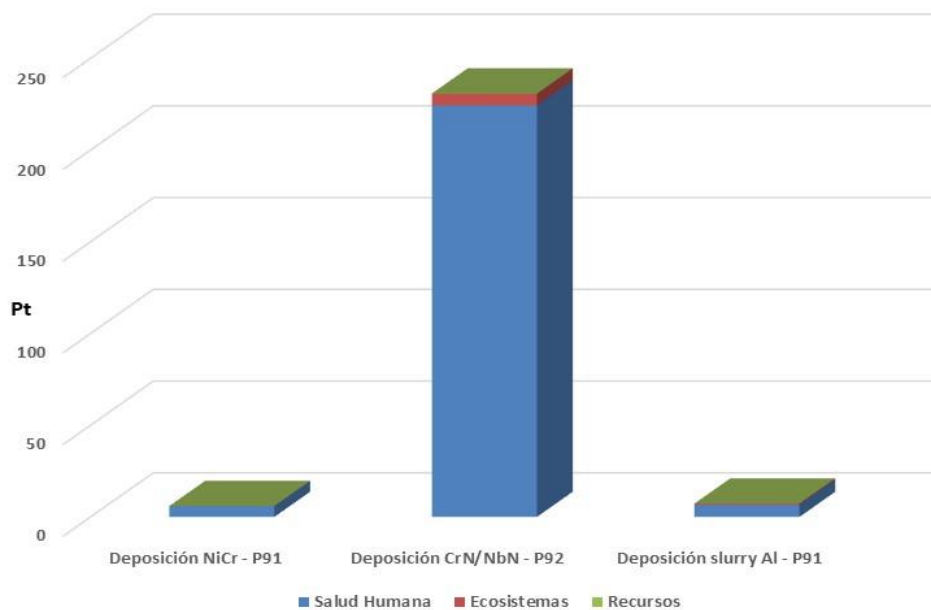


Figura 171: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Puntuación única.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Las contribuciones de proceso, tanto en evaluación del daño (tabla 31) como en puntuación única (tabla 32), muestran el mayor impacto de la deposición de CrN/NbN.

Proceso	Unidad	Deposición NiCr - P91	Deposición CrN/NbN - P92	Deposición Slurry Al - P91
Residue from Na-dichromate production	DALY	0,001427674	0,053082497	8,12153E-06
Spoil from hard coal mining	DALY	5,57934E-05	0,003025961	7,3642E-05
Sulfidic tailing, off-site	DALY	4,94852E-05	0,001911757	0,001544007
Spoil from lignite mining	DALY	4,81541E-05	0,002065112	3,95426E-05
Redmud from bauxite digestion	DALY	3,18672E-05	0,001188452	4,17694E-05
Ferrochromium, high-carbon, 68% Cr	DALY	8,51071E-06	0,000317986	2,5329E-06
Hard coal ash	DALY	8,20252E-06	0,000389271	7,188E-06
Coal slurry	DALY	7,7993E-06	0,000445081	1,09494E-05
Slag, unalloyed electric arc furnace steel	DALY	2,89119E-06	0,0001553	3,27359E-05
Heat, district or industrial, natural gas	DALY	2,66371E-06	9,91616E-05	2,88835E-07
Lignite ash	DALY	2,47168E-06	0,000105984	1,8059E-06
Heat, district or industrial, other than natural gas	DALY	2,28999E-06	8,59504E-05	2,98859E-06
Electricity, high voltage	DALY	1,74148E-06	6,51007E-05	1,06428E-06

Tabla 31: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Contribución de proceso. Evaluación daño Human Health. Valor de corte 0,09%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Proceso	Unidad	Deposición NiCr - P91	Deposición CrN/NbN - P92	Deposición Slurry Al - P91
Residue from Na-dichromate production	Pt	4,812905011	178,9491807	0,027378913
Spoil from hard coal mining	Pt	0,202923848	11,00559679	0,267840208
Sulfidic tailing, off-site	Pt	0,182017331	7,031859251	5,679195761
Spoil from lignite mining	Pt	0,175210963	7,514008722	0,143877774
Redmud from bauxite digestion	Pt	0,109560725	4,085950709	0,143605128
Hard coal ash	Pt	0,028954584	1,374113556	0,025373372
Ferrochromium, high-carbon, 68% Cr	Pt	0,028726415	1,073304802	0,00854935
Coal slurry	Pt	0,028228158	1,610890693	0,039629268
Heat, district or industrial, natural gas	Pt	0,012112673	0,450917091	0,001313419
Heat, district or industrial, other than natural gas	Pt	0,010299553	0,386574001	0,013441601
Slag, unalloyed electric arc furnace steel	Pt	0,009772995	0,52495496	0,110656068
Lignite ash	Pt	0,00894874	0,383716636	0,006538275
Electricity, high voltage	Pt	0,007844283	0,29323823	0,004793937

Tabla 32: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Contribución de proceso. Puntuación única. Valor de corte 0,09%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Asimismo, la evaluación del daño asociada a emisión atmosférica, tanto en cambio climático (tabla 33) como en salud humana (tabla 34), muestran el mayor impacto de la deposición de CrN/NbN en comparación con las correspondiente a Ni50Cr y Slurry Al, cuyos valores son similares. Se ha fijado un valor de corte del 0,09%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

Sustancia	Unidad	Deposición NiCr - P91	Deposición CrN/NbN - P92	Deposición Slurry Al - P91
CO ₂	DALY	5,28015E-05	0,00249056	6,49432E-05
Metano	DALY	8,09092E-07	3,53017E-05	8,69786E-07
CFC-14	DALY	5,83564E-07	2,1763E-05	6,77897E-07
SF ₆	DALY	3,11361E-07	1,85943E-05	3,81573E-07
N ₂ O	DALY	1,4001E-07	7,01435E-06	2,73869E-07
Etano, HFC-116	DALY	5,65041E-08	2,10841E-06	1,14697E-07

Tabla 33: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,09%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Deposición NiCr - P91	Deposición CrN/NbN - P92	Deposición Slurry Al - P91
CO ₂	DALY	5,28015E-05	0,00249056	6,49432E-05
Cromo VI	DALY	7,94975E-06	0,000298055	2,43262E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	3,60276E-06	0,000154355	3,10258E-06
SO ₂	DALY	2,51816E-06	0,000128664	5,33226E-06
Zinc	DALY	1,85801E-06	8,15898E-05	2,85892E-05

Tabla 34: Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,09%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

A la vista de todos los datos anteriores puede deducirse el mayor impacto ambiental del proceso de deposición de CrN/NbN en el acero ferrítico P92, en comparación con los otros procesos de deposición de Ni50Cr y Slurry Al en el acero ferrítico P91. Estos resultados de la deposición de Ni50Cr y Slurry Al serían extrapolables al resto de sustratos ferríticos y austeníticos empleados para cada caso, lo cual da idea del de afectación superior que produce la deposición de CrN/NbN respecto al resto de procesos de deposición, independientemente del sustrato; esto es debido fundamentalmente al mayor requerimiento energético (consumo eléctrico) asociado a la técnica HiPIMS en comparación con HVOF y pintado + tratamiento térmico de difusión. El proceso de deposición del Slurry Al parece tener un impacto levemente superior que el proceso de deposición del Ni50Cr en lo que se refiere a la emisión atmosférica asociada al daño en cambio climático, mientras que los valores para salud humana presentan más variaciones, con mayor afectación del Ni50Cr en lo referente a sustancias como Cromo VI y partículas de tamaño menor a 2,5 µm.

5.2.6.2- Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los sustratos vs procesos de recubrimiento

Se presentan a continuación los resultados correspondientes al análisis de ciclo de vida comparativo de una unidad funcional de sustrato (1kg) frente al recubrimiento y proceso de deposición empleado para su aplicación. En este apartado es donde tiene lugar una mayor variabilidad en los resultados observados, debido a que no se utilizan elementos comunes en la comparación (en los casos anteriores, se efectuaban análisis de ciclos de vida comparativos entre sustratos desnudos entre sí, sustratos recubiertos entre sí, sustratos desnudos frente a sustratos recubiertos, o procesos de deposición de recubrimiento entre sí, existiendo en todos los casos elementos comunes). Al hacer el análisis de ciclo de vida comparativo de sustratos frente a procesos de deposición y recubrimientos, estamos analizando la comparación entre dos elementos por separado, de cara a ver qué parte del sistema presenta por sí sólo un mayor impacto ambiental.

5.2.6.2.1- Acero ferrítico P91 / proceso recubrimiento NiCr

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P91 frente al recubrimiento de Ni50Cr y su proceso de deposición mediante HVOF puede observarse en la figura 172 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas, toxicidad humana no carcinogénica y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana carcinogénica y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de cambio climático el impacto es prácticamente el mismo.

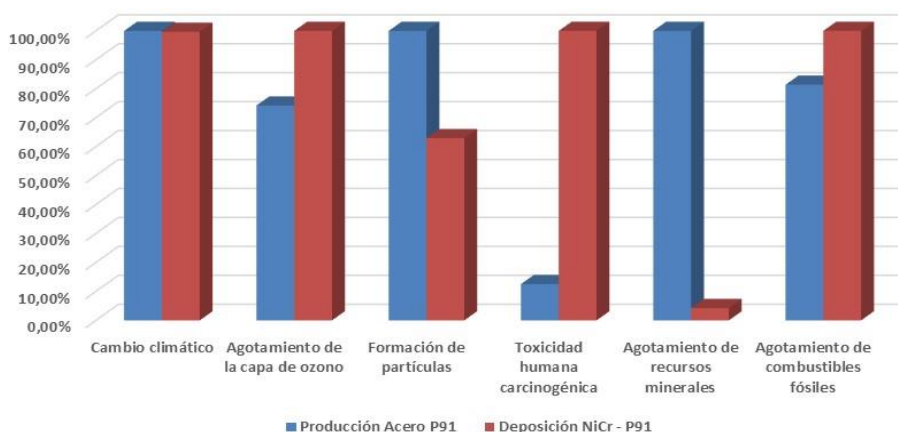


Figura 172: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 173 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana, mientras que el sustrato lo haría en recursos y ecosistemas.

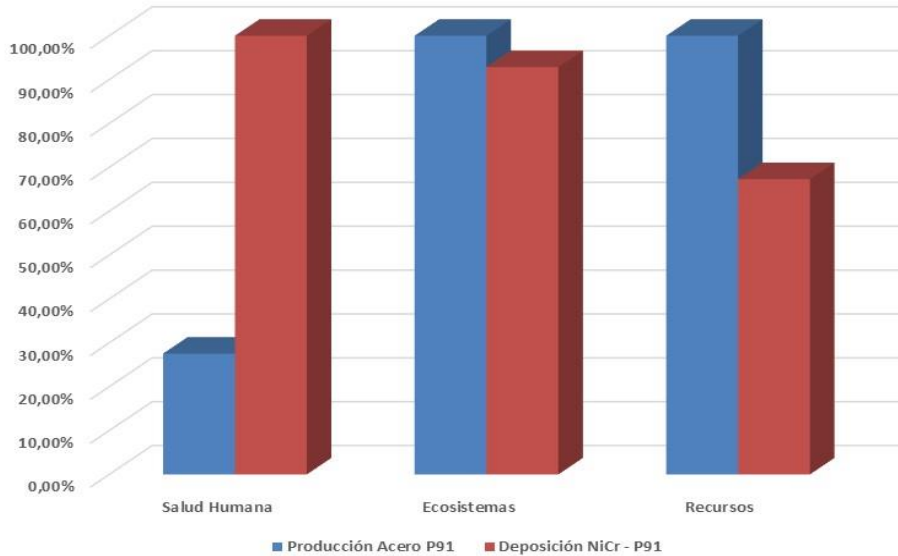


Figura 173: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Evaluación del daño. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Cuando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 174), la diferencia es sustancial en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en la toxicidad humana carcinogénica (0,017 por 0,002). Por el contrario, el sustrato presenta un impacto levemente superior frente al proceso de deposición en cambio climático y formación de partículas, estando los valores de estas categorías y de las restantes más igualados.

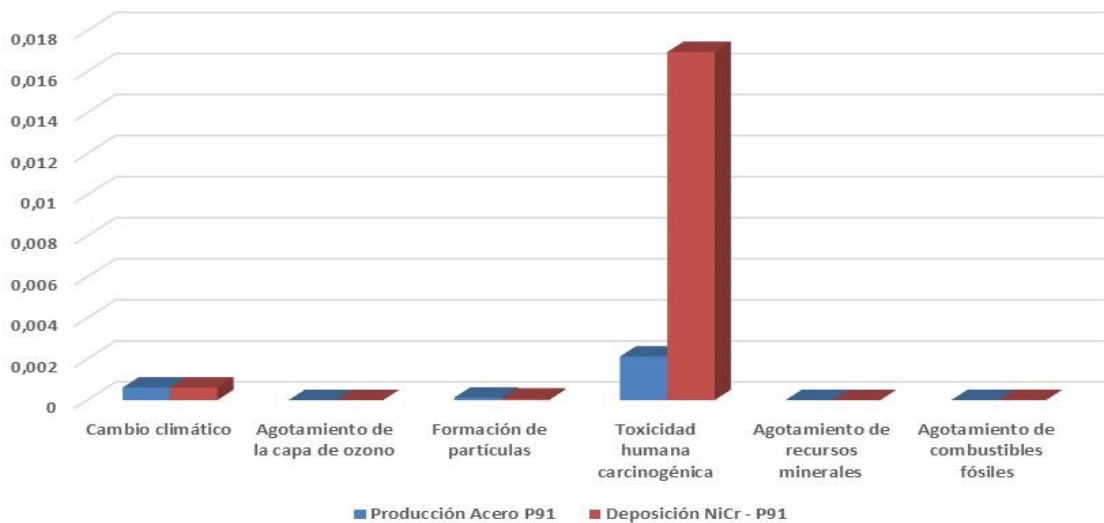


Figura 174: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Normalización por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 175) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato (0,019 por 0,005) en salud humana, mientras que los resultados son muy parejos y de órdenes inferiores para las áreas de ecosistemas y recursos.

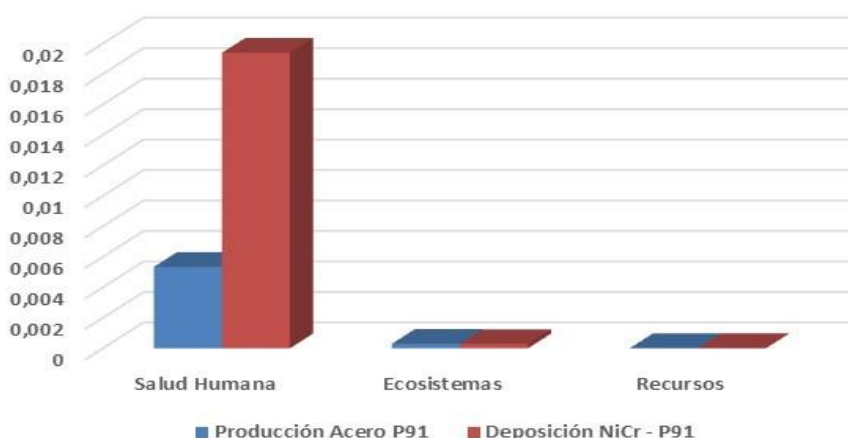


Figura 175: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Normalización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 35), salud humana (tabla 36) y puntuación única (tabla 37), respectivamente. Los resultados en este sentido son bastante parejos en todos los casos. Véase una leve afectación más elevada en DALY del proceso de deposición para sustancias como metano o N₂O, mientras que el sustrato presenta mayores valores en el resto de sustancias.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Deposición NiCr - P91
CO ₂	DALY	5,4131E-05	5,2802E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	1,4001E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	8,0909E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	5,8356E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	3,1136E-07

Tabla 35: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Deposición NiCr - P91
CO ₂	DALY	5,4131E-05	5,2802E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	7,9497E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,6028E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	2,5182E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	1,858E-06

Tabla 36: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Deposición NiCr - P91
CO ₂	Pt	0,24608309	0,2400374
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,02679799
Metano	Pt	0,00316616	0,00367502
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,00380416
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01210527
SO ₂	Pt	0,01100986	0,01020044
Zinc	Pt	0,12409694	0,00682841

Tabla 37: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a las categorías de impacto relativas a la salud humana y lógicamente en esta área de daño, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados, lo cual indica un comportamiento ambiental similar en dichos casos. A la hora de analizar el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como metano y N₂O, y del sustrato para el resto.

5.2.6.2.2- Acero ferrítico P91 / proceso recubrimiento Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P91 frente al recubrimiento de Slurry Al y su proceso de deposición mediante pintado y tratamiento térmico puede observarse en la figura 176 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de toxicidad humana carcinogénica el impacto es prácticamente el mismo, ligeramente superior el del sustrato. Este gráfico experimenta cambios con el respecto al correspondiente para la comparativa P91 vs Ni50Cr. Los principales cambios serían el mayor impacto del proceso de deposición y el recubrimiento de Slurry Al frente al sustrato en la categoría de cambio climático, así como el menor impacto en la categoría de toxicidad humana carcinogénica.

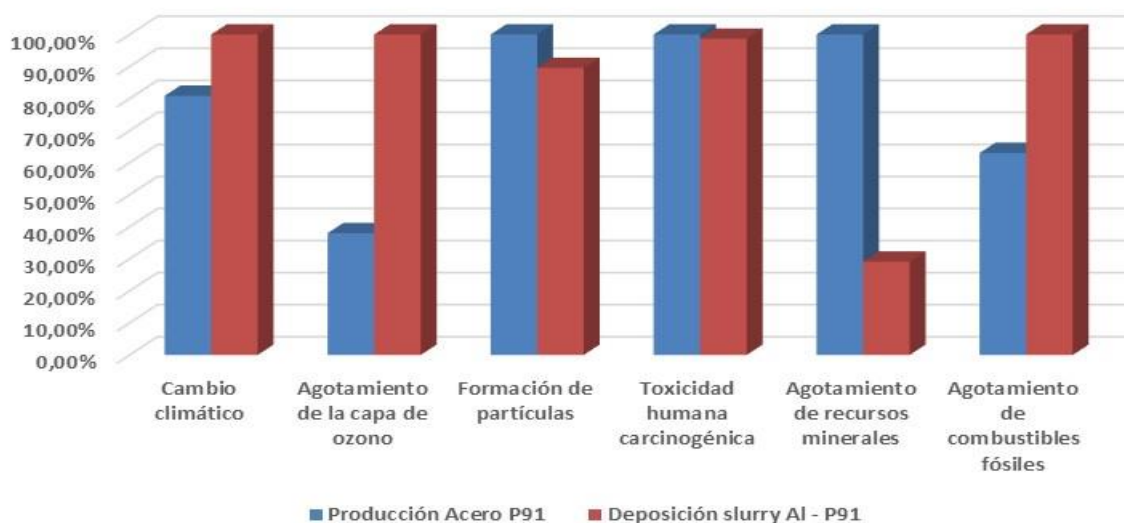


Figura 176: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 177 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana y ecosistemas, mientras que el sustrato lo haría en recursos. Esta gráfica confirma lo observado en la caracterización en comparación con el recubrimiento Ni50Cr: menor afectación del Slurry Al en el área de salud humana y mayor en las áreas de ecosistemas y recursos.

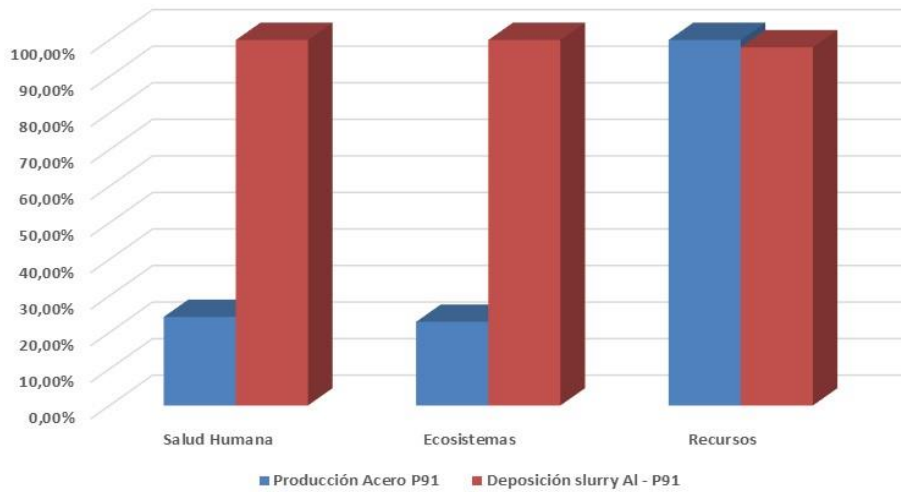


Figura 177: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Cuando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 178), se aprecia una leve diferencia en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en cambio climático. Por el contrario, el sustrato presenta un impacto levemente superior frente al proceso de deposición en toxicidad humana carcinogénica.

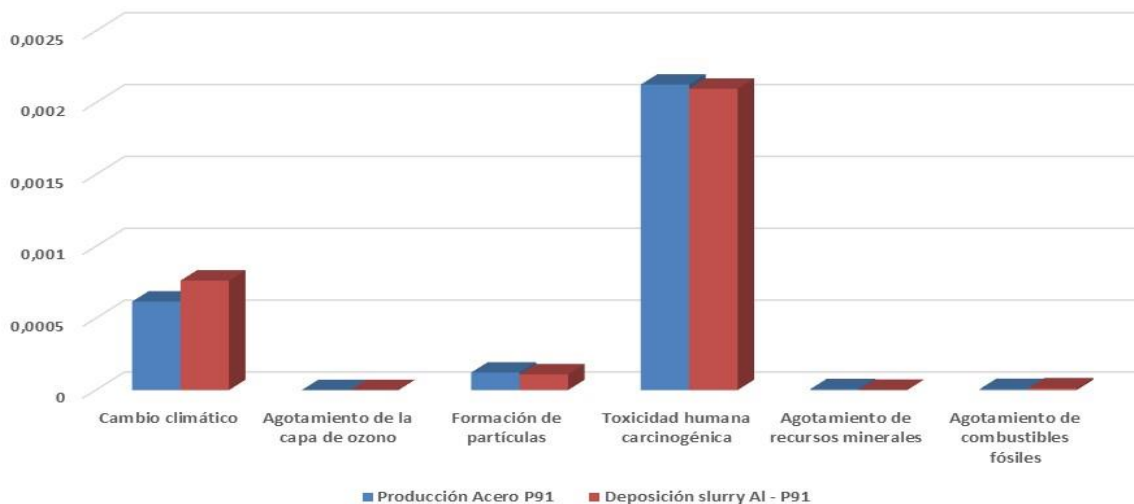


Figura 178: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 179) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato en salud humana (0,022 por 0,0055) y ecosistemas (0,0013 por 0,0003).

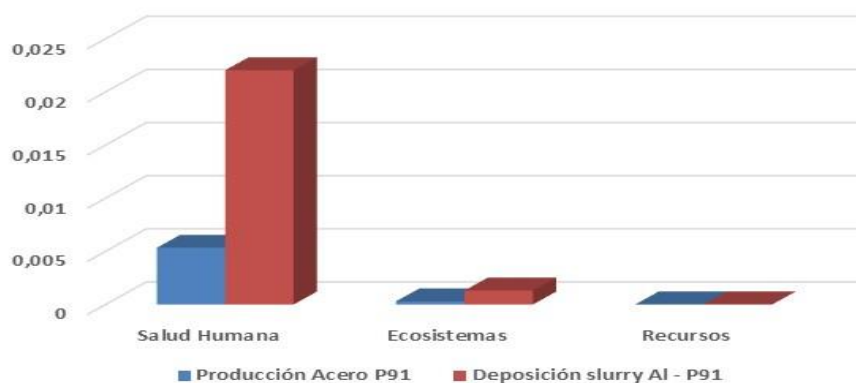


Figura 179: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Normalización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 38), salud humana (tabla 39) y puntuación única (tabla 40), respectivamente. Los resultados muestran de forma genérica un mayor impacto del proceso de deposición y recubrimiento en cambio climático. Los datos correspondientes a salud humana y a puntuación única son más variados, observándose mayor impacto del proceso de deposición para sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, la afectación del proceso de deposición de Slurry Al parece generar impactos levemente superiores en algunas sustancias al Ni50Cr en emisión atmosférica para el mismo sustrato P91.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Deposición Slurry Al - P91
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,4943E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	2,7387E-07
Etano, HFC-116	DALY	1,8925E-09	1,147E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	8,6979E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	6,779E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	3,8157E-07

Tabla 38: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Deposición Slurry Al - P91
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,4943E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	2,4326E-06
Óxidos de nitrógeno	DALY	8,6726E-07	1,2524E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,1026E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	5,3323E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	2,8589E-05

Tabla 39: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P91	Deposición Slurry Al - P91
CO ₂	Pt	0,24608309	0,2952341
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,00820019
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,00638291
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01042466
SO ₂	Pt	0,01100986	0,02159966
Zinc	Pt	0,12409694	0,10506099

Tabla 40: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

Por otro lado, la conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a la categoría de impacto relativa a cambio climático y lógicamente en el área de daño de ecosistemas, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados, lo cual indica un comportamiento ambiental similar en dichos casos. A la hora de analizar el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno y N₂O, y del sustrato para el resto. Comparando el proceso de deposición de Slurry Al en el ferrítico P91 con el proceso de deposición de Ni50Cr en el mismo ferrítico, se observa el mayor impacto del segundo en lo relativo a la categoría de toxicidad humana carcinogénica y al área de salud humana.

5.2.6.2.3- Acero ferrítico P92 / proceso recubrimiento CrN/NbN

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P92 frente al recubrimiento de CrN/NbN y su proceso de deposición mediante HIPIMS puede observarse en la figura 180 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el proceso de deposición y recubrimiento presentaría un mayor impacto en todas las categorías de impacto analizadas, con bastante diferencia. La categoría de impacto de agotamiento de recursos minerales sería la que presentaría una diferencia menor pero aun así sustancial. En comparación con las otras comparativas de sustrato vs proceso de deposición del recubrimiento, éste sería el único caso en el que en todos los datos analizados el proceso de deposición y el recubrimiento presentaría un peor comportamiento ambiental que el sustrato desnudo.

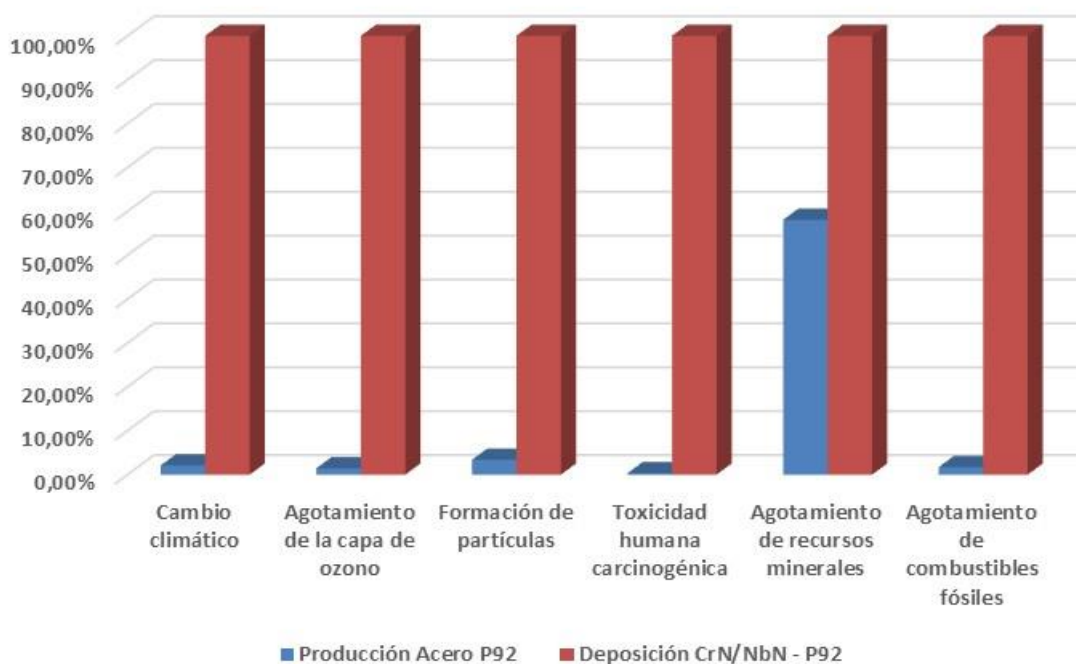


Figura 180: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 181 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida en las tres áreas finales de daño: salud humana, ecosistemas y recursos. La diferencia con el sustrato sería amplia, aunque levemente inferior en recursos y ecosistemas.

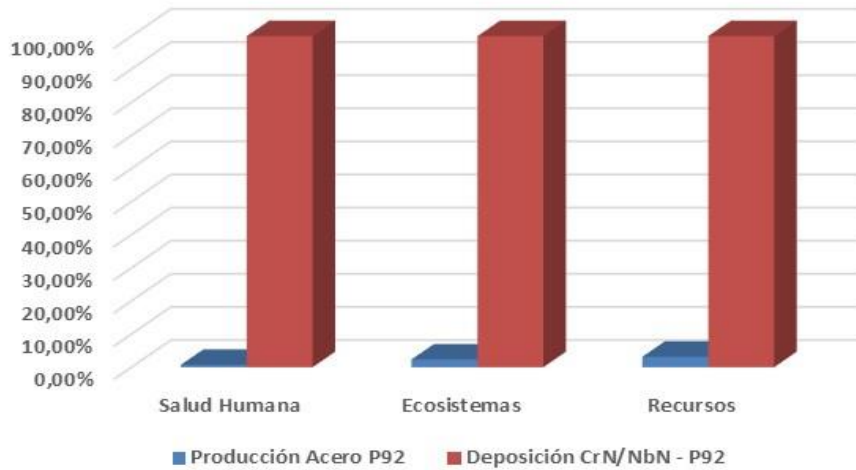


Figura 181: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Cuando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 182), la diferencia es sustancial en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en la toxicidad humana carcinogénica (0,63 frente a 0,002), toxicidad humana no carcinogénica (0,09 frente a 0,004) y cambio climático (0,04 frente a prácticamente 0). En el resto de las categorías los valores no son reseñables, si bien en todos los casos los mayores impactos corresponderían al proceso de deposición y recubrimientos CrN/NbN.

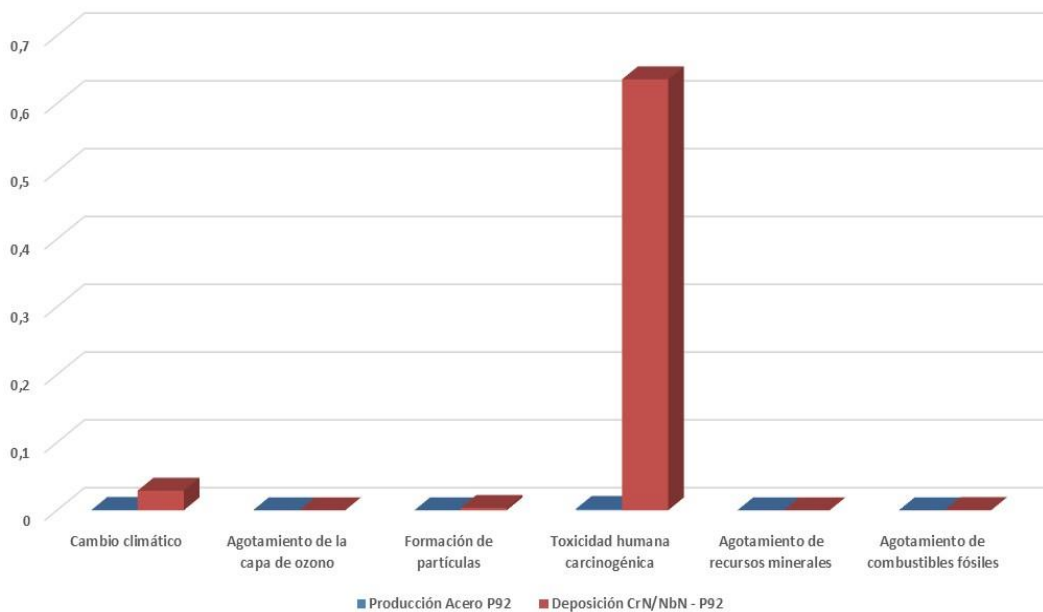


Figura 182: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Normalización por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 183) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición y el recubrimiento frente al sustrato todas las áreas, especialmente en salud humana (valor de 0,74, gran relevancia).

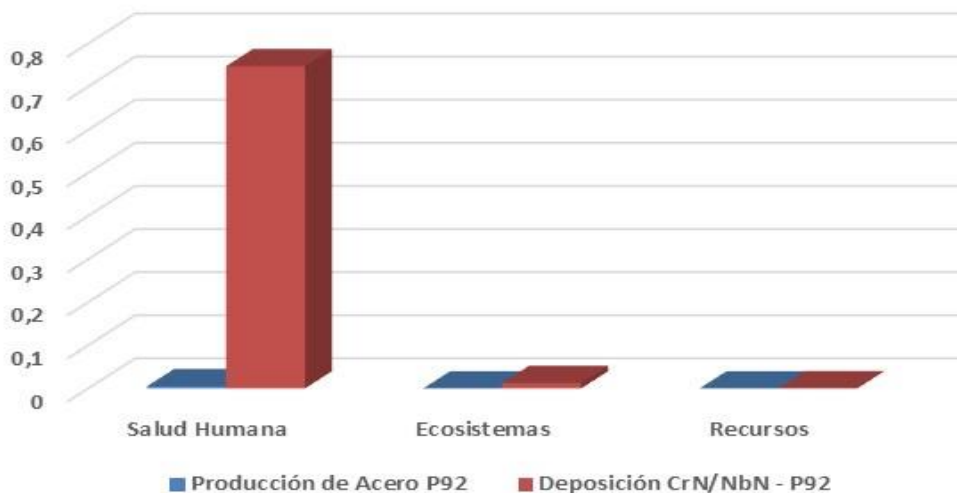


Figura 183: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Normalización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 41), salud humana (tabla 42) y puntuación única (tabla 43), respectivamente. Los resultados muestran de forma global y clara un mayor impacto del proceso de deposición y recubrimiento en todos los casos, en particular para el CO₂.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición CrN/NbN - P92
CO ₂	DALY	5,4131E-05	0,00249056
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	7,0143E-06
Metano	DALY	6,9706E-07	3,5302E-05
CFC-14	DALY	1,7129E-08	2,1763E-05
SF ₆	DALY	4,3865E-08	1,8594E-05

Tabla 41: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición CrN/NbN - P92
CO ₂	DALY	5,4131E-05	0,00249056
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	0,00029806
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	0,00015436
SO ₂	DALY	2,718E-06	0,00012866
Zinc	DALY	3,377E-05	8,159E-05

Tabla 42: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición CrN/NbN - P92
CO ₂	Pt	0,24608309	11,3221659
Cromo VI	Pt	0,17536752	1,00472185
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,1973935
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,51863369
SO ₂	Pt	0,01100986	0,52118654
Zinc	Pt	0,12409694	0,29985949

Tabla 43: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación medioambiental en todas las categorías de impacto y áreas finales de daño, destacando especialmente la afectación producida en la categoría de toxicidad humana carcinogénica y el área de salud humana. Asimismo, centrándonos específicamente en el compartimento asociado a emisión atmosférica, es de reseñar el gran impacto en generación de CO₂ que provoca el proceso de deposición y el recubrimiento, con lo que en cualquier sistema que participe el recubrimiento de CrN/NbN por HiPIMS, se generarán unas altas emisiones de CO₂, se obtendrá un alto valor de huella de carbono y se perjudicará el comportamiento ambiental del sistema.

5.2.6.2.4- Acero ferrítico P92 / proceso recubrimiento NiCr

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P92 frente al recubrimiento de Ni50Cr y su proceso de deposición mediante HVOF puede observarse en la figura 184 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas, toxicidad humana no carcinogénica y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana carcinogénica y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de cambio climático el impacto es prácticamente el mismo. Los resultados son similares al ACV comparativo entre P91 y deposición Ni50Cr, obteniéndose valores muy parejos en todos los casos.

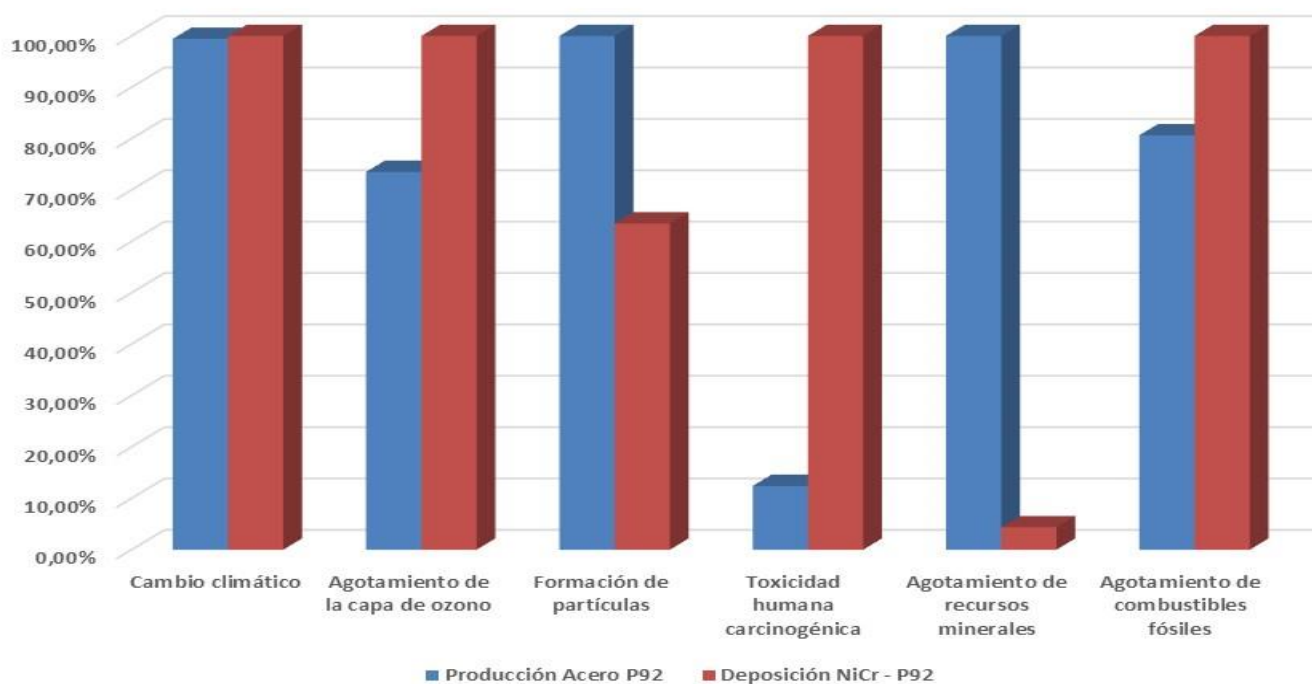


Figura 184: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Caracterización.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 185 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana, mientras que el sustrato lo haría en recursos y ecosistemas. Resultados similares al ACV comparativo entre P91 y deposición Ni50Cr. Como en la gráfica anterior, se observan variaciones del orden de decimales constatando el menor impacto del P92 en comparación al P91 frente al proceso de deposición y recubrimiento Ni50Cr en ambos sustratos, así como el mayor valor de la deposición Ni50Cr en P92 que en P91.

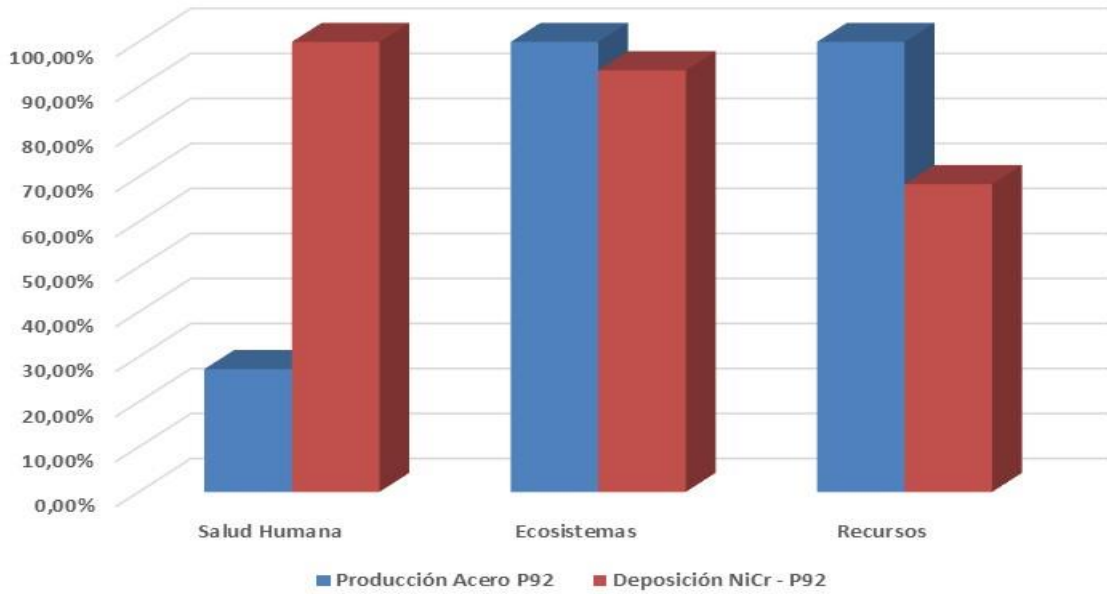


Figura 185: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Evaluación del daño. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Cuando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 186), la diferencia es sustancial en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en la toxicidad humana carcinogénica (0,017 por 0,002). Por el contrario, el sustrato presenta un impacto levemente superior frente al proceso de deposición en cambio climático y formación de partículas. Los resultados son similares al ACV comparativo entre P91 y deposición Ni50Cr, con valores casi idénticos.

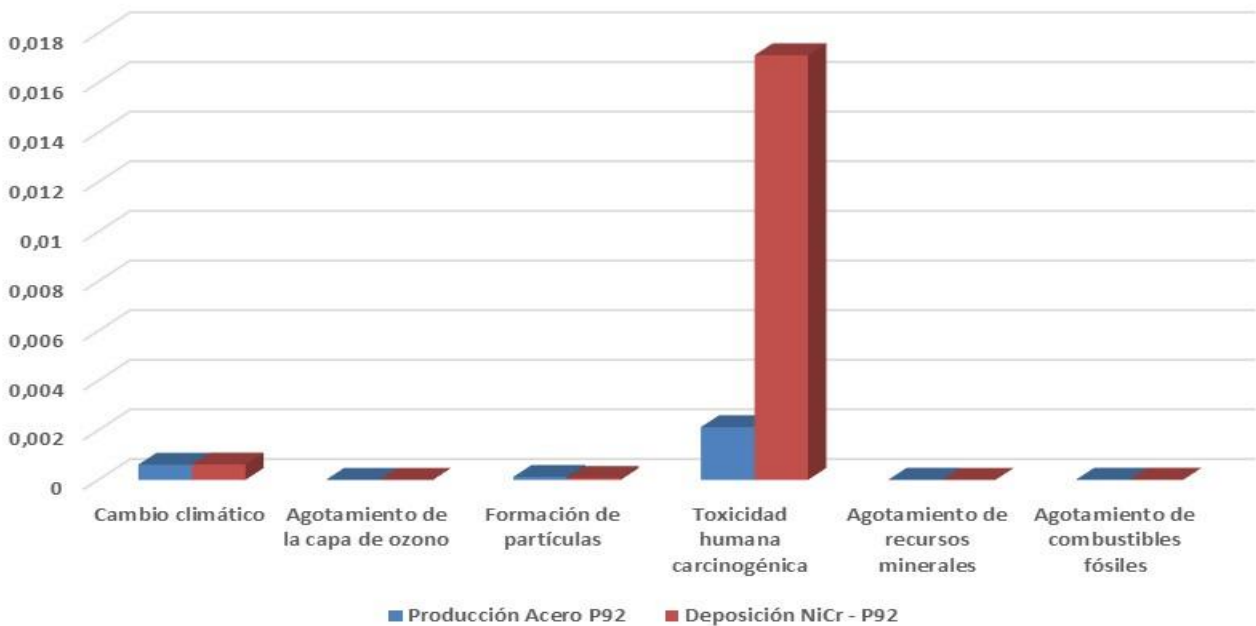


Figura 186: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Normalización por categoría de impacto. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 187) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato (0,0195 por 0,005) en salud humana, mientras que los resultados son muy parejos y de órdenes inferiores para las áreas de ecosistemas y recursos.

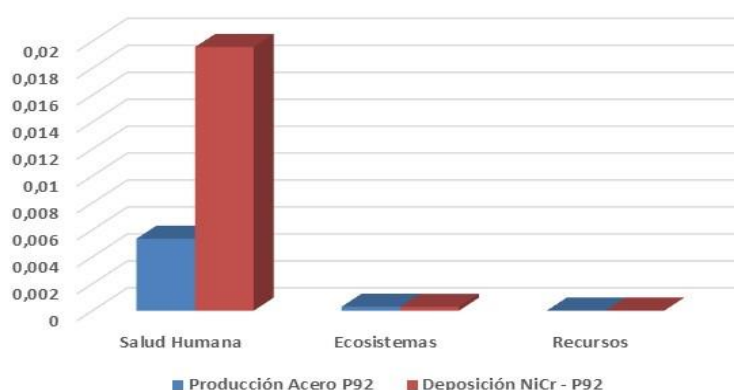


Figura 187: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Normalización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 44), salud humana (tabla 45) y puntuación única (tabla 46), respectivamente. Los resultados en este sentido son bastante parejos en todos los casos. Véase una leve afectación más elevada en DALY del proceso de deposición para sustancias como metano o N₂O, mientras que el sustrato presenta mayores valores en el resto de las sustancias.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición NiCr - P92
CO ₂	DALY	5,4131E-05	5,3281E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	1,4128E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	8,1646E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	5,8888E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	3,142E-07

Tabla 44: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición NiCr - P92
CO ₂	DALY	5,4131E-05	5,3281E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	8,0222E-06
Metano	DALY	6,9706E-07	8,1646E-07
Óxidos de nitrógeno	DALY	8,6726E-07	7,5318E-07
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,6355E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	2,5389E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	1,8746E-06

Tabla 45: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición NiCr - P92
CO ₂	Pt	0,24608309	0,24221909
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,02704228
Metano	Pt	0,00316616	0,00370847
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,00383855
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01221537
SO ₂	Pt	0,01100986	0,01028464
Zinc	Pt	0,12409694	0,00688941

Tabla 46: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a las categorías de impacto relativas a la salud humana y lógicamente en esta área de daño, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados, lo cual indica un comportamiento ambiental similar en dichos casos. A la hora de analizar el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como metano y N₂O, y del sustrato para el resto. Los resultados son bastante similares a los del ACV comparativo P91 vs deposición Ni50Cr. Existen variaciones del orden de decimales en los valores en DALY y Pt correspondientes a los procesos de deposición del Ni50Cr en el P91 y en el P92, ligeramente superior en el caso de la deposición de Ni50Cr en P92.

5.2.6.2.5- Acero ferrítico P92 / proceso recubrimiento Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico P92 frente al recubrimiento de Slurry Al y su proceso de deposición mediante pintado y tratamiento térmico puede observarse en la figura 188 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana no carcinogénica y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de toxicidad humana carcinogénica el impacto es prácticamente el mismo, ligeramente superior el del sustrato. Resultados similares al ACV comparativo entre P91 y deposición Slurry Al.

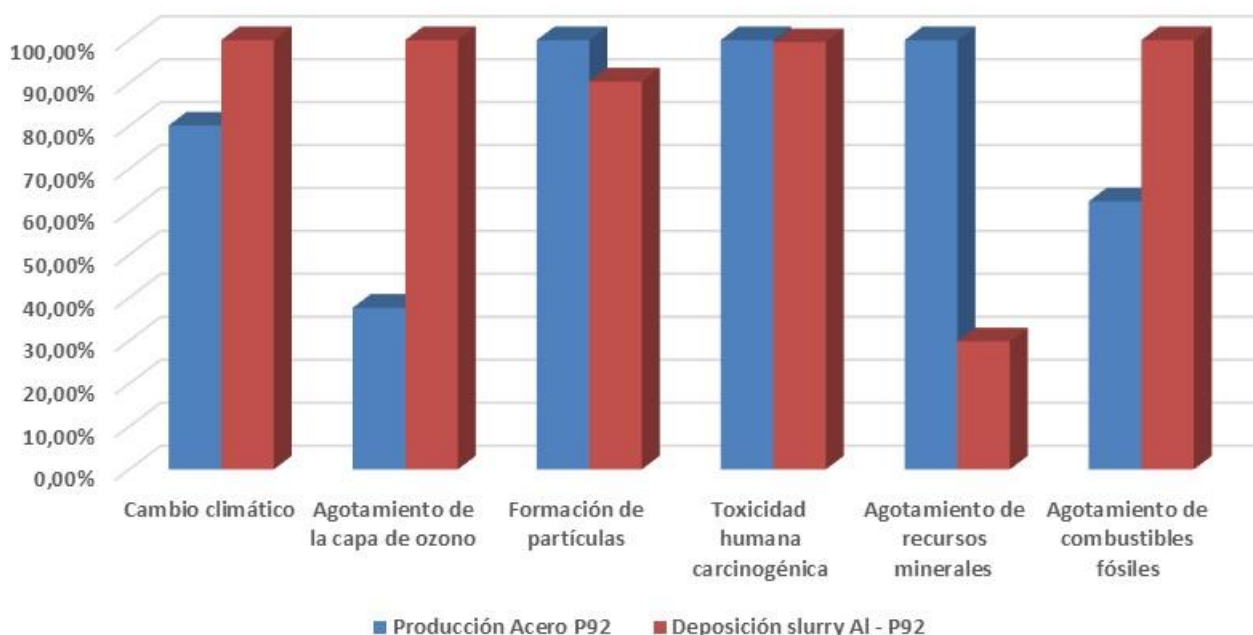


Figura 188: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Caracterización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 189 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana y ecosistemas, mientras que el sustrato lo haría en recursos. Estos resultados también se ajustan a la tendencia del ACV comparativo entre P91 y el proceso de deposición y recubrimiento de Slurry Al.

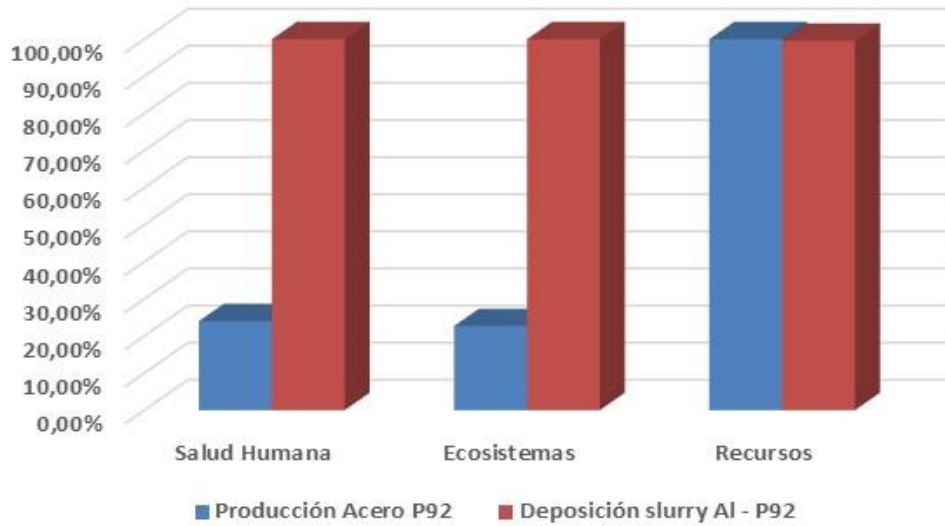


Figura 189: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry AI. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Quando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 190), se observa una leve diferencia en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en cambio climático. Por el contrario, el sustrato presenta un impacto levemente superior frente al proceso de deposición en toxicidad humana carcinogénica. El resto de los valores son bastante parejos.

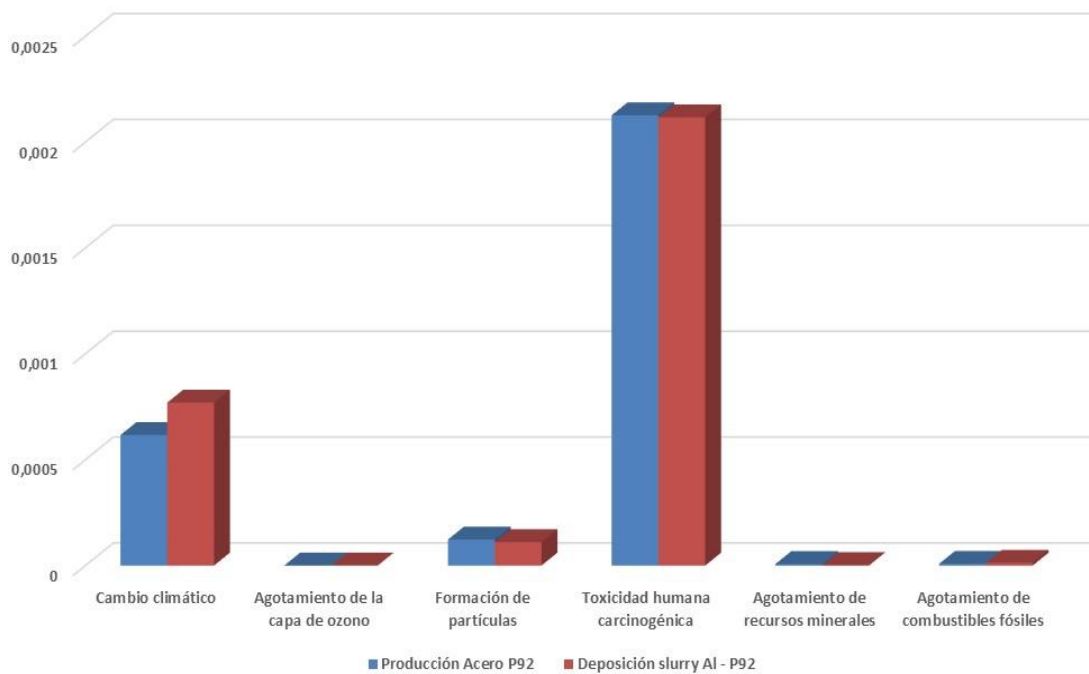


Figura 190: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry AI. Normalización por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 191) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato en salud humana (0,022 por 0,0053) y ecosistemas (0,0013 por 0,0003).

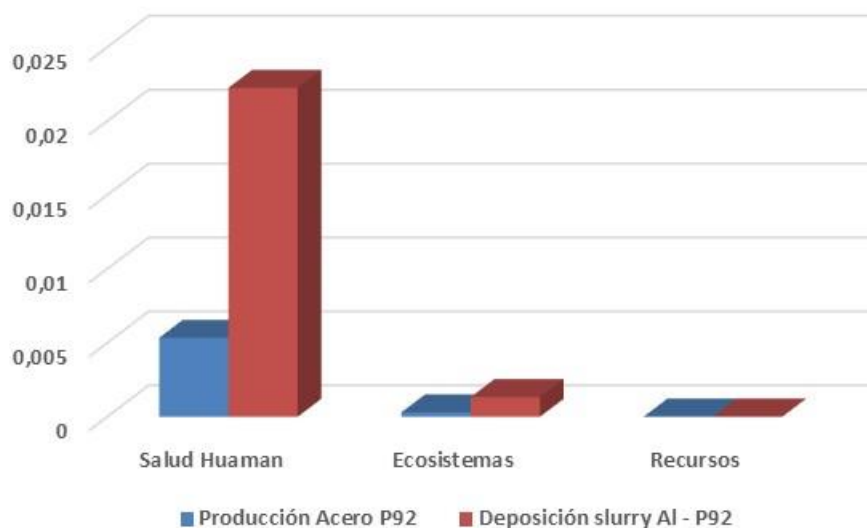


Figura 191: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Normalización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 47), salud humana (tabla 48) y puntuación única (tabla 49), respectivamente. Los resultados muestran de forma genérica un mayor impacto del proceso de deposición y recubrimiento en el cambio climático. Los datos correspondientes a salud humana y a puntuación única son más variados, observándose mayor impacto del proceso de deposición para sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, la afectación del proceso de deposición de Slurry Al parece generar impactos levemente superiores en algunas sustancias al Ni50Cr en emisión atmosférica para el mismo sustrato P92.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición Slurry Al - P92
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,5539E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	7,9009E-07
Etano, HFC-116	DALY	1,8925E-09	2,7638E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	1,1575E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	8,7777E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	6,8412E-07

Tabla 47: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición Slurry Al - P92
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,55394E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	2,45496E-06
Óxidos de nitrógeno	DALY	8,6726E-07	1,26392E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,13106E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	5,38121E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	2,88516E-05

Tabla 48: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico P92	Deposición Slurry Al - P92
CO ₂	Pt	0,24608309	0,2979442
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,00827548
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,0064415
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01052037
SO ₂	Pt	0,01100986	0,02179792
Zinc	Pt	0,12409694	0,10602543

Tabla 49: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a la categoría de impacto relativas a cambio climático y lógicamente en el área de daño de ecosistemas, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados, lo cual indica un comportamiento ambiental similar en dichos casos. A la hora de analizar el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno y N₂O, y del sustrato para el resto. Comparando el proceso de deposición de Slurry Al en el ferrítico P92 con el proceso de deposición de Ni50Cr en el mismo ferrítico, se observa el mayor impacto del segundo en lo relativo a la categoría de toxicidad humana carcinogénica y al área de salud humana. Se comprueba que existe una situación análoga para el análisis del ACV comparativo P91 y P92 vs deposición recubrimiento Slurry Al, tomando como referencia con el análisis del ACV comparativo P91 y P92 vs deposición recubrimiento Ni50Cr: existen variaciones del orden de decimales en los valores en DALY y Pt correspondientes a los procesos de deposición del Slurry Al en el P91 y en el P92, ligeramente superior en el caso de la deposición de Slurry Al en P92. En lo que respecta a sustratos, los valores son ligeramente inferiores en el caso del P92 frente al P91.

5.2.6.2.6- Acero ferrítico VM12 / proceso recubrimiento Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato ferrítico VM12 frente al recubrimiento de Slurry Al y su proceso de deposición mediante pintado y tratamiento térmico puede observarse en la figura 192 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana no carcinogénica y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de toxicidad humana carcinogénica el impacto es prácticamente el mismo, ligeramente superior el del sustrato. Resultados similares al ACV comparativo entre los sustratos P91 y P92 con la deposición Slurry Al.

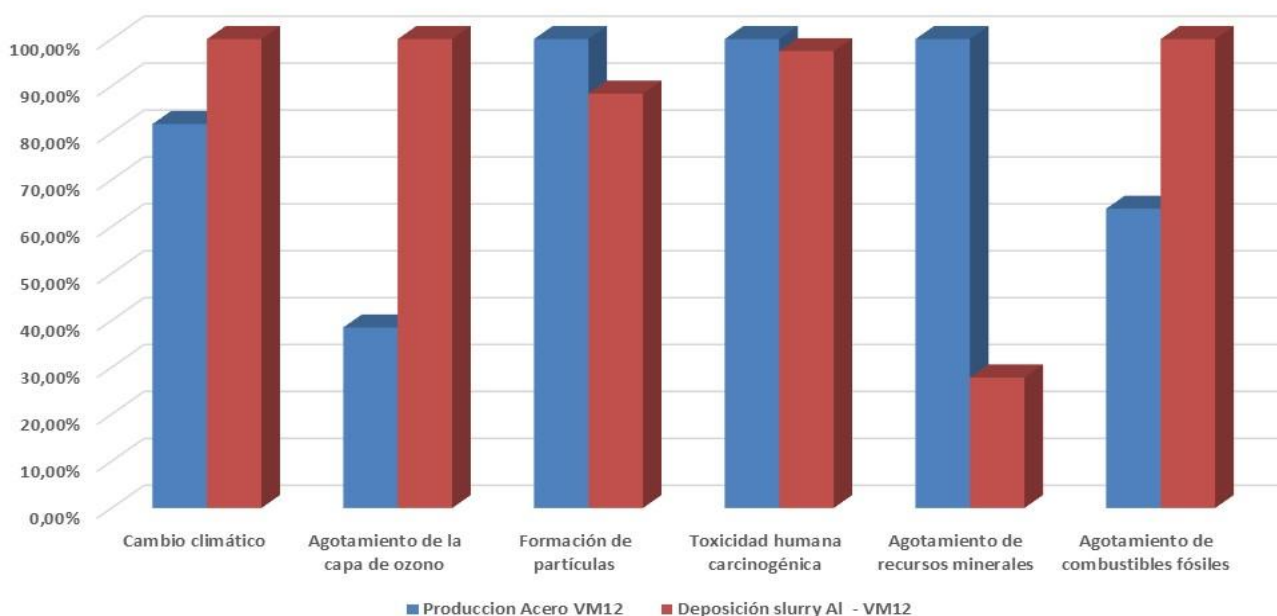


Figura 192: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Caracterización. Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 193 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana y ecosistemas, mientras que el sustrato lo haría en recursos. Estos resultados también se ajustan a la tendencia del ACV comparativo entre P91, P92 y el proceso de deposición y recubrimiento de Slurry Al. Se observan ligeras variaciones del orden de decimales en las que el menor impacto de deposiciones de Slurry de Al en comparación con el sustrato correspondería a la deposición en VM12, pero el impacto en este caso del sustrato sería el mayor de entre el resto de los sustratos. Este comportamiento también se observaría en la gráfica de caracterización.

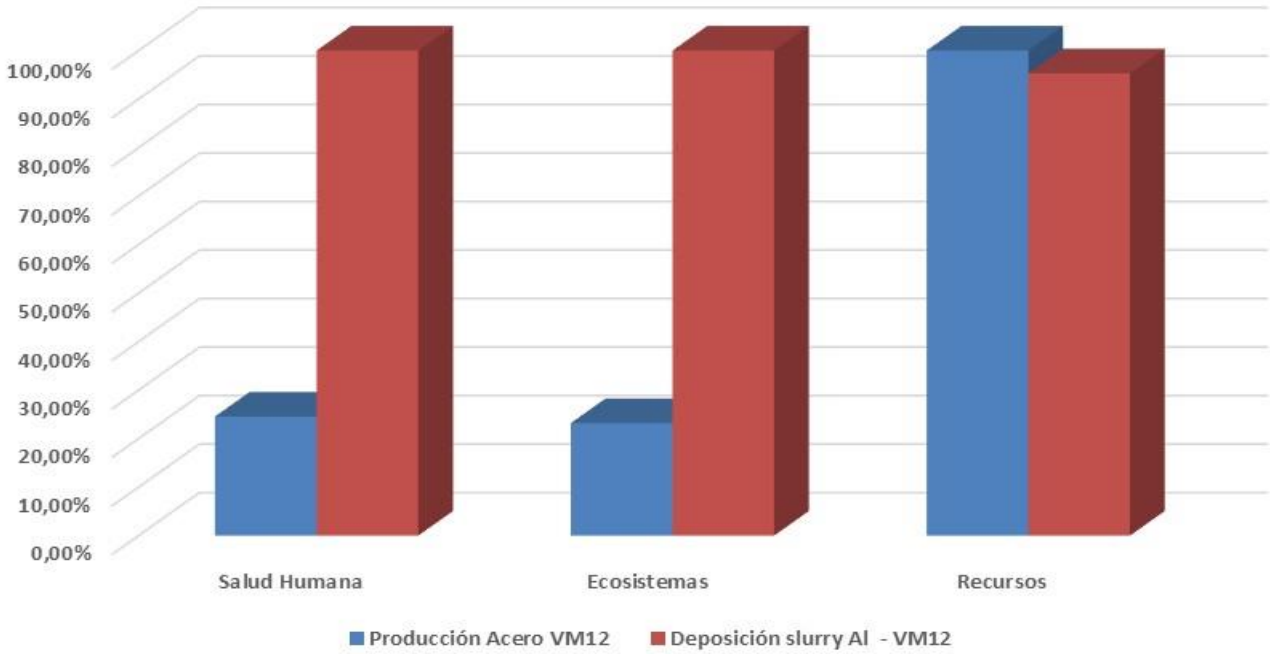


Figura 193: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Cuando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 194), la diferencia es sustancial en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en la toxicidad humana no carcinogénica (0,019 por 0,0025). Esta diferencia es menor en cambio climático. Por el contrario, el sustrato presenta un impacto levemente superior frente al proceso de deposición en toxicidad humana carcinogénica. El resto de los valores tienen mucho menor impacto y están bastante parejos.

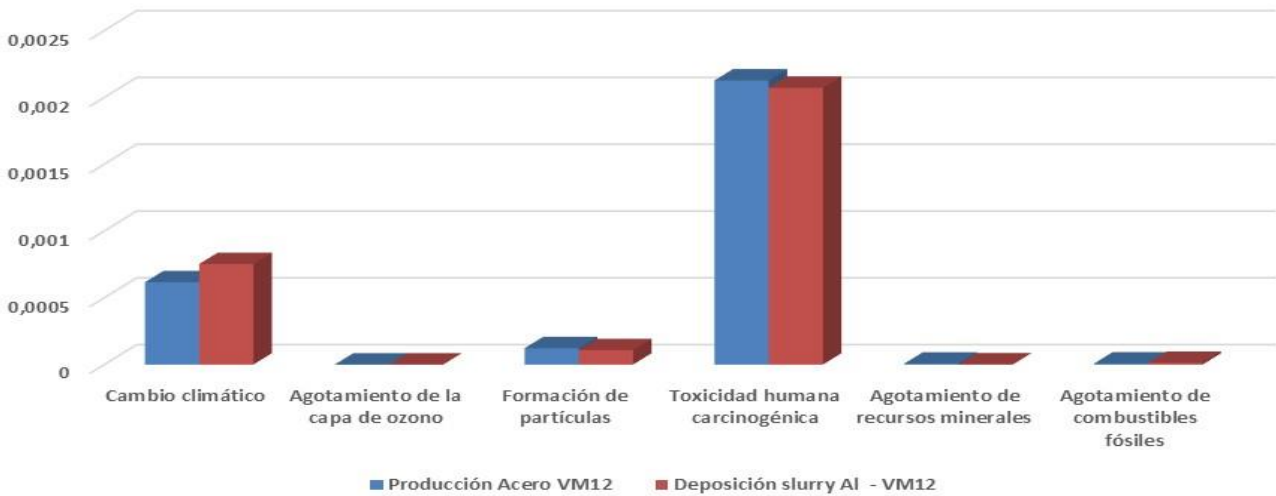


Figura 194: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 195) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato en salud humana (0,022 por 0,0053) y ecosistemas (0,0013 por 0,0003). El sustrato tiene un ligero mayor peso en el área de recursos, aunque los valores son poco significativos con respecto a las otras áreas.

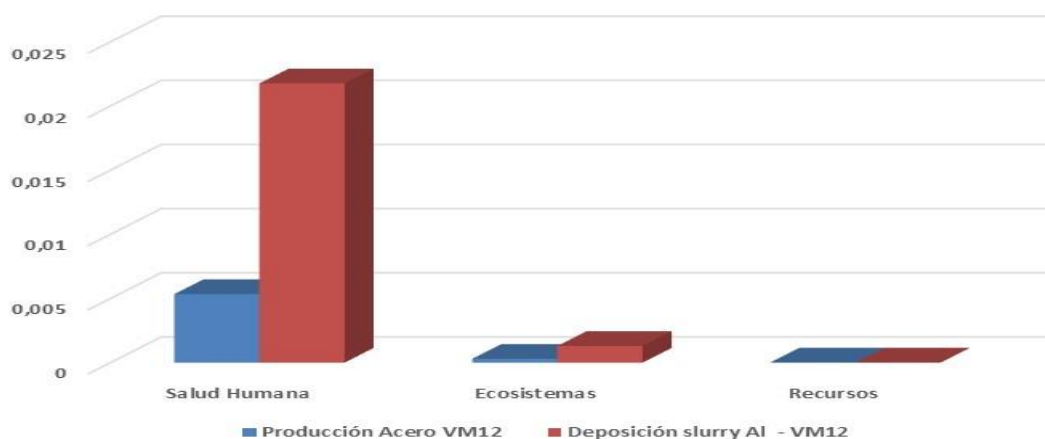


Figura 195: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Normalización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 50), salud humana (tabla 51) y puntuación única (tabla 52), respectivamente. Los resultados muestran de forma genérica un mayor impacto del proceso de deposición y recubrimiento en el cambio climático. Los datos correspondientes a salud humana y a puntuación única son más variados, observándose mayor impacto del proceso de deposición para sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, la afectación del proceso de deposición de Slurry Al parece generar impactos levemente superiores en algunas sustancias al Ni50Cr en emisión atmosférica. Resultados similares al ACV comparativo entre los sustratos P91 y P92 con la deposición Slurry Al.

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico VM12	Deposición Slurry Al – VM12
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,411E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	2,7036E-07
Etano, HFC-116	DALY	1,8925E-09	1,1323E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	8,5863E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	6,692E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	3,7668E-07

Tabla 50: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico VM12	Deposición Slurry Al – VM12
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,411E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	2,4014E-06
Óxidos de nitrógeno	DALY	8,6726E-07	1,2364E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,0628E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	5,2639E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	2,8223E-05

Tabla 51: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero ferrítico VM12	Deposición Slurry Al – VM12
CO ₂	Pt	0,24608309	0,29144837
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,00809501
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,00630105
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01029097
SO ₂	Pt	0,01100986	0,02132271
Zinc	Pt	0,12409694	0,10371376

Tabla 52: Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a la categoría de impacto relativas a cambio climático y lógicamente en el área de daño de ecosistemas, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados, lo cual indica un comportamiento ambiental similar en dichos casos. A la hora de analizar el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno y N₂O, y del sustrato para el resto. En lo que respecta a la intercomparación entre los distintos ACV comparativos de sustratos ferríticos vs procesos de deposición del recubrimiento de Slurry Al, el menor impacto de todas las deposiciones en aceros ferríticos correspondería a la deposición en VM12, a la vez que dicho sustrato ferrítico correspondería al de mayor impacto de entre los sustratos ferríticos desnudos.

5.2.6.2.7- Acero austenítico AISI 347H/proceso recubrimiento Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato austenítico AISI 347H frente al recubrimiento de Slurry Al y su proceso de deposición mediante pintado y tratamiento térmico puede observarse en la figura 196 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana no carcinogénica y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de toxicidad humana carcinogénica el impacto es prácticamente el mismo, ligeramente superior el del proceso de deposición. Son resultados similares a los del resto de ACV comparativos entre sustratos ferríticos frente a deposición del recubrimiento de Slurry Al, si bien se incrementa el peso del proceso de deposición en toxicidad humana carcinogénica.

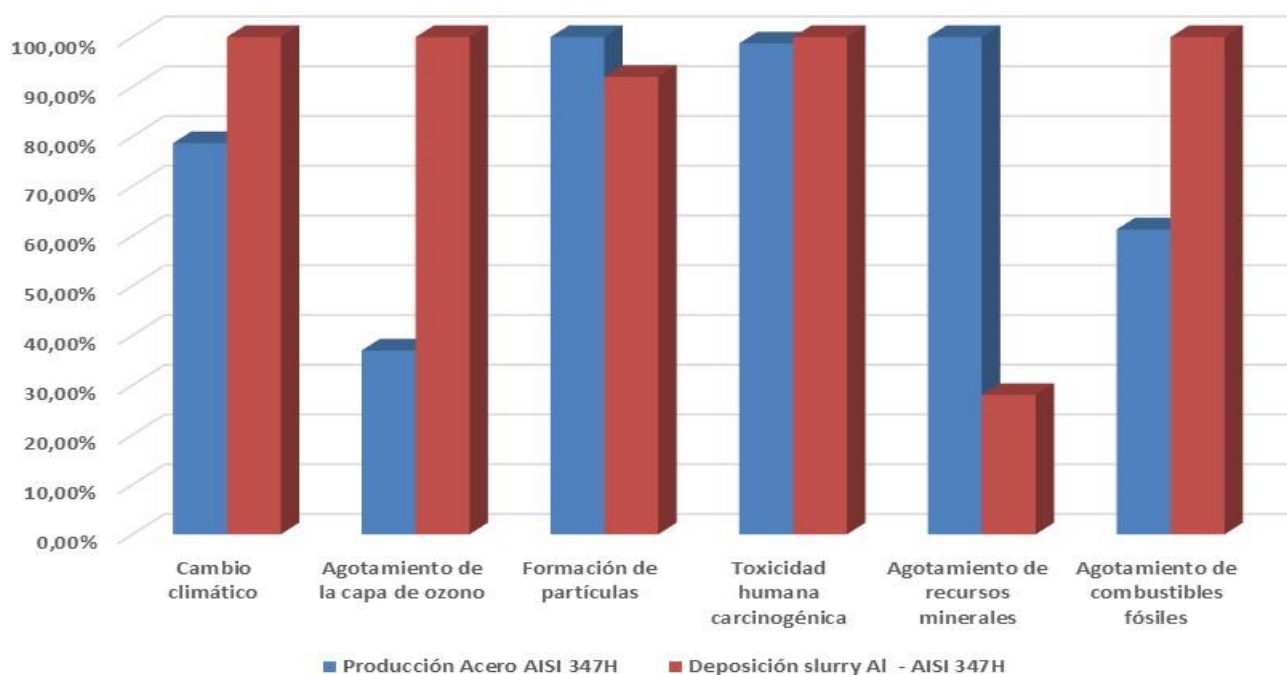


Figura 196: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 197 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana y ecosistemas, mientras que el sustrato lo haría en recursos. Estos resultados también se ajustan a la tendencia del ACV comparativo entre los aceros ferríticos y el proceso de deposición y recubrimiento de Slurry Al.

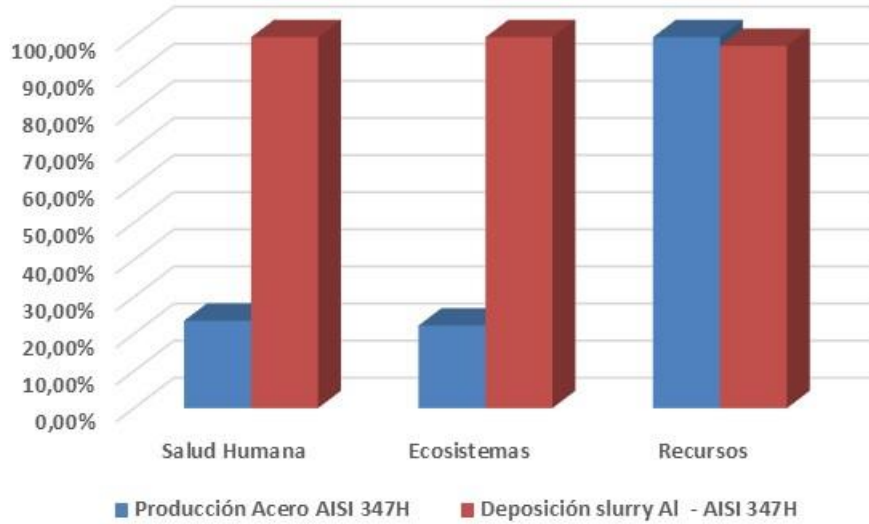


Figura 197: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Cuando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 198), la diferencia es sustancial en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en la toxicidad humana no carcinogénica (0,019 por 0,0025). Esta diferencia es menor en cambio climático. También presenta un impacto levemente superior en toxicidad humana carcinogénica, cosa que no ocurriría con los sustratos ferríticos.

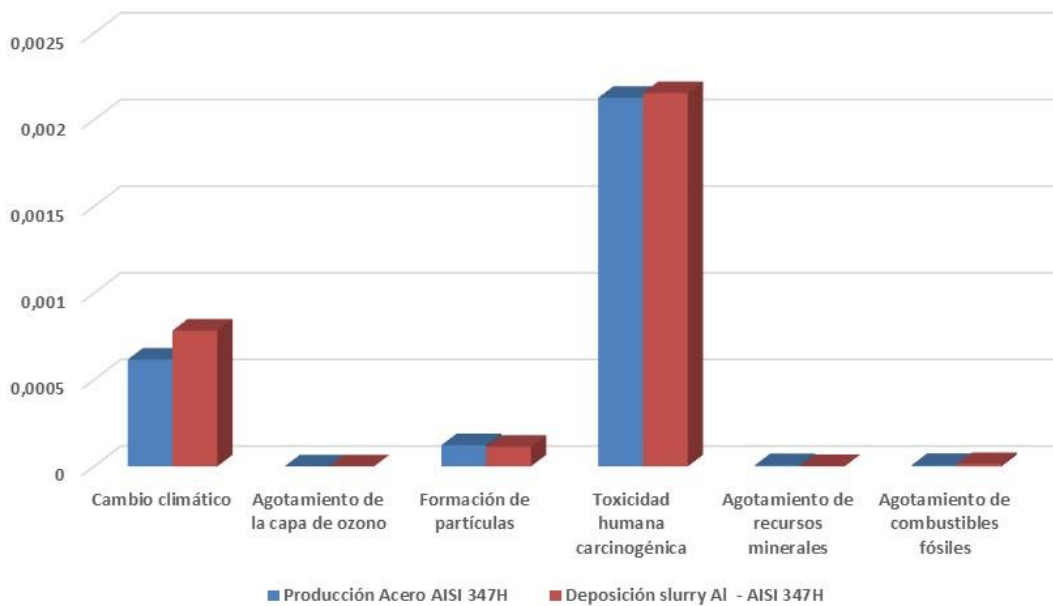


Figura 198: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 199) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato en salud humana (0,0226 por 0,0055) y ecosistemas (0,0013 por 0,0003). El sustrato tiene un ligero mayor peso en el área de recursos, aunque los valores son poco significativos con respecto a las otras áreas.

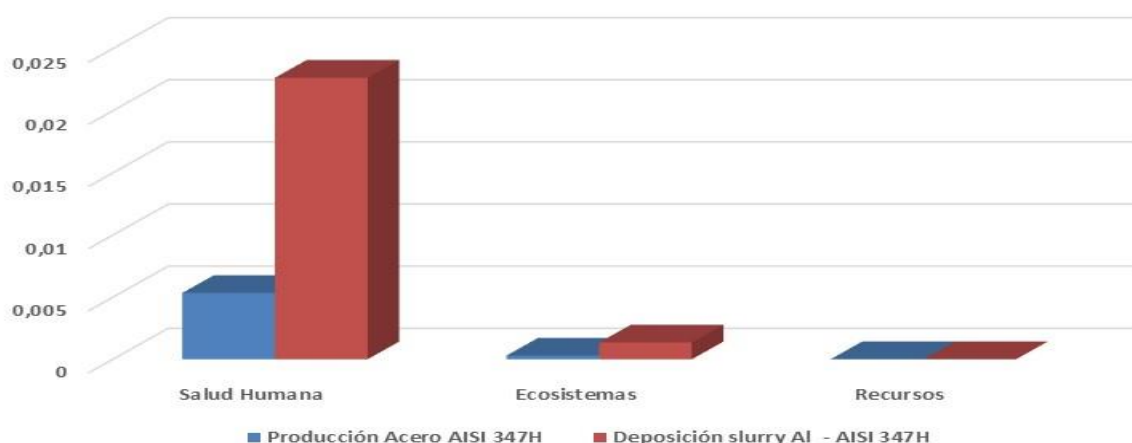


Figura 199: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Normalización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 53), salud humana (tabla 54) y puntuación única (tabla 55), respectivamente. Los resultados muestran de forma genérica un mayor impacto del proceso de deposición y recubrimiento en el cambio climático. Los datos correspondientes a salud humana y a puntuación única son más variados, observándose mayor impacto del proceso de deposición para sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, la afectación del proceso de deposición de Slurry Al parece generar impactos levemente superiores en algunas sustancias al Ni50Cr en emisión atmosférica. Resultados similares al ACV comparativo entre los sustratos ferríticos con la deposición Slurry Al.

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 347H	Deposición Slurry Al – AISI 347H
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,6747E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	2,8148E-07
Etano, HFC-116	DALY	1,8925E-09	1,1788E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	8,9395E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	6,9673E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	3,9218E-07

Tabla 53: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 347H	Deposición Slurry Al – AISI 347H
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,67473E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	2,50022E-06
Óxidos de nitrógeno	DALY	8,6726E-07	1,28721E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,18878E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	5,48038E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	2,93834E-05

Tabla 54: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 347H	Deposición Slurry Al – AISI 347H
CO ₂	Pt	0,24608309	0,30343543
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,00842804
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,00656023
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01071429
SO ₂	Pt	0,01100986	0,02219964
Zinc	Pt	0,12409694	0,1079796

Tabla 55: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en esta comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a la categoría de impacto relativas a cambio climático y lógicamente en el área de daño de ecosistemas, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados, lo cual indica un comportamiento ambiental similar en dichos casos. A la hora de analizar el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno y N₂O, y del sustrato para el resto. Conclusiones similares a las obtenidas en los ACV comparativos de los sustratos ferríticos frente al proceso de deposición del recubrimiento de Slurry Al. En lo que respecta a la intercomparación con los distintos ACV comparativos de sustratos ferríticos vs procesos de deposición del recubrimiento de Slurry Al, el ACV comparativo entre el sustrato austenítico AISI 347 y el proceso de deposición del recubrimiento de Slurry Al presentaría los mayores valores en los datos de normalización por categoría de impacto y normalización por área final de daño de todos los procesos de deposición estudiados. Asimismo, los datos de normalización correspondientes al sustrato presentarían los mismos valores en todos los casos, salvo para la categoría de agotamiento de recursos minerales y el área de ecosistemas, con los mayores impactos para el AISI 347H.

5.2.6.2.8- Acero austenítico AISI 321 / proceso recubrimiento Slurry Al

Para el ACV comparativo del sustrato austenítico AISI 321 frente al recubrimiento de Slurry Al y su proceso de deposición mediante pintado y tratamiento térmico puede observarse en la figura 200 el gráfico de caracterización. En dicho gráfico se refleja que el sustrato presentaría mayor impacto en las categorías de impacto de formación de partículas y agotamiento de recursos minerales; por otro lado, el proceso de deposición y recubrimiento reflejaría un mayor impacto en las categorías de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, toxicidad humana no carcinogénica y agotamiento de combustibles fósiles. En la categoría de toxicidad humana carcinogénica el impacto es prácticamente el mismo. Resultados similares a los del resto de ACV comparativos de sustratos frente a procesos de deposición del recubrimiento de Slurry de Al. El peso del proceso de deposición del recubrimiento en la categoría de toxicidad humana carcinogénica disminuiría en relación con el ACV comparativo AISI 347H-deposición Slurry Al.

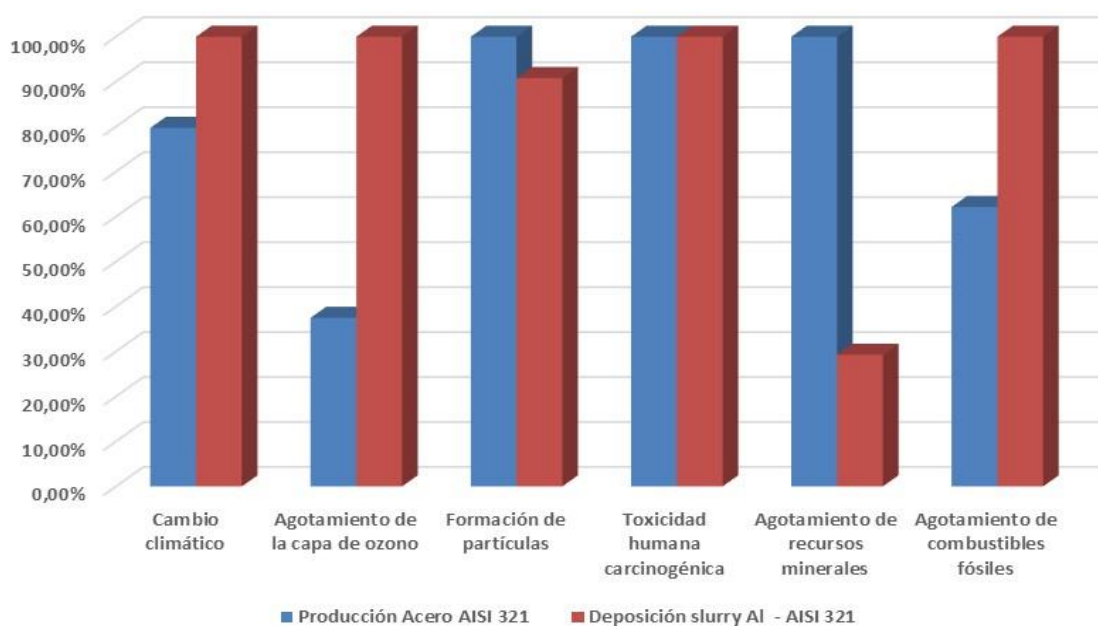


Figura 200: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Caracterización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Calculando la evaluación del daño en áreas finales, se observa en la figura 201 que el proceso de deposición y el recubrimiento afectarían en mayor medida a la salud humana y ecosistemas, mientras que el sustrato lo haría en recursos, con poca diferencia. Estos resultados también se ajustan a la tendencia del ACV comparativo entre los aceros y el proceso de deposición y recubrimiento de Slurry Al.

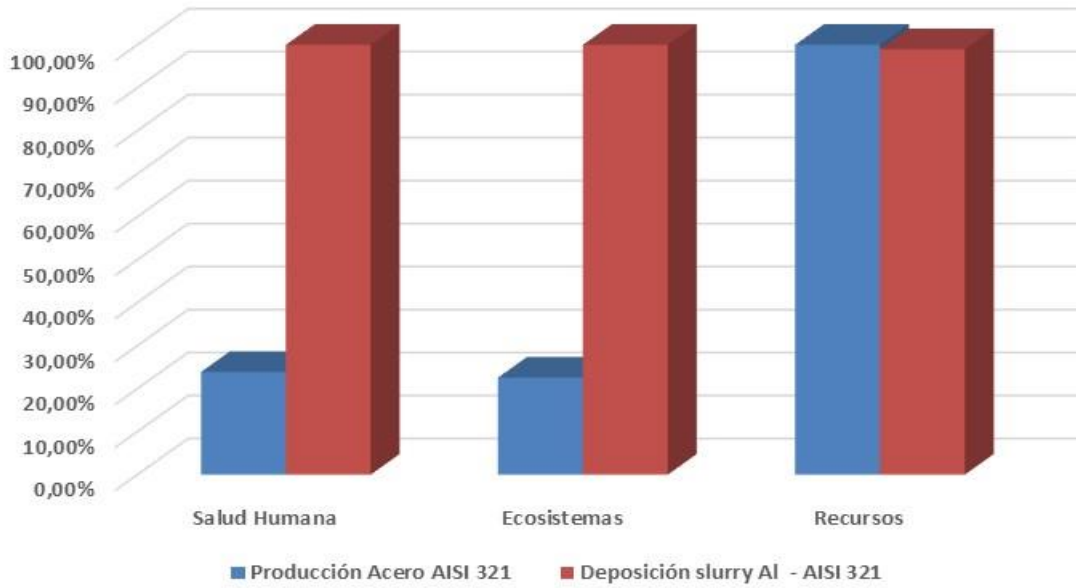


Figura 201: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Quando se procede a llevar a cabo la normalización por categoría de impacto (ver figura 202), la diferencia es sustancial en cuanto al mayor impacto del proceso de deposición frente al sustrato en la toxicidad humana no carcinogénica (0,019 por 0,0025). Esta diferencia es menor en cambio climático. El impacto en toxicidad humana carcinogénica es prácticamente idéntico, cosa que no sucedía con ninguno de los sustratos.

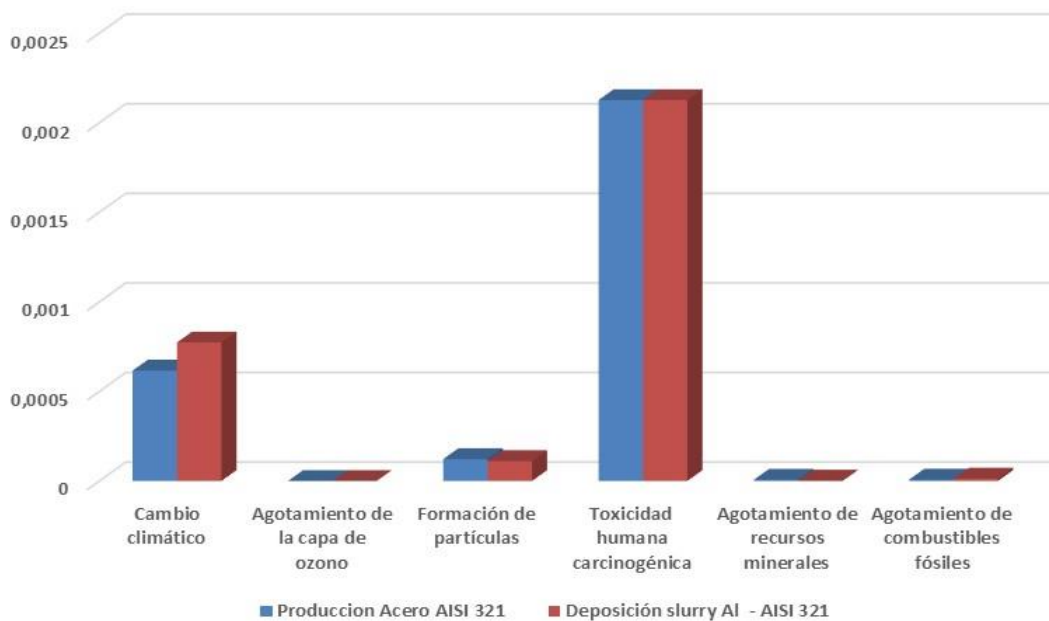


Figura 202: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Si se analiza el gráfico de normalización (figura 203) referido a áreas finales de daño, se observa el mayor peso del proceso de deposición frente al sustrato en salud humana (0,0223 por 0,0053) y ecosistemas (0,0013 por 0,0003). Los valores en el área de recursos son prácticamente iguales y de menor magnitud que en el resto de áreas.

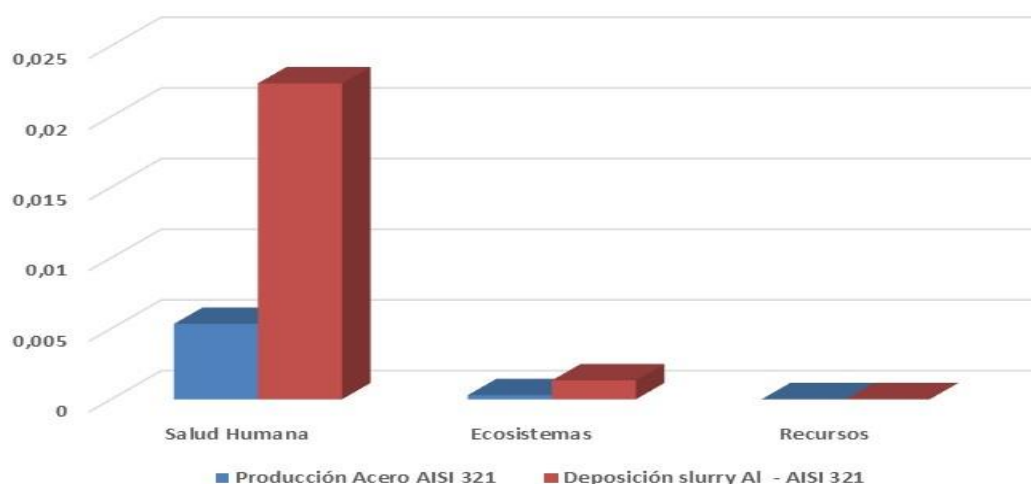


Figura 203: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Normalización.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Pasando a analizar en detalle el compartimento correspondiente a emisión atmosférica, pueden observarse los valores comparativos de inventario para evaluación del daño en cambio climático (tabla 56), salud humana (tabla 57) y puntuación única (tabla 58), respectivamente. Los resultados muestran de forma genérica un mayor impacto del proceso de deposición y recubrimiento en el cambio climático. Los datos correspondientes a salud humana y a puntuación única son más variados, observándose mayor impacto del proceso de deposición para sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno. Por lo tanto, la afectación del proceso de deposición de Slurry Al parece generar impactos levemente superiores en algunas sustancias al Ni50Cr en emisión atmosférica. Resultados similares al ACV comparativo entre los sustratos P91, P92, VM12 y AISI 347H con la deposición Slurry Al.

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 321	Deposición Slurry Al – AISI 321
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,58589E-05
N ₂ O	DALY	1,0051E-07	2,7773E-07
Etano, HFC-116	DALY	1,8925E-09	1,1631E-07
Metano	DALY	6,9706E-07	8,8205E-07
CFC-14	DALY	1,7129E-08	6,8746E-07
SF ₆	DALY	4,3865E-08	3,8695E-07

Tabla 56: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 321	Deposición Slurry Al – AISI 321
CO ₂	DALY	5,4131E-05	6,5859E-05
Cromo VI	DALY	5,2024E-05	2,4669E-06
Óxidos de nitrógeno	DALY	8,6726E-07	1,2701E-06
Partículas < 2,5 µm	DALY	7,3346E-06	3,1463E-06
SO ₂	DALY	2,718E-06	5,4074E-06
Zinc	DALY	3,377E-05	2,8992E-05

Tabla 57: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sustancia	Unidad	Acero austenítico AISI 321	Deposición Slurry Al – AISI 321
CO ₂	Pt	0,24608309	0,29939688
Cromo VI	Pt	0,17536752	0,00831584
Óxidos de nitrógeno	Pt	0,00441996	0,00647291
Partículas < 2,5 µm	Pt	0,02464409	0,01057167
SO ₂	Pt	0,01100986	0,02190419
Zinc	Pt	0,12409694	0,1065424

Tabla 58: Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.

Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

El valor de corte se ha fijado en el 0,08%, el cual se considera significativo y representativo del comportamiento de los sistemas a estudio.

La conclusión que se extrae de los datos analizados en la comparativa indica que el proceso de deposición tiene más peso a nivel de afectación a la categoría de impacto relativas a cambio climático y lógicamente en el área de daño de ecosistemas, mientras que en el resto de las categorías los valores están más alineados. Analizando el compartimento de emisión atmosférica, se mantiene un mismo orden de valores, destacando una ligera predominancia del proceso de deposición asociado a sustancias como CO₂, SO₂ y óxidos de nitrógeno y N₂O, y del sustrato para el resto. Conclusiones similares a las de los ACV comparativos del resto de sustratos frente al proceso de deposición del Slurry Al. Para la intercomparación con el ACV comparativo de AISI 347H-proceso de deposición del Slurry Al en AISI 347H, se observan menores valores en todos los datos de normalización por área de daño y por categoría de impacto en la deposición de Slurry Al en AISI 321 frente a la deposición de Slurry Al en AISI 347H. Los datos de normalización de los sustratos austeníticos desnudos son similares, con menor impacto del AISI 321 en la categoría de impacto de recursos minerales y en el área de recursos. Comparado con ferríticos, el impacto del proceso de deposición de Slurry Al en el AISI 321 es mayor que el del P91, P2 y VM12, pero el impacto del AISI 321 desnudo en la categoría de agotamiento de recursos minerales y en área de recursos es menor que en el de VM12, pero mayor que el de P91 y P92.

Como análisis global de resultados se verifica que es en este apartado donde se encuentra una mayor variabilidad de resultados entre los sistemas estudiados, debido a la comparación de ítems que no tienen elementos de la misma tipología. Sin embargo, puede establecerse una tendencia general al observarse resultados similares para el mismo proceso de recubrimiento (Ni50Cr o Slurry Al) en los distintos sustratos en los que se depositan. Lo que indica que los resultados de la comparativa P91-deposición Ni50Cr son asimilables a los resultados de la comparativa P92-deposición Ni50Cr, dándose la misma casuística para la comparativa P91-deposición Slurry Al con las comparativas P92-deposición Slurry Al, VM12-deposición Slurry Al, AISI 347H-deposición Slurry Al, AISI 321-deposición Slurry Al.

Por otro lado, en el caso de la comparativa P92-deposición CrN/NbN por HiPIMS, todos los valores de las categorías de impacto y áreas finales de daño, tanto en caracterización como en normalización, son superiores para el proceso de recubrimiento. Ocurre lo mismo para los valores de las distintas sustancias analizadas en la evaluación del daño. El estudio de la red de daño indica que el consumo eléctrico es determinante. Se confirma el gran impacto en generación de CO₂ que provoca el proceso de deposición y el recubrimiento, con lo que en cualquier sistema que participe el recubrimiento de CrN/NbN por HiPIMS se producirán unas altas emisiones de CO₂, se obtendrá un alto valor de huella de carbono y se perjudicará el comportamiento ambiental del sistema.

Se debe comentar que, a la vista de los resultados de la caracterización, se aprecia que el proceso de deposición y recubrimiento del Ni50Cr por HVOF presenta un mayor impacto que los sustratos (P91, P92) en las categorías de impacto de agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de combustibles fósiles y toxicidad humana carcinogénica. Los sustratos, por su parte, presentan mayor impacto en las categorías de formación de partículas, agotamiento de recursos minerales y toxicidad humana no carcinogénica. Asimismo, los datos normalizados indican que la influencia en salud humana es mayor por parte del proceso de deposición, estando los valores más ajustados para ecosistemas y recursos. En lo que respecta a cambio climático, los valores son similares para sustrato y para proceso de deposición.

Para el caso de los ACV comparativos con el proceso de deposición y recubrimiento de Slurry de Al por pintado y tratamiento térmico superficial, a la vista de los resultados de la caracterización, se aprecia que el proceso de deposición y recubrimiento presenta un mayor impacto que los sustratos (P91, P92, VM12, AISI 347H y AISI 321) en las categorías de impacto de cambio climático, agotamiento de la capa de ozono, agotamiento de combustibles fósiles y toxicidad humana no carcinogénica. Los sustratos, por su parte, presentan mayor impacto en las categorías de formación de partículas y agotamiento de recursos minerales. Asimismo, los datos normalizados indican que la influencia en salud humana y ecosistemas es mayor por parte del proceso de deposición, estando los valores más ajustados para recursos. En lo que respecta a cambio climático, los valores son similares para sustrato y para proceso de deposición.

Analizando los datos anteriores, se verifica el mayor impacto que la deposición y recubrimiento de Ni50Cr tiene en la categoría de toxicidad humana carcinogénica (influenciada por la producción de Cr), mientras que la deposición y recubrimiento de Slurry Al hace lo propio en la categoría de toxicidad humana no carcinogénica. También se comprueba que el proceso de deposición de Slurry Al genera impactos levemente superiores en algunas sustancias al proceso de deposición del Ni50Cr en emisión atmosférica para el mismo sustrato.

5.2.7.- Análisis económico.

En lo que respecta al coste en recursos económicos de todos los sistemas sustrato-recubrimiento teniendo en cuenta los recursos empleados, en el gráfico de la figura 204 y la tabla 59 se refleja el coste en recursos (expresado en dólares americanos por kg) de los sistemas analizados en la presente tesis a través de la herramienta computacional Simapro. Se realiza la conversión para el tipo de cambio de dólares americanos a euros para expresar los resultados en esta moneda mediante la ratio existente a fecha de realización de la presente tesis: 1 USD \rightarrow 0,914 EUR.

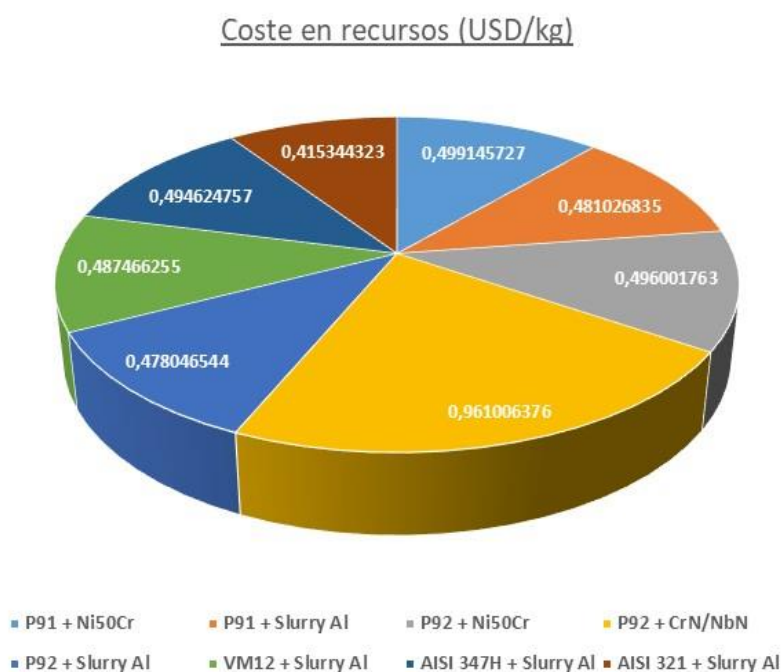


Figura 204: Coste en recursos (USD/kg) de los distintos sistemas sustrato-recubrimiento.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Sistema	Valor (USD/kg)	Valor (EUR/kg)
P91 + Ni50Cr	0,499145727	0,456219194
P91 + Slurry Al	0,481026835	0,439658527
P92 + Ni50Cr	0,496001763	0,453345611
P92 + CrN/NbN	0,961006376	0,878359827
P92 + Slurry Al	0,478046544	0,436934541
VM12 + Slurry Al	0,487466255	0,445544157
AISI 347H + Slurry Al	0,494624757	0,452087027
AISI 321 + Slurry Al	0,415344323	0,379624711

Tabla 59: Coste en recursos (USD/kg y EUR/kg) de los distintos sistemas sustrato-recubrimiento.
Fuente: elaboración propia con Simapro 9.0

Los datos muestran que el mayor coste vendría dado por el sistema P92-CrN/NbN (del orden del doble que el resto de los sistemas), el cual es también el sistema que mayor impacto medioambiental presenta. Los menores costes corresponderían a los sistemas AISI 321-Slurry Al y P92-Slurry Al, con lo que dicho recubrimiento de Slurry Al resultaría ser el más económico, así como el que menor impacto medioambiental presenta. En cuanto a los sustratos, el ferrítico P92 y el austenítico AISI 321 son los que menores costes presentan a la vez que un mejor comportamiento medioambiental de entre los sustratos ferríticos y austeníticos en global. Por otro lado, los sistemas con el recubrimiento de Ni50Cr (P91 y P92-Ni50Cr) presentan costes ligeramente superiores a los sistemas con el recubrimiento de Slurry Al, y todavía claramente inferiores al sistema P92-CrN/NbN; para estos sistemas con el recubrimiento de Ni50Cr el mayor coste (orden de decimales) estaría asociado al P91-Ni50Cr, frente al P92-Ni50Cr. Asimismo, para el caso de sistemas con recubrimiento de Slurry Al, el sistema AISI 347H-Slurry Al es el que mayor coste presenta (así como el sistema con el comportamiento ambiental más desfavorable de entre todos aquéllos con este tipo de recubrimiento), seguido del VM12-Slurry Al y del P91-Slurry Al en orden decreciente, todos ellos por encima de los costes correspondientes a los sistemas ya mencionados de P92-Slurry Al y AISI 321-Slurry Al. Hay que mencionar que la utilización de los sustratos, procesos de deposición y recubrimientos con mejor comportamiento ambiental contribuye a la reducción de fenómenos perjudiciales como el efecto invernadero, así como a la disminución de la emisión de contaminantes a la atmósfera, disminuyendo de esta manera los costes de remediación asociados a disminuir el impacto generado en este sentido. Asimismo, el empleo de este tipo de materiales está alineado con los objetivos de desarrollo sostenible y con los principios de una economía circular, junto con la reducción de la huella de carbono. Asimismo, procesos de deposición con menor consumo energético redundará en un menor coste a la vez que se consigue una menor afectación ambiental. La incorporación del estudio económico a la hora de realizar el análisis de ciclo de vida es una práctica cada vez más extendida, de cara a maximizar los beneficios en términos de sostenibilidad al menor coste posible. Esto se aplica no sólo a la mejora de materiales e instalaciones sino también a la fase de diseño de nuevos procesos sostenibles²⁷³.

²⁷³ Mahmud R., Moniruzzaman Moni S., High K., Carbajales-Dale M., “*Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design – A review*”, Journal of Cleaner Production, Volume 317, 2021, 128247, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128247>

6. CONCLUSIONES

6.1.- Conclusiones Generales.

Considerando los resultados obtenidos en el análisis de los materiales, recubrimientos y procesos involucrados en esta tesis, se derivan las siguientes conclusiones:

- Conclusión general 1:

Del Análisis de Ciclo de Vida individual de los aceros ferríticos P91, P92 y VM12 sin recubrimiento.

- En los aceros ferríticos, los procesos de producción de ferroníquel, ferrocromo y arrabio requieren un alto consumo energético por lo que generan un mayor impacto medioambiental para las categorías de impacto analizadas y aquellas relacionadas con las áreas del daño (Salud, Recursos y Ecosistema).
- La presencia de Cromo en el ferrocromo tiene una influencia negativa sobre el impacto en la salud humana y, más en concreto, en las categorías de impacto correspondientes a la formación de partículas y a toxicidad humana carcinogénica.
- La presencia de Níquel en el ferroníquel influye de manera determinante en las categorías de impacto de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono, así como en aquellas correspondientes al ecosistema y consumo de recursos naturales debido a los procesos de extracción de este elemento a partir del mineral.

- Conclusión general 2:

Del Análisis de Ciclo de Vida de los aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321 sin recubrimiento.

- Se observa que, en los aceros austeníticos, los procesos que generan un mayor impacto medioambiental sobre las categorías de impacto analizadas son los mismos que en el caso de los aceros ferríticos sin recubrimiento, es decir: producción de ferroníquel, ferrocromo y arrabio.

- Conclusión general 3:***Del Análisis de Ciclo de Vida individual de los sustratos ferríticos y austeníticos recubiertos***

- El análisis del sistema sustrato-recubrimiento incrementa los impactos ambientales frente al sustrato simple, debido a la influencia de los elementos químicos que incorpora el recubrimiento.
- El análisis de todos los sustratos con recubrimiento tipo Slurry de Al (es decir, los aceros P91, P92, VM12, AISI 347H y AISI 321) presenta resultados similares entre sí. Por otro lado, esto también sucede en todos los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr (para los aceros P91 y P92). Se verifica de este modo que los resultados obtenidos para sustratos con el mismo tipo de recubrimiento son similares entre sí.

- Conclusión general 4:***Del Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros ferríticos P91, P92 y VM12 sin recubrimiento.***

- Mediante este análisis se obtuvieron resultados similares en todas las categorías de impacto para los tres sustratos analizados, salvo en la categoría de impacto correspondiente al agotamiento de recursos minerales. En base a ello y considerando esta última categoría de impacto, es aconsejable utilizar el acero P92 frente al P91, y este último en lugar del VM12.
- Para estos aceros ferríticos, las categorías de impacto más desfavorables son la toxicidad humana no carcinogénica, la toxicidad humana carcinogénica, el cambio climático y la formación de partículas. Por tanto, los citados aceros ferríticos aportan impactos más acusados en el área de la salud humana que en las de los ecosistemas y los recursos.

- Conclusión general 5:***Del Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros inoxidables austeníticos AISI 347H y AISI 321 sin recubrimiento.***

- A partir de los resultados obtenidos, se deduce que es recomendable utilizar el acero AISI 321 frente al AISI347H. En ambos se obtienen resultados muy similares, excepto en la categoría de impacto correspondiente al agotamiento de recursos minerales en la que el menor valor corresponde al AISI 321.

CONCLUSIONES

- Por categoría de impacto, en ambos aceros austeníticos, se obtienen resultados similares a los correspondientes en los aceros ferríticos.

- Conclusión general 6:

Del Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros ferríticos P91, P92 y VM12 con recubrimientos de Ni50Cr, CrN/NbN y tipo Slurry de Al.

- Respecto a los resultados obtenidos para este análisis, el sistema P92-CrN/NbN es el que resulta más perjudicial desde un punto de vista ambiental al generar los mayores impactos en casi la totalidad de las categorías de impacto analizadas. Por su parte, los sustratos con recubrimiento de Ni50Cr presentan impactos inferiores a los correspondientes al mencionado sistema P92-CrN/NbN, pero superiores a los sustratos con recubrimiento tipo Slurry de Al, que son los medioambientalmente más favorables.
- Los sistemas con recubrimiento tipo Slurry de Al presentan un mejor comportamiento ambiental que el resto de recubrimientos considerados y así se observa en todas las categorías de impacto analizadas.

- Conclusión general 7:

Del Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros inoxidable austeníticos AISI 347H y AISI 321 con recubrimiento tipo Slurry de Al.

- Los resultados derivados para este análisis de las distintas categorías de impacto en ambos sustratos austeníticos con recubrimiento de Slurry de Al es muy similar, salvo para la categoría del agotamiento de recursos minerales, que muestra un menor impacto para el sistema sustrato-recubrimiento de AISI 321-Slurry de Al.

- Conclusión general 8:

Del Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los aceros sin recubrimiento frente a los aceros recubiertos.

- Para todas las categorías de impacto analizadas, el sustrato con el recubrimiento presenta un mayor impacto ambiental que el sustrato sin recubrimiento, a excepción del sistema AISI 321 – Slurry de Al.

- El sustrato-recubrimiento P92-Slurry de Al es medioambientalmente el más favorable de todos los sistemas sustrato-recubrimiento considerados debido a que presenta los menores impactos en todas las categorías de impacto analizadas; asimismo, las diferencias existentes entre las cargas ambientales del sustrato con recubrimiento y el sustrato sin recubrimiento son las más pequeñas de todos los sistemas estudiados. Por su parte, el sistema P92-CrN/NbN es el más desfavorable por generar los valores más elevados en todas las categorías de impacto ambiental consideradas. Por otro lado, también es el sistema donde existe una mayor diferencia entre las cargas ambientales aportadas por el sustrato con recubrimiento y el sustrato sin recubrimiento, lo que se explica por el alto impacto producido por el recubrimiento de CrN/NbN y el proceso de recubrimiento HiPIMS utilizado para la deposición sobre el sustrato.

- Conclusión general 9:

Del Análisis de Ciclo de Vida comparativo de los procesos de recubrimiento.

- El impacto medioambiental del recubrimiento CrN/NbN, depositado por HiPIMS, es superior en todas las categorías de impacto analizadas y esto es debido a varios factores. Por un lado, se encuentra el mayor consumo energético requerido por la técnica de HiPIMS en comparación con las otras técnicas de recubrimiento empleadas: HVOF y pintado con tratamiento térmico de difusión. Por otro lado, la presencia de Nb en el recubrimiento de CrN/NbN tiene una influencia negativa y determinante en la generación de los impactos asociados a este recubrimiento.

- Conclusión general 10:

Del Análisis de Ciclo de vida comparativo de los sustratos frente a los procesos de recubrimiento correspondientes.

- Al realizar el ACV comparativo de los sustratos frente a los procesos de recubrimiento correspondientes se observa más variabilidad en los resultados obtenidos que en el resto de ACV comparativos llevados a cabo y comentados en las conclusiones anteriores (conclusiones generales 4 a 9). Esto se debe a las grandes diferencias que existen entre las características inherentes de los sustratos por un lado y de los procesos de recubrimiento por otro, tanto a nivel de composición como de requerimientos energéticos necesarios.

CONCLUSIONES

- Se observa que el proceso de recubrimiento de Ni50Cr por HVOF presenta resultados similares frente a ambos sustratos con los que se combina (P91 y P92), así como que el proceso de recubrimiento de Slurry de Al por pintado y tratamiento térmico de difusión hace lo propio en su caso con los sustratos correspondientes (P91, P92, VM12, AISI 347H y AISI 321). Se verifica por tanto que el comportamiento ambiental de un mismo proceso de recubrimiento se mantiene independientemente del sustrato con el que se compare.
- Todos los valores de las categorías de impacto y áreas de daño (Recursos, Ecosistema y Salud) son superiores para el caso del proceso de recubrimiento de CrN/NbN por HiPIMS debido al consumo energético y emisiones de CO₂.

- Conclusión general 11.

Del Análisis económico de los sistemas.

- Se obtiene que el mayor coste correspondería al sistema P92-CrN/NbN, que es también el sistema que mayor impacto medioambiental presenta. Este sistema genera los costes más elevados debido a las necesidades energéticas requeridas para la utilización del HIPIMS; asimismo, posee el comportamiento ambiental más desfavorable al producir mayores impactos que el resto de sistemas en las categorías de impacto y áreas analizadas.
- Se observa que los menores costes corresponderían a los sistemas AISI 321-Slurry de Al y P92-Slurry de Al. El recubrimiento tipo Slurry de Al es el más económico y de menor impacto ambiental, ya que los requerimientos económicos asociados a su aplicación mediante pintado y tratamiento térmico son menores que los correspondientes al resto de recubrimientos; asimismo, su comportamiento ambiental es el más favorable ya que presenta las cargas ambientales más bajas en todas las categorías y áreas de daño (Recursos, Ecosistema y Salud) analizadas.
- Por otro lado, el coste económico asociado al sistema sustrato-recubrimiento depende en gran medida del tipo de recubrimiento y del proceso de deposición asociado. La influencia del sustrato en el coste del sistema sustrato-recubrimiento es pequeña; esto puede comprobarse mediante el hecho de que el sustrato P92 está incluido en el sistema con mayor coste (P92-CrN/NbN) y en uno de los sistemas de menor coste (P92-Slurry de Al).

6.2.- Conclusiones Principales.

PRIMERA

En base a los resultados analizados se observa que la utilización del recubrimiento de CrN/NbN mediante HiPIMS es desaconsejable desde el punto de vista medioambiental frente al resto de recubrimientos, ya que genera los mayores impactos asociados a todas las categorías de impacto y áreas de daño (Recursos, Ecosistema y Salud) analizadas. El recubrimiento de CrN/NbN depositado por HiPIMS es el que genera un mayor impacto a la salud humana, consumiendo la mayor cantidad de recursos y dando lugar a la mayor cantidad de emisiones.

SEGUNDA

Se propone el uso de aceros ferríticos como el P92 con el recubrimiento de Slurry de Al mediante pintado y tratamiento térmico al tratarse del sistema más favorable desde un punto de vista medioambiental, así como uno de los de menor coste ya que los impactos ambientales generados por este sistema son los menores de entre todos los sistemas estudiados, comprobándose que produce el menor daño a la salud humana y genera el menor consumo de recursos y la menor cantidad de emisiones atmosféricas.

TERCERA

La utilización del recubrimiento de Ni50Cr aplicado por HVOF es, medioambientalmente, más beneficiosa que la utilización del recubrimiento de CrN/NbN aplicado mediante el proceso HiPIMS. Por otro lado, si comparamos la utilización del recubrimiento de Ni50Cr aplicado por la técnica HVOF con la utilización del recubrimiento tipo Slurry de Al aplicado mediante pintado y tratamiento térmico de difusión, las diferencias observadas no son especialmente significativas. En este sentido el proceso de deposición del recubrimiento de Ni50Cr influye en mayor medida sobre las categorías de impacto relativas a la toxicidad humana y, en general, al área de salud humana que el proceso de deposición del recubrimiento tipo Slurry de Al. Por su parte, el proceso de deposición del recubrimiento tipo Slurry de Al influye en mayor medida sobre la categoría de impacto relativa al cambio climático y al área de ecosistemas que el proceso de deposición del recubrimiento de Ni50Cr.

CONCLUSIONES

CUARTA

Para el caso de los aceros austeníticos, la configuración AISI 321-Slurry de Al es la que resulta más beneficiosa desde un punto de vista ambiental y económico, ya que produce impactos ambientales levemente inferiores a los correspondientes al sistema AISI 347H-Slurry de Al con un coste final relativamente menor. Por otro lado, el coste del sistema AISI 321-Slurry de Al es más competitivo incluso que los correspondientes a los sustratos ferríticos recubiertos con Slurry de Al.

7. BIBLIOGRAFÍA

Abe F., “Research and Development of Heat-Resistant Materials for Advanced USC Power Plants with Steam Temperatures of 700 °C and Above”, Engineering, Volume 1, Issue 2, Elsevier, pp.211-224, junio 2015.

AELEC (Asociación de Empresas de Energía Eléctrica), <https://aelec.es/>, accedido en marzo 2023.

Aguayo F., Peralta M.E., Lama J.R., Soltero V.M., “Ecodiseño. Ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C)”. RC Libros, 2011.

Agüero A., “Recubrimientos contra la corrosión a alta temperatura para componentes de turbinas de gas”, Revista de Metalurgia, 43 (5) septiembre-octubre, pp. 384-398, ISSN: 0034-857, 2007.

Agüero A., “Progress in the development of coatings for protection of new generation steam plant components”, Energy Materials 3:1, pp. 40-41, 2008. <http://dx.doi.org/10.1179/174892407X248554>

Agüero A., Audigié P, Rodríguez S., Encinas-Sánchez V., de Miguel M.T., Pérez F.J., “Protective Coatings for High Temperature Molten Salt Heat Storage Systems in Solar Concentration Power Plants”, conference Paper, noviembre 2017.

Agüero A., Baraibar I., González V., et al., “Corrosion Resistance of Novel Coatings on Ferritic Steels for Oxycombustion–Supercritical Steam Boilers: Preliminary Results”, Oxid Met 85, pp 263–281, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11085-015-9575-y>

Agüero A., Baráibar I., Gutiérrez M., Tuurna S., Toivonen A., Penttilä S., Auerkari P., “Steam Oxidation of Aluminide-Coated and Uncoated TP347HFG Stainless Steel under Atmospheric and Ultra-Supercritical Steam Conditions at 700 °C”, Coatings 2020, 10, 839, agosto 2020. <https://doi.org/10.3390/coatings10090839>

Agüero A., Gutiérrez M., Muelas R., Spiradek-Hahn K., “Overview of steam oxidation behaviour of Al protective oxide precursor coatings on P92”, Surface Engineering, pp-1-9, 2016. <http://dx.doi.org/10.1080/02670844.2016.1155691>

Agüero A., Juez-Lorenzo M., Hovsepian P.E., Ehiasarian A.P., Purandare Y.P., Muelas R., “Long-term behaviour of Nb and Cr nitrides nanostructured coatings under steam at 650 °C. Mechanistic considerations”, Journal of Alloys and Compounds, Volume 739, pp. 549-558, 30 marzo 2018.

Agüero A., Landeira M.J., Hansson A.N., Gutierrez M., “Thermal cyclic resistance and long term inter-diffusion properties of slurry aluminide coatings modified with Si”, Results in Surfaces and Interfaces, Volume 6, 1 febrero 2022, 100042.

Agüero A., Muelas R., “Steam oxidation of Slurry Aluminide Coatings on Ferritic Steels for Advanced Coal-Fired Steam Power Plants”, Materials Science Forum Vols 461-464, pp. 957-964, 2004.

BIBLIOGRAFÍA

Agüero A., Muelas R., González V., “HVOF coatings for steam oxidation protection”, *Materials and Corrosion*, Volume 59. pp. 393–401, 2008.

Agüero A., Muelas R., Gutiérrez M., Van Vulpen R., Osgerby S., Banks J.P., “Cyclic oxidation and mechanical behaviour of slurry aluminide coatings for steam turbine components”, *Surface & Coatings Technology* 201, pp. 6253-6260, 2007.

Agüero A., Muelas R., Pastor A., Osgerby S., “Long exposure steam oxidation testing and mechanical properties of slurry aluminide coatings for steam turbine components”, *Surface & Coatings Technology* 200, pp. 1219-1224, 2005.

Agüero A., Pérez F.J., Bahillo A., “H2.5 Informe de evaluación comparativa de daños ambientales de recubrimientos”, Proyecto GENERA (Generación y Estudio de Recubrimientos para la Protección de Materiales en Atmósferas Agresivas: Sostenibilidad y Eficiencia), INTA, CUM, CIEMAT, 2017.

Ak N.F., Tekmen C., Ozdemir I., Soykan H.S., Celik E., “NiCr coatings on stainless steel by HVOF technique”, *Surface and Coatings Technology*, Volumes 174–175, pp. 1070-1073, septiembre-octubre 2003.

Akan, A.P., Chau, J.; Gullu, G., Sirkar, K.K., “Life Cycle Assessment of Post-Combustion CO₂ Capture and Recovery by Hydrophobic Polypropylene Cross-Flow Hollow Fiber Membrane Contactors with Activated Methyl-diethanolamine”. *Atmosphere* 14, 490, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14030490>

Alcamo J., Döll P., Henrichs T., Kaspar F., Lehner B., Rösch T., Siebert S., “Development and testing of the WaterGAP 2 global model of water use and availability”. *Hydrological Sciences Journal*, 48(3), pp. 317-337, 2003.

Alcamo J., Shaw R.W., Hordijk L., “The RAINS Model of Acidification: Science and Strategies in Europe”. IIASA Executive Report. IIASA, Laxenburg, Austria: ER-91-018, 1991.

Alonso M., “El Análisis de Ciclo de vida y sus principales softwares como herramientas de cálculo”, *Revista digital INESEM*, 2015.

American Galvanizers Association, “Galvanizado en caliente para protección contra la corrosión. Guía del especificador”, 2015.

American Galvanizers Association, “Inspección de productos de acero galvanizado en caliente”, 2016.

American Galvanizers Association, “Rendimiento de productos de acero galvanizado en caliente”, 2015

American Society for Testing and Materials (ASTM), “Standard practice for applying the analytic hierarchy Process to Multi Attribute Decision Analysis (MADA) of investments related to buildings and building systems”, ASTM designation E 1765-95, West Conshohocken, PA, USA, 1995.

- Andrade M.C., Feliu S., “Corrosión y Protección Metálicas, Vol.I”, CSIC, pp 32-35, 1991.
- Antón Vallejo M.A., “Utilización del Análisis del Ciclo de Vida en la Evaluación del Impacto Ambiental del Cultivo bajo Invernadero Mediterráneo”. Tesis doctoral, Programa de doctorado en Ingeniería Ambiental. Universidad Politécnica de Catalunya, 2004.
- Aranda, A., Zabalza, I., “Ecodiseño y análisis de ciclo de vida”. Universidad de Zaragoza, 2010.
- Asanta-Okyere S., Daqing T., Enemuoh E., Kwofie S., “Life Cycle Assessment of Supercritical Coal Power Plant with Carbon Capture and Sequestration in China”, *Asian Journal of Environment & Ecology* 1(2): 1-8, Article no. AJEE.31400, enero 2016.
- Ashby M., “Materials and the Environment: Eco-informed Material Choice”. Elsevier, pp. 72-73, 2013.
- Asif Z., Chen Z., Wang H., et al., “Update on air pollution control strategies for coal-fired power plants”, *Clean Techn Environ Policy* 24, pp 2329–2347, 2022.
- ASME steam tables, 6th edition, The American society of mechanical engineers, New York, 1992.
- Asteman H., Svensson J., Norell M., Johansson L., “Oxidation of Metals”, Vol.54, pp 11-26, 2000.
- ASTM: American Society for Testing and Materials, <https://www.astm.org/>, accedido en marzo 2023.
- ASTM B6-18, “Standard Specification for Zinc”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018.
- Audigié P., Bizien N., Baráibar I., Rodríguez S., Pastor A., Hernández M., Agüero A., “Aluminide slurry coatings for protection of ferritic steel in molten nitrate corrosion for concentrated solar power technology”, *AIP Conference Proceedings* 1850, 070002; doi: 10.1063/1.4984416, 2017.
- Audsley J., “Harmonization of Environmental Life Cycle Assessment”. European Commission DG VI Agriculture. Final Report Concerted Action AIR3-CT94-2028, 1997.
- Ayyappan S.P., Arun A., “High-temperature oxidation and erosion of HVOF sprayed NiCrSiB/Al₂O₃ and NiCrSiB/WC Co coatings”, *Applied Surface Science Advances* Volume 7, febrero 2022, 100191.
- Azapagic A., Clift R., “Life cycle assessment as a tool for improving process performance: A case study on boron products”. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 4:133, 1999. <https://doi.org/10.1007/BF02979447>

BIBLIOGRAFÍA

Baile Puig M., “Estudio de la Conformación de Componentes Aluminio-Silicio en Estado Semisólido”, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metallúrgica, 2005.

Baracca A., “El desarrollo de los conceptos energéticos en la mecánica y la termodinámica desde mediados del siglo XVII hasta mediados del siglo XIX”, *Llul: Revista de la Sociedad Española de historia de las Ciencias y de las Técnicas*, vol. 25, pp. 305-308, 2002.

Barroso Herrero S., Gil Bercero J.R., Camacho López A.M., “Introducción al conocimiento de los materiales y sus aplicaciones”, UNED, pp 413-414, 2010.

Bellekom S., Potting J., Benders R., “Feasibility of applying site-dependent impact assessment of acidification in LCA”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 11 (6), pp. 417 – 424, 2006.

Bhatia P., Ranganathan J., World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), “The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard”. 2004.

Binal G., “Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750 °C”, *Surface and Coatings Technology Volume 454*, 15 febrero 2023, 129141.

Boissonnet, G., Boulesteix C., Bonnet, G. et al., “Thermal Transport Properties of New Coatings on Steels for Supercritical Steam Power Plants”, *Oxid. Met* 88, pp 191–202, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11085-016-9682-4>

Bosch M.E., Hellweg S, Huijbregts M., Frischknecht R., “Applying Cumulative Exergy Demand (CExD) Indicators to the Ecoinvent Database”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (3) pp.181 – 190, 2007.

Boulay A.M., Bulle C., Bayart J.B., Deschenes L., Margni M. “Regional Characterization of Freshwater Use in LCA: Modeling Direct Impacts on Human Health”. *Environmental Science & Technology* N°45, pp. 8948-8957, 2011.

Boulesteix C., Pedraza F., Proy M., Lasanta I., de Miguel T., Illana A., & Pérez F. J., “Steam Oxidation Resistance of Slurry Aluminum and Aluminum/Silicon Coatings on Steel for Ultrasupercritical Steam Turbines”, *Oxidation of Metals*, 87(3-4), pp 469–479, 2017. Doi:10.1007/s11085-017-9726-4

Bradford S.A., “Fundamentals of Corrosion in Gases”, *ASM Handbook*, ASM, Editor, 1994.

Brandl W., Marginean G., Maghet D., Utu D., “Effects of specimen treatment and surface preparation on the isothermal oxidation behaviour of the HVOF-sprayed MCrAlY coatings”, *Surface and Coatings Technology*, Volumes 188–189, pp 20-26, noviembre-diciembre 2004.

Byrne R.G., Jepson M.A.E., Thomson R.C., Shingledecker J.P., Siefert J.A., “The influence of weld thermal cycle simulations on the microstructure of VMH12-SHC steel”, Joint EPRI-123HiMAT International Conference on Advances in High Temperature Materials, pp-253-264, Nagasaki, Japón, 2019.

Cada M., Britun N., Hecimovic A., Gudmundsson J.T., Lundin D., “Heavy species dynamics in high power impulse magnetron sputtering discharges”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 111-158, 2020.

Cada M., Gudmundsson J.T., Lundin D., “Electron dynamics in high power impulse magnetron sputtering discharges”, High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications, pp. 81-110, 2020.

Callister W.D., “Ciencia e Ingeniería de los Materiales, 2”, Reverté, pp 599, 2007.

Cascón Diaz L., “Estudio de la comparativa de las tecnologías de captura de CO₂ en oxidación”, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental, Universidad de Sevilla, septiembre 2012.

Caselles M.J., Gómez M.R., Molero M., Sardá J., “Química aplicada a la Ingeniería”, UNED, pp 404, 2015.

Coal 2022, Analysis and forecast to 2025. International Energy Agency.

Colombier R., Colombier L., “Aceros inoxidables, aceros refractarios”, Urmo, pp. 41, 1968.

Cortés Díaz J.M., “Aceros inoxidables y refractarios”, Departamento Ingeniería Mecánica y de los Materiales, Universidad de Sevilla, pp. 40, Sevilla, mayo 1991.

Curran M.A., “Overview of Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment”. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. 2016.

Chaudary K., “Shot Peening. Process, Equipments and Applications”, Educreation, pp 2-4, 2017.

Chen X., Tortorelli P., Shyam A., Santella M., Dryepondt S., Unocic K.A., Lara E., Maziasz P., “Characterization of Ni-based alloys for Advanced Ultra supercritical Power Plants”, Proceedings from EPRI’s 9th International Conference on Advances in Material Technology for Fossil Power Plants and the 2nd International 123Hi Mat Conference on High-Temperature Materials, pp. 580-592, 21-24 octubre, Nagasaki, Japón, 2019.

Day L., Wiens K., “Development of a slurry aluminide coating process with reduced environmental and health impacts”, 17-IAGT-209, Symposium of the industrial application of gas turbines committee, Banff, Alberta, Canada, octubre 2017.

BIBLIOGRAFÍA

De la Rúa C., “Desarrollo de la herramienta integrada “Análisis de Ciclo de Vida – Input Output” para España y aplicación a tecnologías energéticas avanzadas”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 2009.

Dewulf J., Bosch M.E., De Meester B., Van Der vorst G., Van Langenhove H., Hellweg S., Huijbregts M., “Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE): a Comprehensive Life Cycle Impact Assessment method for resource Accounting”, *Environmental Science and Technology*, 41, pp. 8477–8483, 2007.

Di Gianfrancesco A., “Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants”, ISBN 978-0-08-100552-1, <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04826-5>, Woodhead Publishing, Part One and Two, 2017.

Diaz Martin R., Pérez Trujillo F.J., Mayo del Río C., Sanglier Contreras G., “Application of the life cycle analysis (LCA) to the study of ferritic stainless steels with protective coatings”, Conference Paper, ANQUE-ICC-BIOTEC Madrid, julio 2014.

Dietz W., “Nuclear Materials, part II”, John Wiley & Sons Inc, pp. 144, 1994.

Dongke Zhang FTSE., “Ultra-supercritical coal power plants. Materials, technology and optimization”, Woodhead Publishing, pp.31-44, 2013.

Dreicer M., Tort V., Manen P., “Externalities of Energy, Vol. 5. Nuclear”, Centre d'étude sur l'Evaluation de la Protection dans le domaine Nucléaire (CEPN), edited by the European Commission DGXII, Science, Research and Development JOULE, Luxembourg, 1995.

Duan P., An D., Liu Z. et al. “Effect of Long-Term Thermal Aging at 680 °C on Microstructure and Mechanical Properties of P92 Steel”, *Journal of Material Engineering and Performance*, 2023, <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08027-9>.

Durham R.N., Singheiser L., Quadackers W.J., “Identification of degradation mechanisms in coatings for supercritical steam applications”, *Materials and Corrosion* 59, No.5, pp. 402-407, 2008. DOI: 10.1002/maco.200804122.

Enerdata (Intelligence + Consulting), <https://www.enerdata.net> accedido en marzo 2023.

Environment Agency, “Application of Life Cycle Assessment to Investigate Options for Disposal and Processing of End of Life Vehicles in 2015”, UK, ISBN 1857059751, 2002.

Estevez A., “Diagnóstico de daño en turbinas de vapor”, Departamento Ingeniería Mecánica y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2017.

European Commission, ILCD handbook: General guide for life cycle assessment – provisions and action steps, 1st edition, Institute Environment and Sustainability, 2010.

European Commission, “Methodology study Eco design of energy using products”, MEEup methodology Report, 2005.

Faridani, M. N., “Classification and probabilistic model development for creep failures of structures: Study of X-70 carbon steel and 7075-T6 Aluminium Alloys”. 2011.

Fernández Benítez, J.A., “Tecnologías para la Innovación en la Generación de Energía Eléctrica”, Fundación COTEC, 2003.

Fernández Montes Y., “La Directiva de Emisiones Industriales y las Centrales de Carbón en España”, Cuadernos de Energía, pp.156-163, 2016.

Finnveden G., “Valuation methods within LCA—where are the values?” The International Journal of Life Cycle Assessment 2 (3), pp. 163 – 169, 1997.

Frischknecht R., Steiner R., Jungbluth N., “The Ecological Scarcity method, Eco factors 2006, a method for impact assessment in LCA”, Federal Office for the Environment (FOEN), Switzerland, 2006.

Gabrel J., Bendick W., Vandenberghe B., Lefebvre B., “Status of development of VM 12 steel for tubular applications in advanced power plants”, Energy Materials 1:4, pp-218-222, 2007.

Gada H., Mudgal D., Parvez S., & Ahmad B., “Investigation of High Temperature Corrosion Resistance of Ni25Cr Coated and Bare 347H SS in Actual Husk Fired Boiler Atmosphere”, Engineering Failure Analysis, 104256, 2019. Doi:10.1016/j.engfailanal.2019.104256.

Gang-Chang J., Chang-Jiu L., Yu-Yue W., Wen-Ya L., “Microstructural characterization and abrasive wear performance of HVOF sprayed Cr₃C₂-NiCr coating”, Surface and Coatings Technology, Volume 200, Issue 24, pp 6749-6757, 1 agosto 2006.

Garcés L.F., Hernández M.L., “La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local”. Revista Lasallista de Investigación, vol. 1, núm. 2, pp. 67-72, 2004.

García Garrido S., Ratia Gómez P., Perea Samper J., “Operación y mantenimiento de centrales de ciclo combinado”, Díaz de Santos, pp. 16-22, 2008.

García Martínez M., “Desarrollo de recubrimientos base aluminio mediante mocvd para protección frente a la corrosión y a la oxidación”, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, 2013.

Garmés Belmonte B., “Motores de reacción y turbinas de gas”, Paraninfo 2ºEd., pp 118, 2018.

Garnier-Laplace J., Alonzo F., Adam-Guillermin C., “Establishing relationships between environmental exposures to radionuclides and the consequences for wildlife: inferences and weight of evidence”. SAGE, ICRP, 2013.

Global Electricity Report 2022, https://ember-climate.org/app/uploads/2022/03/SP_Report-GER22.pdf, accedido en marzo 2023.

BIBLIOGRAFÍA

Garraín Cordero D., “Desarrollo y aplicación de las categorías de impacto ambiental de ruido y de uso de suelo en la metodología de análisis de ciclo de vida”. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería de Sistemas Industriales y Diseño, Departamento de Ingeniería Mecánico y Construcción. Universidad Jaume I, 2009.

Goedkoop M., Oele M., Schryver A., Vieira M., Hegger S., “SimaPro Database Manual. Methods library”, PRé Consultants: Amersfoort, The Netherlands, 2010.

Goedkoop M., Spriensma R., “The eco-indicator 99. A damage-oriented method for life cycle impact assessment. Methodology report”, Pré Consultants B.V., 1999.

Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. de, Duin, R. van, Huijbregts, M.A.J. “Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. Ila: Guide. Iib: Operational annex. III: Scientific background”. Kluwer Academic Publishers, ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, 2002.

Grégoire B., et al. “Resistance of slurry aluminide coatings on pure nickel under different sulphidizing/Hot corrosion conditions at 700 °C”, Corrosion Science, Volume 216, 15 mayo 2023, 111092.

Groover M.P., “Fundamentos de Manufactura Moderna. Materiales, Procesos y Sistemas”, Prentice Hall, pp 157-161, 1997.

Guan K., Xu X., Xu H., Wang Z., “Effect of aging at 700 °C on precipitation and toughness of AISI321 and AISI 347 austenitic stainless-steel welds”, Nuclear Engineering and Design 235, pp. 2485–2494, 2005.

Guerrero García F., “Aprovechamiento térmico de residuos estériles de carbón para generación eléctrica mediante tecnologías de combustión y gasificación eficientes y con mínimo impacto ambiental”, Escuela técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica, pp 29-46, Madrid 2015.

Guinée J.B., Gorrée M., Heijungs R., Huppes G., de Koning A., Wegener A., Suh S., Udo de Haes H., Bruijn H., Duin R.V., Huijbregts M.A.J., “Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards”. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 2002.

Guinée J. B., “Handbook on life cycle assessment operational guide to the ISO standards”. The international journal of life cycle assessment, 7(5), pp. 311-313, 2002.

Guinée J. B., “LCA—an operational guide to the ISO-standards, part 3 scientific background”, Institute of Environmental Science (CML), Leiden University, Leiden, NL, 2001.

Guinée J. B., Heijungs, R., “A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment”. Environmental toxicology and chemistry, 14(5), pp. 917-925, 1995.

Guinée J.B., Heijungs R, Huppés G., Zamagni A., Masoni P., Buonamici R., Ekvall T., Rydberg T., “Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future”. *Environmental Science & Technology*. 45 (1), pp. 90-96, 2011.

Guo X.F., et al., “Optimisation and thermo-mechanical analysis of a coated steam dual pipe system for use in advanced ultra-supercritical power plant”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 186, 2020.

Gutiérrez M., Illana A., Bahillo A., Benito M.J., García-Martín G., Pérez F.J., Agüero A., “Comparison between pilot and lab scale testing of aluminide coated and uncoated ferritic steels under oxy-fuel and coal/thistle co-firing conditions”, *Surface and Coatings Technology*, Volume 450, 25 noviembre 2022, 128982.

Hahn B., Bendick W., “Pipe Steels for modern high-output power plants. Part 1: Metallurgical principles – Long-term properties – Recommendations for use”, pp.3, Vallourec, 2013.

Han G.S., Cho W.D., “Oxidation of Metals”, 58, pp 391-413, 2002.

Han X., Chen N., Yan J., Liu J., Liu M., & Karellas S., “Thermodynamic analysis and life cycle assessment of supercritical pulverized coal-fired power plant integrated with No.0 feedwater pre-heater under partial loads”. *Journal of Cleaner Production*. 233, pp 1106-1122, 2019.

Hansson A.N., Montgomery M., “Steam Oxidation of TP 347H FG in Power Plants”, *Materials Science Forum* Vols. 522-523, pp 181-188, 2006. Doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.522-523.181.

Haya E., “Análisis de Ciclo de Vida”. Máster en Ingeniería y Gestión Medioambiental. EOI Escuela de Organización Industrial. 2016.

Heijungs R., Guinée J. B., Huppés G., Lankreijer R. M., Udo de Haes H. A., Wegener Sleeswijk, A., De Goede, H. P., “Environmental life cycle assessment of products: guide and backgrounds”, 1992.

Henry S., Galerie A., Antoni L., “Materials Science Forum”, 369-3, pp 353-360, 2001.

Hernández Jiménez L.G., “Determinación mediante microabrasión del espesor y tasa de desgaste de recubrimientos delgados depositados sobre materiales metálicos”, *3Ciencias*, Ed. Área de Innovación y Desarrollo S.L., pp 32, 2019.

Herrera Orozco I., “Análisis de Ciclo de Vida en Sistemas Energéticos”. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), 2012.

Hertwich E., “The Areas of Protection in Life Cycle Impact Assessment, Epilog”. *Global LCA Village*, pp. 1-2. 2002.

Hoekstra A.Y., Mekonnen M.M., Chapagain A.K., Mathews R.E., Richter B.D. “Global Monthly Water Scarcity: Blue Water Footprint versus Blue Water Availability”. *PLUS ONE* N°7(2): e32688. DOI:10.1371, 2012.

BIBLIOGRAFÍA

Hou X., et al., “Steam oxidation and mechanical performance of a ferritic–martensitic steel with slurry aluminide coating”, *Materials and Corrosion* pp-1-11, 2020. DOI: 10.1002/maco.202011554.

Hougen O.A., Watson K.M., Ragatz R.A., “Principios de los Procesos Químicos. Parte II. Termodinámica”, pp. 236, Reverté, 1982.

Hovsepian P.E., et al., “Novel HIPIMS deposited nanostructured CrN/NbN coatings for environmental protection of steam turbine components”, *Journal Alloys and Compounds*, Vol. 746, pp. 583-593, 2018.

Hovsepian P.E., et al., “Performance of HIPIMS deposited CrN/NbN nanostructured coatings exposed to 650 °C in pure steam environment”, *Materials Chemistry and Physics*, Volumes 179, pp. 110-119, 2016.

Hubicka Z., Gudmundsson J.T., Larsson P., Lundin D., “Hardware and power management for high power impulse magnetron sputtering”, *High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications*, pp. 49-80, 2020.

Huijbregts M. A. J., Breedveld L., Huppel G., De Koning A., Van Oers L., Suh S., “Normalisation figures for environmental life-cycle assessment: The Netherlands (1997/1998), Western Europe (1995) and the world (1990 and 1995)”. *Journal of Cleaner Production*, 11(7), pp. 737-748, 2003.

Huijbregts M., Hellquiereweg S., Frischknecht R., Hungerbühler K., Jan Hendriks A., “Ecological footprint accounting in the life cycle assessment of products”, *Ecological Economics* 64, pp. 798 – 807, 2008.

Hussain T., Simms N.J., Nicholls J.R., Oakey J.E., “Fireside corrosion degradation of HVOF thermal sprayed FeCrAl coating at 700-800°C”, *Surface & Coatings Technology* 268, pp. 165-172, 2015.

Ibrahim Menoufi K.A., “Life Cycle Analysis and Life Cycle Impact Assessment methodologies: A state of the art”. Treball de final de master. Màster en Ciències Aplicades a l'Enginyeria, Escola Politècnica Superior, Universitat de Lleida, 2011.

IEA (International Energy Agency – Agencia Internacional de la Energía AIE), <https://www.iea.org/reports/coal-2022/executive-summary>, accedido en marzo 2023.

Illana A., Mato S., Ehiasarian A., Purundare Y., Lasanta M.I., de Miguel M.T., Hovsepian P., Pérez Trujillo F.J., “Substrate Finishing and Niobium Content Effects on the High-Temperature Corrosion Resistance in Steam Atmosphere of CrN/NbN Superlattice Coatings Deposited by PVD-HIPIMS”, *Oxid Met*, Springer Science + Business Media New York, 2017. DOI 10.1007/s11085-016-9701-5.

Institute for Product development at the Danish Technical University, <http://www.dtu.dk>, accedido en marzo 2023.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo INSHT, Fichas internacionales de Seguridad Química. Ozono (ICSC:0068), abril 2009.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2007: The Physical Science Basis”. Working group I, 2.10.2 Direct Global Warming Potentials, 2007.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2013: The Physical Science Basis”. Working group I Contribution to the fifth assessment report, 2013.

International Zinc Association, IZA, www.zinc.org, accedido en marzo 2023.

Interuniversity Reference Center for the Life Cycle Assessment Interpretation and Management of Products, Processes and Services, École Polytechnique de Montréal, Montreal, Quebec, Canada, <http://www.ciraig.org>, accedido en marzo 2023.

Instituto Superior del Medio Ambiente, ISM, <http://www.ismedioambiente.com> , accedido en marzo 2023.

ISO (International Standard Organization), Standards Catalogue, ISO/TC 207/SC 5, Life Cycle Assessment, www.iso.org, accedido en marzo 2023.

ISO (International Standard Organization) 14040:2006, Environmental Management – Life cycle assessment. Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO).

ISO (International Standard Organization) 14024:2018, Environmental Labels and Declarations–Type I environmental labelling–Principles and procedures International Organization for Standardization (ISO).

ISO (International Standard Organization) 14021:2016, Environmental Labels and Declarations–Self-declared environmental claims (Type II environmental labelling). International Organization for Standardization (ISO).

ISO (International Standard Organization) 14025:2006, Environmental Labels and Declarations–Type III environmental declarations–Principles and procedures International Organization for Standardization (ISO).

Jolliet O., Crettaz P., “Critical Surface-Time 95, a Life Cycle Impacts Assessment methodology including exposure and fate”. Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), Institute of Soil and Water management, 1996.

Jolliet O., Margni M., Charles R., Humbert S., Payet J., Rebitzer G., Rosenbaum R., “IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology”, The International Journal of Life Cycle Assessment 8: 324. <https://doi.org/10.1007/BF02978505>, 2003.

Junek L., Bystriansky J., Vlcek L., Lazarek L., Strnadel B., “Effect of thermal cycles on the fatigue life of AISI 321 stainless steel”, Transactions, SMiRT 19, Toronto, agosto 2007.

BIBLIOGRAFÍA

Kaur M., Singh H., Prakash S., “High-Temperature Corrosion Studies of HVOF-Sprayed Cr₃C₂-NiCr Coating on SAE-347H Boiler Steel”, *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 18 (4) pp. 619–632, DOI: 10.1007/s11666-009-9371-9, diciembre 2009.

Kaushal G., Singh H., & Prakash S., “High temperature corrosion behaviour of HVOF-sprayed Ni-20Cr coating on boiler steel in molten salt environment at 900”, *International Journal of Surface Science and Engineering*, 5(5/6), 415, 2011. Doi:10.1504/ijsurfse.2011.044388.

Khanna A.S., “Introduction to High Temperature Oxidation and Corrosion”, ASM International, pp 1-24, 2002.

Klopffer W., “In Defense of the Cumulative Energy Demand”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2 (2) 61, 1997.

Klöpffer W., “Life-Cycle based methods for sustainable product development”. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8:157, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02978462>

Klueh R.L., Harries D.R., “High-Chromium Ferritic y Martensitic Steels for Nuclear Application”, ASTM, pp.221-228, 2001.

Koellner T., Scholz W.R., “Assessment of Land Use Impacts on the Natural Environment, Part 1: An Analytical Framework for Pure Land Occupation and Land Use Change”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 12 (1) pp. 16 – 23, 2007.

Kościelniak B., Chmiela B., Sozańska M., Swadźba R., Drajewicz M., “Oxidation Behavior of Inconel 740H Nickel Superalloy in Steam Atmosphere at 750 °C”, *Materials*, 14(16):4536, 2021.

Kriner A., Castorina J.A., Cerne B., “El adelgazamiento de la capa de ozono: algunos obstáculos para su aprendizaje”. *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, Vol. 2, N° 2, pp. 136-154, 2003.

Kurniawan T., Binti F.A., Asmara Y., “High Temperature Oxidation of Fe-Cr Steels in Steam Condition – A Review”. *Indonesian Journal of Science & Technology*, Volume 1 Issue 1, pp 107-114, abril 2016. <http://dx.doi.org/10.17509/ijost.v1i1>.

Kuboň Z, Stejskalová Š., Kande L., “Effect of Sigma Phase on Fracture Behavior of Steels and Weld Joints of Components in Power Industry Working at Supercritical Conditions”, *Austenitic Stainless Steels - New Aspects*, 2017. Doi: 10.5772/intechopen.71569.

Lamana N., Hernández A., “Análisis del Ciclo de Vida – Ciudades para un Futuro más Sostenible”. *Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid-Universidad Politécnica de Madrid*, 2005.

Lechón, Y., Cabal H., Lago C., de la Rúa C., Sáez R.M., Fernández M., “Análisis del ciclo de Vida de Combustibles alternativos para el Transporte. Fase I. Análisis del Ciclo de Vida Comparativo del Etanol de Cereales y de la Gasolina”. Energía y Cambio Climático, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente. Ministerio de Educación y Ciencia. CIEMAT. 2015.

Li M., Wang G., Xu J., Ni J., & Sun, E. “Life Cycle Assessment Analysis and Comparison of 1000 MW S-CO₂ Coal Fired Power Plant and 1000 MW USC Water-Steam Coal-Fired Power Plant”, *Journal of Thermal Science*. doi:10.1007/s11630-020-1327-x, 2020.

Li W., et al., “Low-Cycle Fatigue and Fracture Behavior of Aluminized Stainless Steel AISI 321 for Solar Thermal Power Generation Systems”, *Metals* 2020, 10, 1089, 2020. Doi:10.3390/met10081089.

Li X., Bahkit B., Johansson Joesaar M.P., Hultman L., Petrov I., Greczynski G., “Toward energy-efficient physical vapor deposition: Routes for replacing substrate heating during magnetron sputter deposition by employing metal ion irradiation”, *Surface and Coatings Technology* 415, 127120, pp. 8, 2021.

Li Y., Nie J., Yan Y., et al., “High-Temperature Oxidation Behavior of NiCoCrAlY Coatings Deposited by Laser Cladding on 304 Stainless Steel”, *Met. Mater. Int.* 28, pp. 412–420, 2022.

Life Cycle Cost Calculator, American Galvanizers Association, <http://lccc.galvanizeit.org>, accedido en marzo 2023.

Lindeijer E., “Normalisation and Valuation”, Part VI of the SETAC Working Group Report on LCA Impact Assessment, IVAM Environmental Research, University of Amsterdam, The Netherlands. 1996.

Lindow K., Kaluza A., Stark R., “Study on sustainability y developments in industrial practice”, 15th Global Conference on Sustainable Manufacturing, *Procedia Manufacturing* 21, pp.345–352, 2018.

Linforde, L.G., Christiansen K., Hoffman L., Virtanen Y., Juntilla V., Leskinen A., Hanssen O.J., Ronning A., Ekvall T., Finnveden G., Weidema, B.P., Ersboll A.K., “LCA-Nordic Technical Reports No 10 and Special Reports, No 1-2”. Temanord, 1995.

López A.J., Proy M., Utrilla V., Otero E., Rams J., “High-temperature corrosion behavior of Ni–50Cr coating deposited by high velocity oxygen–fuel technique on low alloy ferritic steel”, *Materials and Design* 59, pp. 94-102, 2014.

Lundin D., Hecimovic A., Minea T., Anders A., Brenning T., Gudmundsson J.T., “Physics of high power impulse magnetron sputtering discharges”, *High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications*, pp. 265-332, 2020.

Luo C.W., et al. “Structure, mechanical and tribological properties of thick CrN_x coatings deposited by HiPIMS”, *Vacuum*, Volume 203, septiembre 2022, 111253.

BIBLIOGRAFÍA

Lyphout C., Nylén P., Manescu A., et al., “Residual Stresses Distribution through Thick HVOF Sprayed Inconel 718 Coatings”, *J Therm Spray Tech* 17, pp 915–923, 2008. <https://doi.org/10.1007/s11666-008-9242-9>

Mahmud R., Moniruzzaman Moni S., High K., Carbajales-Dale M., “Integration of techno-economic analysis and life cycle assessment for sustainable process design – A review”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 317, 2021, 128247, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128247>

Marulanda J.L., Alucema O., Barón J.A., “Oxidación en vapor de agua del acero inoxidable AISI 316 recubierto con Al-Si por deposición química de vapor en lecho fluidizado”, *Revista Ion*, vol.27, no.1, pp 49-57, 2014.

Marulanda Arévalo J.L, Pérez Trujillo F.J., Castañeda Quintana S.I., “Behaviour of aluminium coating by CVD-FBR in steam oxidation at 700 °C”, *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 5, n.º 4, pp. 77-86. 2014.

Marulanda Arévalo J.L, Pérez Trujillo F.J, Remolina Millán A., “Recubrimientos de aluminio-silicio realizados por deposición química de vapor en lecho fluidizado sobre el acero inoxidable AISI 316”. *Revista Facultad de Ingeniería, Uptc*, Vol. 22, N.º 34. enero-junio de 2013.

Masuyama F., “New Developments in Steels for Power Generation Boilers”, *IOM Communications Ltd. London*, pp. 33-48, 1999.

Mato S., Sánchez-López J.C., Barriga J., Pérez F.J., Alcalá G., “Insights into the role of the layer architecture of Cr–Ti–N based coatings in long-term high temperature oxidation experiments in steam atmosphere”, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 3, pp 4257-4266, 2021.

Meetham G., Voorde M.V.d., “Materials for High Temperature. Engineering Applications” pp 35-51, Springer, 2000.

METI: Ministry of economy, trade and industry, Japan, <http://www.meti.go.jp>, accedido en marzo 2023.

Meyer Brittan A., Mahaffey J. T., Colgan N. E., Elbakhshwan M., & Anderson M. H., “Carburization resistance of cu-coated stainless steel in supercritical carbon dioxide environments”, *Corrosion Science*, 169-108639, 2020.

Miguel Pérez A., “Modelización de una central térmica supercrítica de 700MW con captura de CO₂”, *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y de Energía, Universidad Politécnica de Madrid*, pp.12-16, septiembre 2014.

Ministerio para la Transición Ecológica, “Factores de emisión. Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono”, *Gobierno de España*, pp.6, Versión 22, julio 2022.

Montero X., Galetz M.C., Schütze M., *Oxidation of Metals* 80, 635, 2013.

Morales Hernández J., Mandujano Ruiz A., Torres González J., “Corrosión y preservación de la infraestructura industrial”, *OmniaScience*, pp 238-240, 2013.

Mosquera Feijoo M., Nofz M., Sojref R., Saliwan-Neumann R., Doerfel I., Kranzmann A., Pérez Trujillo F., “Alumina sol-gel coatings for corrosion protection of steel P92”, *Energy Production, Environmental & Multiscale*. Volume 7. 2014. pp 119-120, 2014.

Motoshita M., Itsubo N., Inaba A. “Development of Impact Factors on Damage to Health by Infectious Diseases Caused by Domestic Water Scarcity”. *International Journal LCA* N°16, pp. 65-73, 2011.

Muelas R., “Recubrimientos resistentes a los fenómenos de degradación en las nuevas turbinas generadoras de energía por vapor de agua”, Tesis doctoral, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Facultad de CC Químicas, Universidad Complutense, pp.50-56, Madrid, 2016.

Müller-Wenk R., “A method to include LCA road traffic noise and its health effects”, *International Journal of Life Cycle Assessment* 9 (2), pp. 76-85, 2004.

Muñoz M., Rovira A.J., “Máquinas térmicas”, Universidad Nacional de Educación a Distancia, capítulo 10.1, Madrid, 2013.

Muthu S.M., Anant R.V., Raghul D., Ishwarya M., Arivazhagan N., & Arivarasu M., “Comparison of hot corrosion performance of Bare and NiCoCrAlY coated austenitic stainless steel AISI 347 in aggressive waste heat incinerator environment at 650°C”, *Surface Review and Letters*, 2019. Doi:10.1142/s0218625x19501683.

Muthu S.M., et al., “Improvement in hot corrosion resistance of dissimilar alloy 825 and AISI 321 CO₂ laser weldment by HVOF coating in aggressive salt environment at 900°C”, *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials* 27, pp. 1536–1550, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2014-3>.

National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, “Exposure Factors Handbook”, Environmental protection agency (EPA), USA, agosto 1997.

Nature Energy, <https://www.nature.com/nenergy/>, accedido en marzo 2023.

Nawrocki J.G., Dupont J.N., Robino C.V., Marder A.R, “The Stress-Relief Cracking Susceptibility of a New Ferritic Steel — Part 1: Single-Pass Heat- Affected Zone Simulations”, *Welding Research Supplement*, pp. 355-361, 2000

Nicholls J.R., “Designing oxidation resistant coatings”, *JOM*, pp.52(1), 28-35, 2000.

Niembro García I.J., “Categorías de evaluación de impacto de ciclo de vida vinculadas con energía: revisión y prospectiva”. 12th International Conference on Project Engineering, pp. 1182. 2008.

NIST: The National Institute of Standards and Technology, www.nist.gov, accedido en marzo 2023.

BIBLIOGRAFÍA

Otero Huerta E., “Corrosión y degradación de materiales”, Madrid: Síntesis, pp 276-290, 2012.

Parlamento europeo y consejo de la Unión Europea, Reglamento (CE) no 1005/2009 del parlamento europeo y del consejo de 16 de septiembre de 2009 sobre las sustancias que agotan la capa de ozono, 2009.

Parra R., “Estimación de factores de emisión de gases de efecto invernadero en una planta de tratamiento de aguas residuales”. Revista Boliviana de Química, v.27 n.2, 2010.

Patrick C., Kumagai S., Shinozuka E., “Development of Eco Scarcity Japanese Version”, The Fifth International Conference on Ecobalance, Tsukuba, Japan, 2002.

Pedraza F., et al., “Behavior of Slurry Aluminized Austenitic Stainless Steels under Steam at 650 and 700 C”, Oxid Met, Springer Science, 2017. DOI 10.1007/s11085-017-9725-5.

Peña Ballesteros D.Y., Vásquez Quintero C., Laverde Cataño D., Serna A., “Corrosión a temperatura alta del acero ferrítico 9Cr-1Mo modificado P91, en atmósferas simuladas oxidantes-carburantes”, Revista de Metalurgia 48 (2), ISSN: 0034-8570, pp 103-104, 2012.

Pérez Muñoz D., Marulanda Arévalo J.L., Meza Meza J.M., “Caracterización mecánica de recubrimientos de aluminio por CVD-FBR sobre aceros inoxidable y resistencia a la oxidación en vapor de agua”, Fac. Ing., vol. 24 (40), pp. 9–16, sep.-dic. 2015.

Pérez F.J., Castañeda S.I., “TG–mass spectrometry studies in coating design for supercritical steam turbines”, Materials and Corrosion 59, No.5, pp. 410, 2008. DOI: 10.1002/maco.200804123.

Petrescu L., Bonalumi D., Valenti G., Cormos A.M., Cormos C.C., “Life Cycle Assessment for supercritical pulverized coal power plants with post-combustion carbon capture and storage”, Journal of Cleaner Production, Volume 157, pp. 10-21, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.225>, 20 julio 2017.

Pidcock A., Mori S., Sumner J., et al. “High Temperature Corrosion of HVOF Coatings in Laboratory-Simulated Biomass Combustion Superheater Environments”, High Temperature Corrosion of Materials 99, pp. 101–115, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11085-022-10141-3>.

POEMA, Production of Coatings for New Efficient and Clean Coal Power Plants Materials, <https://cordis.europa.eu/project/id/310436/reporting/de>, accedido en marzo 2023.

Pour-Ali S., Kiani-Rashid A.R., Babakhani A., Norouzi M., Virtanen S., “New insights into the effects of surface nanocrystallization on the oxidation of 321 austenitic stainless steel in a humid oxygen environment at 1000 °C”, Corrosion Science Volume 147, pp. 231-245, febrero 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2018.11.024>.

Pré Consultants, “The Eco-indicator 99 – A damage-oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers”, 2000.

Purandare Y.P., Robinson G.L., Ehiasarian A.P., Hovsepian P.E., “Investigation of High-Power Impulse Magnetron Sputtering deposited nanoscale CrN/NbN multilayer coating for tribocorrosion resistance”, *Wear*, Volumes 452–453, 15 julio 2020, 203312.

Ramírez Vázquez J., “Centrales eléctricas”, CEAC, Barcelona, 1977.

Rasheed R., Javed H., Rizwan A., Sharif F., Yasar A., Tabinda A. B., Su Y., “Life cycle assessment of a cleaner supercritical coal-fired power plant”. *Journal of Cleaner Production*, 279-123869, 2021.

Rebitzer G., Ekvall T., Frischknecht R., Hunkeler D., Norris G., Rydberg T., Schmidt W.P., Suh S., Weidema B.P., Pennington D.W., “Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications”. *Environment International*, v. 30, pp. 701-720, 2004.

Rodríguez R., “Máquinas térmicas”, Instituto Profesional Providencia, Santiago de Chile, 2013.

Rogalev N., et al., “A Survey of State-of-the-Art Development of Coal-Fired Steam Turbine Power Plant Based on Advanced Ultrasupercritical Steam Technology”, *Contemporary Engineering Services*, Vol.7, no.34, pp-1807-1825, 2014. <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2014.410191>.

Rosenbaum R.K., Bachmann T.M., Gold L.S., Huijbregts M., Jolliet O., Juraske R., Koehler A., Larsen H.F., Manuele Margni M.M., McKone T.E., Payet J., Schuhmacher M., van de Meent D., Hauschild M.Z., “USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterization factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment”, *The International Journal of Life Cycle Assessment* 13 pp. 532–546, 2008.

Sahraoui T., Feraoun H.I., Fenineche N., Montavon G., Aourag H., Coddet C., “HVOF-sprayed Tribaloy®-400: microstructure and first principle calculations”, *Materials Letters*, Volume 58, Issue 19, pp 2433-2436, julio 2004.

Salán Ballesteros M.N., “Tecnología de proceso y transformación de materiales”, UPC, pp 71-72, 2009.

Sarakinos K., Martinu L., “Synthesis of thin films and coatings by high power impulse magnetron sputtering”, *High Power Impulse Magnetron Sputtering: Fundamentals, Technologies, Challenges and Applications*, pp. 333-374, 2020.

Sarrade S., Féron D., Rouillard F., Perrin S., Robin R., Ruiz J.C., Turc H.A., “Overview on corrosion in supercritical fluids”, *The Journal of Supercritical Fluids*, Volume 120, Part 2, pp. 335-344, 2017. ISSN 0896-8446, <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2016.07.022>.

Sarvghad Moghaddam M., “Corrosion of Structural Alloys in molten Salts for Solar Thermal Energy Storage”, *Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology*, 2018.

BIBLIOGRAFÍA

Schmidt J. H., “System delimitation in agricultural consequential LCA: Outline of methodology and illustrative case study of wheat in Denmark”. *International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 13, pp. 350-364, 2008.

Schwela D.H., Goldammer J.A., Morawska L.H., Simpson O., “Health guidelines for vegetation fire events”. Geneva: WHO, 1999.

Segerdahl K., Svensson J.E., Halvarsson M., Panas I., Johansson L.G., “Breakdown of the protective oxide on 11 % Cr steel at high temperature in the presence of water vapor and oxygen, the influence of chromium vaporization”, *Materials at High Temperatures*, 22:1-2, pp 69-78, 2005.

Sears F.W., Salinger G.L., “Termodinámica, teoría cinética y termodinámica estadística”, pp. 129-132, Reverté, 1980.

Semie K., Young-II L., Doyeon L., Wonchul C., Myung Won S., Jae Goo L., Yong Sik O., “Perspectives of oxy-coal power plants equipped with CO₂ capture, utilization, and storage in terms of energy, economic, and environmental impacts”, *Energy Conversion and Management*, Volume 273-116361, 2022.

Shankar A.R., Georg, R.P., Philip J., “Evaluation of Thermal Cycling Performance of Plasma Sprayed Alumina Coating on Inconel 600 with Different Bond Coats”, *Journal of Material Engineering and Performance* 31, pp. 4406–4418, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06545-y>.

Shipway P.H., McCartney D.G., Sudaprasert T., “Sliding wear behaviour of conventional and nanostructured HVOF sprayed WC–Co coatings”, *Wear*, Volume 259, Issues 7–12, pp 820-827, julio-agosto 2005.

Shunmugam M.S., Kanthababu M., “Advances in Micro and Nano Manufacturing and Surface Engineering”, Springer, pp 571-572, 2019.

Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). “Guidelines for Life Cycle Assessment: A Code of Practice”, 1993.

Sotomayor A., “Tecnologías Limpias. Medio Ambiente y Comercialización de Minerales”, Universidad de Lima, Fondo Editorial, 2018.

Staubli M., Mayer K. H., Giselbrecht W., Stief J., DiGianfrancesco A., Kern T. U., “Development of creep resistant cast steels within the European collaboration in advanced steam turbine materials for ultra efficient, low emission steam power plant/COST 501-522”, Germany, pp.1065-1080, 2002.

Steen B., “Abiotic Resource Depletion Different perceptions of the problem with mineral deposits”. *Int. J. LCA*, 11 vol. especial1, pp. 49 – 54, 2006.

Steen B., “A systematic approach to environmental strategies in product development (EPS). Version 2000 – General system characteristics”. Centre for Environmental Assessment of Products Materials Systems. Chalmers University of Technology, Technical Environmental Planning. 1999.

Stranddorf H., Hoffmann L., Schmidt A., “Impact categories, normalisation and weighting in LCA”. Environmental News No.78, Danish Ministry of Environment, Environmental Protection Agency, 2005.

Stumm W., Morgan, J. J., “Aquatic chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters”. Wiley, 1995.

Suárez Redondo E.M., “Análisis estructural del modelo EFQM de Excelencia: el papel mediador de la gestión por procesos y la planificación estratégica”. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, Departamento de Administración de Empresas y Marketing, 2017.

Summers K.L., Chidambaram D., “Corrosion Behavior of Structural Materials for Potential Use in Nitrate Salts Based Solar Thermal Power Plants”, J. Electrochem. Soc. volume 164, issue 8, H5357-H5363, 2017.

Sundararajan T., Kuroda S., Itagaki T., Abe F., “Thermal spray: advancing the science and applying the technology”, pp. 495–502, Materials Park, OH, ASM International, 2003.

Szargut J., Morris D.R., Steward F.R., “Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes”. Hemisphere Publishing, New York, 1988.

Szubzda B., Antonczak A.J., Koziol P.E., Lazarek L., Stepak B., Lecka K., Szmaja A., Ozimek M., “Corrosion resistance of the AISI 304, 316 and 321 stainless steels surfaces modified by laser”, IOP Conference Series: Material Science and Engineering, 113, 012017, febrero 2016.

The Swiss Federal Institute of Technology, www.ethz.ch, accedido en marzo 2023.

Thompson M., Ellis R. and Wildavsky A., “Cultural Theory”, Westview Press, Boulder, Co, 1990.

Udo de Haes H., Joliet O., Finnveden G., Hauschild M., Krewitt W., Müller-Wenk R., “Best available practice regarding impact categories and category indicators in life cycle impact assessment”. The International Journal of Life Cycle Assessment 4 (2), 66, 1999.

Ukidwe N.U., Bakshi B.R., “Industrial and ecological cumulative exergy consumption of the United States via the 1997 input–output benchmark model”, Energy 32, pp. 560–1592, 2007.

Ulgiati S., Odum H.T., Bastianoni S., “Emergy use, environmental loading and sustainability. An emergy analysis of Italy”, Ecological Modelling 73, pp. 215-268, 1994.

Unilever, <https://www.unilever.es/>, accedido en marzo 2023.

United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Protocol concerning the Control of Emissions of Volatile Organic Compounds. Geneva, 1991.

United Nations Environmental Program, Annual Evaluation Report 2003, 2003.

BIBLIOGRAFÍA

Valdés M., “Futuro de los ciclos termodinámicos: Estrategias para un suministro sostenible de energía eléctrica”, Departamento Ingeniería Energética y Fluidomecánica, ETS Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.

Valencia Giraldo A., Aristizábal Sierra R., “Ciencia de los metales”, Universidad de Antioquía, pp. 20-50, 2020.

Vallourec, “VM12-SHC Technical-Datasheet”, www.vallourec.com, accedido en marzo 2023.

Van Zelm R., Huijbregts M. A., van de Meent D., “USES-LCA 2.0—a global nested multi-media fate, exposure, and effects model”. The international journal of life cycle assessment, 14(3), pp. 282-284, 2009.

Viswanathan R., Gandy D., Coleman K., “Advances in Material Technology for Fossil Power Plants” pp 20-34, ASM International, 2005.

Visnawathan R., Purgert R., Shingledecker J., “Evaluating materials technology for advanced ultrasupercritical coal-fired plants”, Power 154(8), pp. 41.45, enero 2010.

Viswanathan R., Purgert R., Rao U., “Materials technology for advanced coal power plants”, Ohio Coal Research Office, pp.4, 2005.

Vivancos Bono JL., Collado Ruiz D., Bastante Ceca M.J., Gómez Navarro T., Capuz Rizo S., “Análisis de diversas metodologías de evaluación del impacto del ciclo de vida”, Departamento Proyectos de Ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia. 2005.

Wang W.Z., Xuan F.Z., Zhu K.L., Tu S.T., “Engineering Failure Analysis”, vol. 14, pp. 632-641, 2007.

Weidema B., “Ecoinvent database version 3 – the practical implications of the choice of system model”. The ecoinvent Centre, St. Gallen, Switzerland, 2016.

World Meteorological Organization, WMO, “Scientific assessment of ozone depletion. Global Ozone Research and Monitoring Project”, Report no. 56. Geneva, 2014.

World Steel Association, www.worldsteel.org, accedido en marzo 2023.

Wuebbles D.J., “Relative effects on stratospheric ozone of halogenated methanes and ethanes of social and industrial interest”. UNEP, Nairobi (Conference 19-10-1988), 1988.

Xue X., Wang Y., Chen H., et al., “A coal-fired power plant integrated with biomass co-firing and CO₂ capture for zero carbon emission”, Front. Energy 16, pp. 307–320, 2022.

Yale University/ISSF Stainless Steel Project “Acero inoxidable y CO₂: Hechos y observaciones científicas”, pp. 3, 2009.

Yaxin X., et al. “Mechanism of accelerating creep rupture under high stress level of pack cementation aluminide coatings deposited onto T92 steel tube”, Surface and Coatings Technology, Volume 455, 25 febrero 2023, 129212.

Yeomans S.R., “Galvanized Steel Reinforcement in Concrete”, Elsevier, pp.5, 2004.

Zhang A. F., et al., “Effects of Erosion Rate on the Erosion-Corrosion Synergism of High Velocity Oxy-Fuel Sprayed Ni-Based Coatings”, *Key Engineering Materials*, vol. 373–374, Trans Tech Publications, Ltd., pp. 585–588, marzo 2008. Doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.

Zhang D., “Ultra-Supercritical Coal Power Plants. Materials, Technologies and Optimisation”, Woodhead, pp. 1-20, 2013.

Zhang H., Kong W., Tan T., Baeyens J., “High-efficiency concentrated solar power plants need appropriate materials for high-temperature heat capture, conveying and storage”, *Energy*, 2017. Doi: 10.1016/j.energy.2017.07.129.

Zhang X.Z., Wu X.J., Liu R., Yao M.X., “Deformation-mechanism-based modeling of creep behavior of modified 9Cr-1Mo steel”, *Materials Science and Engineering*, Volume 689, pp.345-352, 24 marzo 2017.

Zhen H., Xikou H., Kun C., Xitao W., “Solidification and segregation characteristics of Ni-based superalloy C700R-1 for ultra-supercritical steam turbine rotor”, *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 912-165107, 2022.

Zhijian D., Xuemin Y., Jintao J., Chunxi L., “Life cycle assessment of coal-fired solar-assisted carbon capture power generation system integrated with organic Rankine cycle”, *Journal of Cleaner Production*, Volume 356-131888, ISSN 0959-6526, 2022.

Zhou Y., et al., “Low-temperature formation and steam oxidation of β -FeAl coating on P92 steel”, *Corrosion Science*, pp-1-11, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108227>

Zielinska-Lipiec A., Koziel T., Czryska-Filemonowicz A., “VM12 steel for advanced power generation plants – metrology of the precipitates by electron microscopy”, *Solid State Phenomena* Vol. 186, pp-283-296, 2012.

Żurek J., Michalik M., Schmitz F., et al. “The Effect of Water-Vapor Content and Gas Flow Rate on the Oxidation Mechanism of a 10%Cr-Ferritic Steel in Ar-H₂O Mixtures”. *Oxid Met* 63, pp 401–422, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11085-005-4394-1>

8. ANEXOS

8.1.- Normas ISO relativas a Análisis de Ciclo de Vida

Las normas ISO más importantes relacionadas con el Análisis de Ciclo de Vida son:

- *Norma UNE-EN ISO 14040:2006* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y marco de referencia.
- *Norma UNE-EN ISO 14044:2006* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requisitos y Directrices.

La ISO 14040 indica que el desarrollo de un Análisis de Ciclo de Vida ha de abarcar varias etapas metodológicas, ya comentadas en el presente trabajo.

- **Etapa 1. Definición del Objetivo y Alcance del ACV.** En los objetivos se presentan las razones por las que se acomete el trabajo, la aplicación prevista y a quién va dirigido. El alcance se traduce en la definición de la amplitud y grado de detalle del estudio.
- **Etapa 2. Análisis de Inventario de Ciclo de Vida.** Comprende la presente fase la identificación y cuantificación de las entradas (consumo de recursos) y salidas (emisiones al aire, suelo y aguas y generación de residuos) del sistema del producto o conjunto de procesos unitarios interrelacionados material y energéticamente que llevan a cabo una o más funciones similares.
- **Etapa 3. Evaluación de Impacto de Ciclo de Vida.** A lo largo de esta etapa, usando los resultados del análisis de inventario, se evalúa la significancia de los potenciales impactos ambientales causados las entradas y salidas del sistema.
- **Etapa 4. Interpretación.** Comprende la combinación de los resultados de las dos etapas precedentes, con el objetivo de establecer, conclusiones y recomendaciones que habiliten la toma de decisiones.

Debe comentarse que el concepto de revisión crítica se ha incorporado como requerimiento en la norma ISO 14040. Se utiliza sobre todo en ACV donde tienen lugar aseveraciones comparativas. La misión del proceso de revisión crítica es verificar que:

- Los métodos empleados en el ACV están alineados con ISO 14040.
- Los métodos empleados en el ACV son técnica y científicamente aptos.
- Los datos empleados son apropiados y coherentes con el objetivo del estudio.
- Las interpretaciones incluyen las limitaciones identificadas y el objetivo del estudio.
- El informe del estudio es transparente y coherente.

En los objetivos del estudio deben indicarse si la revisión crítica va a ser llevada a cabo, así como el propósito de su ejecución, aspectos que abarcará y con qué grado de detalle y cuáles son las personas involucradas en este proceso.

Se distinguen tres tipos de revisión crítica:

- **Revisión por expertos internos.** La revisión crítica la realiza un experto interno que es independiente del estudio del ACV, y que es conocedor de los requisitos de la norma ISO 14040 además de contar con experiencia científica y técnica. El informe de revisión puede ser elaborado por la persona que realiza el ACV y revisada por el experto interno o también puede ser elaborado totalmente por el experto interno. Este informe debe incluirse en el informe del estudio de ACV.
- **Revisión por experto externo.** La realiza por un experto externo que es independiente del estudio de ACV. Las consideraciones sobre la formación del experto y la realización del informe de revisión son las mismas que para el caso de expertos internos. El informe de revisión, los comentarios y cualquier respuesta hecha a las recomendaciones planteadas por el revisor deben incluirse en el informe del estudio de ACV.

- **Revisión por partes interesadas.** Para este tipo de revisión crítica, el cliente que encarga el estudio escoge un experto externo independiente con el fin de presidir el grupo revisor. En base al objetivo, alcance y presupuesto disponible para la revisión, el experto externo debe escoger a otros revisores independientes que estén cualificados. El informe de revisión, el informe del grupo revisor, los comentarios de los expertos, así como cualquier respuesta a las recomendaciones hechas por el revisor o por el grupo han de incluirse en el estudio de ACV.

Por su parte, la ISO 14044 hace una descripción de los principios y el marco de referencia para el análisis del ciclo de vida (ACV), teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- a) la definición del objetivo y el alcance del ACV,
- b) la etapa de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV),
- c) la etapa de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV),
- d) la etapa de interpretación del ciclo de vida,
- e) el informe y la revisión crítica del ACV,
- f) las limitaciones del ACV,
- g) la relación entre las fases del ACV, y
- h) las condiciones de empleo de juicios de valor y de otros elementos opcionales.

La ISO 14044 abarca tanto los estudios del análisis del ciclo de vida (ACV) como los estudios de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV).

La ISO 14040:2006, junto con la Norma ISO 14044:2006, anularon y reemplazaron a las siguientes normas, las cuales fueron revisadas técnicamente:

- *Norma UNE-EN ISO 14041:1998* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Definición de Objetivos, Alcance y Análisis de Inventario.

- *Norma UNE-EN ISO 14042:2000* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Evaluación de impacto del ciclo de vida.
- *Norma UNE-EN ISO 14043:2000* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Interpretación del ciclo de vida.

Existen normas adicionales que proporcionan ejemplos u orientaciones cuando se ejecuta el análisis del ciclo de vida y/o que constituyen material de apoyo para la implantación de las normas principales ISO 14040 e ISO 14044. Por ejemplo:

- *Norma UNE-EN ISO/TR 14047:2012* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Ejemplos ilustrativos de cómo aplicar la ISO 14044 en la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.
- *Norma UNE-EN ISO/TS 14048:2002* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Formatos para la Documentación de Datos.
- *Norma UNE-EN ISO/TR 14049:2012* Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Ejemplos ilustrativos de cómo aplicar la ISO 14044 para la Definición de Metas, Alcance y Análisis de Inventario.
- *Norma ISO/TS 14067:2013*, donde se especifican fundamentos, requerimientos e instrucciones, de cara a cuantificar parcial o totalmente la huella de carbono de los productos.

Por otro lado, debe mencionarse que la norma de referencia de la serie 14000 y la más empleada en la actualidad por las empresas para certificarse en gestión ambiental es la *Norma UNE-EN-ISO 14001:2015* Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con Orientación para su Uso. La edición de 2015 de la norma ISO 14001, que reemplaza a la anterior edición de 2004, introduce el concepto de ciclo de vida. Así, este concepto se ha incorporado como requisito para las organizaciones que deseen certificarse. El objetivo de la norma es que se utilice la estructura de alto nivel teniendo en cuenta distintas secciones y procesos que son susceptibles de poderse controlar desde el punto de vista del ciclo de vida. Asimismo, también ha de examinarse esto cuando se realice el análisis de aspectos ambientales asociados a las tareas.

8.2.- Listado de tablas

- **Tabla 1:** Composición química nominal de aceros ferríticos para calderas.
- **Tabla 2:** Relación de sustratos y recubrimientos analizados por LCA en el proyecto POEMA.
- **Tabla 3:** Ejemplos para factores de agotamiento abiótico ADF para la caracterización de algunas sustancias.
- **Tabla 4:** Factores para la caracterización de GWP expresados en $\text{kg CO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$.
- **Tabla 5:** Potenciales de agotamiento de ozono en $[\text{kg CFC-11 eq/kg sustancia}]$.
- **Tabla 6:** Medidas de factores de Potencial Creación de Ozono Fotoquímico empleados en caracterizar varios componentes, $[\text{kg C}_2\text{H}_4/\text{kg sustancia}]$.
- **Tabla 7:** Medidas de factores de Acidificación Potencial global empleados en caracterizar varios componentes, $[\text{kg SO}_2 \text{ eq/kg sustancia}]$.
- **Tabla 8:** Ejemplos para factores de Eutrofización Potencial con el fin de caracterizar varios componentes, $[\text{kg PO}_4^{3-} \text{ eq/kg sustancia}]$.
- **Tabla 9:** Valores de factores de caracterización de ecotoxicidad con el fin de caracterizar varios componentes, $[\text{kg}_{\text{eq}} \text{Pb}_{\text{aire}}, \text{Zn}_{\text{agua}}, \text{Zn}_{\text{suelo}}/\text{kg sustancia}]$.
- **Tabla 10:** Composición química típica acero ferrítico P91.
- **Tabla 11:** Composición química típica acero ferrítico P92.
- **Tabla 12:** Composición química típica acero ferrítico VM12.
- **Tabla 13:** Composición química típica acero inoxidable austenítico AISI 347H.
- **Tabla 14:** Composición química típica acero inoxidable austenítico AISI 321.
- **Tabla 15:** Recubrimientos designados para la realización de la tesis y características de los mismos.
- **Tabla 16:** Densidades de los sustratos estudiados.
- **Tabla 17:** Densidades de los recubrimientos estudiados.
- **Tabla 18:** Correlación entre la masa, la densidad y el volumen del sustrato con la altura de un cilindro ($R=2 \text{ cm}$) de unidad funcional de cada tipo.
- **Tabla 19:** Correlación entre la superficie del cilindro de unidad funcional de sustrato, volumen y masa del recubrimiento.
- **Tabla 20:** Datos recubrimiento Ni50Cr.
- **Tabla 21:** Datos recubrimiento CrN/NbN.
- **Tabla 22:** Datos recubrimiento Slurry Al.

- **Tabla 23:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 24:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 25:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 26:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 27:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 28:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12/ acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 29:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H/ acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 30:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321/ acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Tabla 31:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Contribución de proceso. Evaluación daño Human Health. Valor de corte 0,09%.
- **Tabla 32:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Contribución de proceso. Puntuación única. Valor de corte 0,09%.
- **Tabla 33:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,09%.
- **Tabla 34:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,09%.
- **Tabla 35:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 36:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 37:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 38:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.

- **Tabla 39:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 40:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 41:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 42:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 43:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 44:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 45:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 46:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 47:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 48:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 49:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 50:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 51:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 52:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 53:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 54:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.

- **Tabla 55:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico ASI 347H vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 56:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Cambio climático. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 57:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 58:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Emisión atmosférica. Puntuación única. Valor de corte 0,08%.
- **Tabla 59:** Coste en recursos (USD/kg y EUR/kg) de los distintos sistemas sustrato-recubrimiento.

8.3.- Listado de figuras

- **Figura 1:** Componentes de una central térmica convencional de carbón.
- **Figura 2:** Diagrama P-V (presión – volumen) del ciclo de Carnot, T (temperatura) en isolíneas.
- **Figura 3:** Diagrama T-S (temperatura – entropía) del ciclo de Rankine.
- **Figura 4:** Evolución del consumo mundial de carbón en el periodo 1990-2021.
- **Figura 5:** Consumos de carbón en función de su tipo y del sector en el que se utiliza
- **Figura 6:** Diagrama simplificado de una central térmica de carbón.
- **Figura 7:** Diagrama técnico genérico para una planta térmica de carbón.
- **Figura 8:** Curva típica de fluencia o creep para carga constante.
- **Figura 9:** Ejemplo de turbina de vapor y partes principales.
- **Figura 10:** Etapas del mecanismo de formación de óxido cuando existe oxidación debida a gases.
- **Figura 11:** Trazado general representativo de las leyes cinéticas habituales a las que se ajustan los procesos de corrosión a alta temperatura.
- **Figura 12:** Perfil GDOES (Glow Discharge Emission Spectrometry) de acero CrMoV11 1 oxidado en O₂+40% H₂O durante 168 horas a 700°C (profundidad en μm vs AC%).
- **Figura 13:** Proceso para galvanizado en caliente de lotes.
- **Figura 14:** Fotomicrografía del recubrimiento galvanizado por inmersión en caliente
- **Figura 15:** Espesor revestimiento de zinc en borde curvado.
- **Figura 16:** Análisis de ciclo de vida de acero galvanizado.
- **Figura 17:** Esquema de funcionamiento del equipo HVOF.
- **Figura 18:** Equipo de pulverización catódica.
- **Figura 19:** Procesos durante el ciclo de vida e impactos ambientales generados.
- **Figura 20:** Organigrama del Comité Técnico TC-207.
- **Figura 21:** Alcance del ACV.
- **Figura 22:** Espiral Möbius, ejemplo de eco-etiqueta tipo II. Indica que el producto se debe depositar en un punto de recogida selectiva por ser reciclable.
- **Figura 23:** Fases de un ACV.
- **Figura 24:** Pasos abreviados para analizar el inventario.
- **Figura 25:** Etapas de clasificación y caracterización de EICV para una categoría de impacto siguiendo un ejemplo esquemático para la acidificación.

- **Figura 26:** Flujos de relación en intervenciones ambientales, impactos de efectos intermedios (midpoints), impactos de efectos finales (endpoints) y áreas de protección.
- **Figura 27:** Procedimiento general de cálculo del método Eco Indicador 99.
- **Figura 28:** Estructura de cálculo de impactos Recipe 2016.
- **Figura 29:** El ciclo de vida del acero.
- **Figura 30:** Análisis de impacto P91. Caracterización.
- **Figura 31:** Análisis de impacto P91. Evaluación de daño.
- **Figura 32:** Análisis de impacto P91. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 33:** Análisis de impacto P91. Puntuación única.
- **Figura 34:** Contribución proceso P91. Puntuación única.
- **Figura 35:** Red P91. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 36:** Detalle Red P91 para contribución a 1 kg P91. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 37:** Detalle Red P91 para contribución a ferroníquel. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 38:** Detalle Red P91 para residuos de ferroníquel. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 39:** Detalle Red P91 para residuos de 1 kg P91. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 40:** Análisis de impacto P92. Caracterización.
- **Figura 41:** Análisis de impacto P92. Evaluación de daño.
- **Figura 42:** Análisis de impacto P92. Puntuación única por categoría de impacto
- **Figura 43:** Análisis de impacto P92. Puntuación única.
- **Figura 44:** Contribución proceso P92. Puntuación única.
- **Figura 45:** Red P92. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 46:** Análisis de impacto VM12. Caracterización.
- **Figura 47:** Análisis de impacto VM12. Evaluación de daño.
- **Figura 48:** Análisis de impacto VM12. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 49:** Análisis de impacto VM12. Puntuación única.
- **Figura 50:** Contribución proceso VM12. Puntuación única.
- **Figura 51:** Red VM12. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 52:** Análisis de impacto AISI347H. Caracterización.
- **Figura 53:** Análisis de impacto AISI347H. Evaluación de daño.
- **Figura 54:** Análisis de impacto 347H. Puntuación única por categoría de impacto.

- **Figura 55:** Análisis de impacto AISI347H. Puntuación única.
- **Figura 56:** Contribución proceso AISI347H. Puntuación única.
- **Figura 57:** Red AISI347H. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 58:** Análisis de impacto AISI321. Caracterización.
- **Figura 59:** Análisis de impacto AISI321. Evaluación de daño.
- **Figura 60:** Análisis de impacto AISI321. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 61:** Análisis de impacto AISI321. Puntuación única.
- **Figura 62:** Contribución proceso AISI321. Puntuación única.
- **Figura 63:** Red AISI321. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 64:** Sección transversal de Ni20Cr depositado por HVOF después de exposición al vapor durante 10.000h a 650°C.
- **Figura 65:** Micrografía SEM transversal del recubrimiento de CrN/NbN con alto contenido de Nb depositado en superficie de P92 con acabado superficial fino.
- **Figura 66:** Sección transversal SEM de un revestimiento de suspensión de Al depositado sobre P92 después de tratamiento térmico de difusión de 700°C 10 h bajo Ar.
- **Figura 67:** Análisis de impacto P91 + NiCr. Caracterización.
- **Figura 68:** Análisis de impacto P91 + NiCr. Evaluación del daño.
- **Figura 69:** Análisis de impacto P91 + NiCr. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 70:** Análisis de impacto P91 + NiCr. Puntuación única
- **Figura 71:** Contribución proceso P91 + NiCr. Puntuación única
- **Figura 72:** Red P91 + NiCr. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 73:** Detalle Red P91 + NiCr para residuos globales. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 74:** Análisis de impacto P92 + NiCr. Caracterización.
- **Figura 75:** Análisis de impacto P92 + NiCr. Evaluación del daño.
- **Figura 76:** Análisis de impacto P92 + NiCr. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 77:** Análisis de impacto P92 + NiCr. Puntuación única.
- **Figura 78:** Contribución proceso P92 + NiCr. Puntuación única.
- **Figura 79:** Red P92 + NiCr. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 80:** Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Caracterización.

- **Figura 81:** Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Evaluación del daño.
- **Figura 82:** Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 83:** Análisis de impacto P92 + CrN/NbN. Puntuación única.
- **Figura 84:** Contribución proceso P92 + CrN/NbN. Puntuación única
- **Figura 85:** Red P92 + CrN/NbN. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 86:** Detalle Red P92 + CrN/NbN para residuos globales. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 87:** Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 88:** Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 89:** Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 90:** Análisis de impacto P91 + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 91:** Contribución proceso P91 + Slurry Al Puntuación única.
- **Figura 92:** Red P91 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 93:** Detalle Red P91 + Slurry Al para residuos de Al y globales. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 94:** Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 95:** Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 96:** Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 97:** Análisis de impacto P92 + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 98:** Contribución proceso P92 + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 99:** Red P92 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 100:** Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 101:** Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 102:** Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 103:** Análisis de impacto VM12 + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 104:** Contribución proceso VM12 + Slurry Al. Puntuación única.

- **Figura 105:** Red VM12 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 106:** Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 107:** Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 108:** Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 109:** Análisis de impacto AISI 347H + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 110:** Contribución proceso AISI 347H + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 111:** Red AISI 347H + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 112:** Análisis de impacto AISI 321 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 113:** Análisis de impacto AISI 321+ Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 114:** Análisis de impacto AISI 321 + Slurry Al. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 115:** Análisis de impacto AISI 321 + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 116:** Contribución proceso AISI 321 + Slurry Al. Puntuación única.
- **Figura 117:** Red AISI 321 + Slurry Al. Evaluación del daño. Salud humana. Valor de corte para 8,5%.
- **Figura 118:** Análisis de impacto comparativo ferríticos. Caracterización
- **Figura 119:** Análisis de impacto comparativo ferríticos. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 120:** Análisis de impacto comparativo ferríticos. Normalización.
- **Figura 121:** Análisis de impacto comparativo ferríticos. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 122:** Contribuciones de proceso aceros ferríticos P91, P92 y VM12. Evaluación del daño Human Health.
- **Figura 123:** Análisis de impacto comparativo austeníticos. Caracterización.
- **Figura 124:** Análisis de impacto comparativo austeníticos. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 125:** Análisis de impacto comparativo austeníticos. Normalización.
- **Figura 126:** Análisis de impacto comparativo austeníticos. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 127:** Contribuciones de proceso aceros austeníticos AISI 347H y AISI 321. Evaluación del daño Human Health.

- **Figura 128:** Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Caracterización.
- **Figura 129:** Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Evaluación del daño.
- **Figura 130:** Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 131:** Análisis de impacto comparativo aceros ferríticos con recubrimiento. Puntuación única.
- **Figura 132:** Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Caracterización.
- **Figura 133:** Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Evaluación del daño.
- **Figura 134:** Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 135:** Análisis de impacto comparativo aceros austeníticos con recubrimiento. Puntuación única.
- **Figura 136:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Caracterización.
- **Figura 137:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Evaluación del daño.
- **Figura 138:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 139:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + NiCr. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud Humana.
- **Figura 140:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 141:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 142:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 143:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 / acero ferrítico P91 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 144:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Caracterización.

- **Figura 145:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Evaluación del daño.
- **Figura 146:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 147:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + CrN/NbN. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 148:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Caracterización.
- **Figura 149:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Evaluación del daño.
- **Figura 150:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 151:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + NiCr. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 152:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 153:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 154:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 155:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 / acero ferrítico P92 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 156:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 157:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 158:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 159:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 / acero ferrítico VM12 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 160:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Caracterización.

- **Figura 161:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 162:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 163:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H / acero austenítico AISI 347H + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 164:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 165:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 166:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Contribución de proceso. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 167:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 / acero austenítico AISI 321 + Slurry Al. Inventario. Emisión atmosférica. Evaluación del daño Salud humana.
- **Figura 168:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Caracterización.
- **Figura 169:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Normalización.
- **Figura 170:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Puntuación única por categoría de impacto.
- **Figura 171:** Análisis de impacto comparativo procesos de recubrimiento. Puntuación única.
- **Figura 172:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Caracterización.
- **Figura 173:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Evaluación del daño.
- **Figura 174:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 175:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición NiCr. Normalización.

- **Figura 176:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 177:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 178:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 179:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P91 vs deposición Slurry Al. Normalización.
- **Figura 180:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Caracterización.
- **Figura 181:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Evaluación del daño.
- **Figura 182:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 183:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición CrN/NbN. Normalización.
- **Figura 184:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Caracterización.
- **Figura 185:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Evaluación del daño.
- **Figura 186:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 187:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición NiCr. Normalización.
- **Figura 188:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 189:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 190:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 191:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico P92 vs deposición Slurry Al. Normalización.
- **Figura 192:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al.

- **Figura 193:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 194:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 195:** Análisis de impacto comparativo acero ferrítico VM12 vs deposición Slurry Al. Normalización.
- **Figura 196:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 197:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 198:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 199:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 347H vs deposición Slurry Al. Normalización.
- **Figura 200:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Caracterización.
- **Figura 201:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Evaluación del daño.
- **Figura 202:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Normalización por categoría de impacto.
- **Figura 203:** Análisis de impacto comparativo acero austenítico AISI 321 vs deposición Slurry Al. Normalización.
- **Figura 204:** Coste en recursos (USD/kg) de los distintos sistemas sustrato-recubrimiento.

8.4.- Abreviaturas y siglas

ACV	<i>Análisis de ciclo de vida</i>
LCA	<i>Análisis de ciclo de vida (en inglés Life Cycle Assessment)</i>
P	<i>Presión</i>
T	<i>Temperatura</i>
OCDE	<i>Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos</i>
DOE	<i>Departamento de Energía, EE. UU. (en inglés Department of Energy)</i>
NETL	<i>Laboratorio Nacional de Tecnología Energética, EE. UU. (en inglés National Energy Technology Laboratory)</i>
A-USC	<i>Ultrasupercrítico Avanzado</i>
USC	<i>Ultrasupercrítico</i>
PNUMA	<i>Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente</i>
ODS	<i>Objetivos de Desarrollo Sostenible</i>
HDP	<i>Galvanizado en Caliente (en inglés, Hot Dip Galvanization)</i>
ASTM	<i>Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (en inglés American Society for Testing and Materials)</i>
ISO	<i>Organización Internacional de Normalización (en inglés International Organization for Standardization)</i>
CSA	<i>Asociación Canadiense de Estandarización (en inglés Canadian Standards Association)</i>
AASHTO	<i>Asociación Americana de Trenes (en inglés American Association of State Highway and Transportation Officials)</i>
AGA	<i>Asociación Americana de Galvanizadores (en inglés American Galvanizers Association)</i>
IZA	<i>Asociación Internacional del Zinc (en inglés International Zinc Association)</i>
ICV	<i>Inventario del Ciclo de Vida</i>
LCI	<i>Inventario del Ciclo de Vida (en inglés Life Cycle Inventory)</i>
LCC	<i>Coste del Ciclo de Vida (en inglés Life Cycle Costing)</i>
HVOF	<i>Proyección Térmica de Alta Velocidad (en inglés High-Velocity Oxi Fuel Spray)</i>
CVD	<i>Deposición química en fase vapor (en inglés Chemical Vapor Deposition)</i>
PVD	<i>Deposición física en fase vapor (en inglés Physical Vapor Deposition)</i>

<i>HiPIMS</i>	<i>Pulverización Catódica de Magnetron de Alta Potencia (en inglés High Power Impulse Magnetron Sputtering)</i>
<i>EICV</i>	<i>Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida</i>
<i>SETAC</i>	<i>Sociedad para la Toxicología y Química Ambiental (en inglés Society for Environmental Toxicology and Chemistry)</i>
<i>AR</i>	<i>Indicador de Agotamiento de Recursos Abióticos</i>
<i>ADF</i>	<i>Factor de Agotamiento Abiótico (en inglés Abiotic Depletion Factor)</i>
<i>CCI</i>	<i>Indicador de Cambio Climático (en inglés Climate Change Indicator)</i>
<i>GWP</i>	<i>Potencial de Calentamiento Global (en inglés Global Warming Potential)</i>
<i>IPCC</i>	<i>Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (en inglés Intergovernmental Panel on Climate Change)</i>
<i>CFCs</i>	<i>Clorofluorocarbonos</i>
<i>ODI</i>	<i>Indicador de Agotamiento de la Capa de Ozono (en inglés Ozone Depletion Indicator)</i>
<i>ODP</i>	<i>Factor de potencial agotamiento de ozono (en inglés Ozone Depletion Potential)</i>
<i>POI</i>	<i>Indicador de Formación de Oxidantes Fotoquímicos (en inglés Photochemical Oxidants Indicator)</i>
<i>POCP</i>	<i>Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico (en inglés Photochemical Ozone Creation Potential)</i>
<i>AP</i>	<i>Potencial de Acidificación (en inglés Acidification Potential)</i>
<i>AI</i>	<i>Indicador de Acidificación (en inglés Acidification Indicator)</i>
<i>EP</i>	<i>Potencial de Eutrofización (en inglés Eutrophication Potential)</i>
<i>EI</i>	<i>Indicador de Eutrofización (en inglés Eutrophication Indicator)</i>
<i>HTI</i>	<i>Indicador de Ecotoxicidad Humana (en inglés Human Toxicity Indicator)</i>
<i>ATI</i>	<i>Indicador de Ecotoxicidad Acuática (en inglés Aquatic Toxicity Indicator)</i>
<i>TTI</i>	<i>Indicador de Ecotoxicidad Terrestre (en inglés Terrestrial Toxicity Indicator)</i>
<i>HTP</i>	<i>Potencial de Ecotoxicidad Humana (en inglés Human Toxicity Potential)</i>
<i>ATP</i>	<i>Potencial de Ecotoxicidad Acuática (en inglés Aquatic Toxicity Potential)</i>
<i>TTP</i>	<i>Potencial de Ecotoxicidad Terrestre (en inglés Terrestrial Toxicity Potential)</i>
<i>DALY</i>	<i>Años de Vida ajustados por Discapacidad (en inglés Disability Adjusted Life Years)</i>

<i>Pt</i>	<i>Puntos (en inglés, Points)</i>
<i>Mpt</i>	<i>Milipuntos (en inglés Milipoints)</i>
<i>EPA</i>	<i>Agencia de Protección Ambiental de EE. UU. (en inglés Environmental Protection Agency)</i>
<i>TEM</i>	<i>Microscopio Electrónico de Transmisión (en inglés Transmission Electron Microscope)</i>
<i>SEM-EDS</i>	<i>Microscopio Electrónico de Rastreo (en inglés Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)</i>
<i>XRD</i>	<i>Difracción de Rayos X (en inglés X-Ray Diffraction)</i>
<i>MEB</i>	<i>Microscopía Electrónica de Barrido</i>
<i>MFA</i>	<i>Microscopio de Fuerza Atómica</i>
<i>CVD-FBR</i>	<i>Deposición química en fase vapor por lecho fluidizado (en inglés Chemical Vapor Deposition by Fluidized Bed Reactor)</i>
<i>UCM</i>	<i>Universidad Complutense de Madrid</i>
<i>INTA</i>	<i>Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial</i>
<i>CIEMAT</i>	<i>Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas</i>