

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS
Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática



TESIS DOCTORAL

Edificios inteligentes y sostenibles: arquitectura de percepción y control para la gestión de energía

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Óscar Hernández Uribe

Directores

Domingo Guinea Díaz

Matilde Santos Peñas

María C. García Alegre

Madrid, 2016

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática



POLITÉCNICA



**EDIFICIOS INTELIGENTES Y
SOSTENIBLES: ARQUITECTURA
DE PERCEPCIÓN Y CONTROL
PARA LA GESTIÓN DE ENERGÍA**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR

Oscar Hernández Uribe

Bajo la dirección de los doctores

Domingo Guinea Díaz
Matilde Santos Peñas
María C. García-Alegre

Madrid, 2015

Departamento de Arquitectura de Computadores y Automática
Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid

Tesis Doctoral

Edificios inteligentes y sostenibles: arquitectura de percepción y control para la gestión de energía

Autor

Oscar Hernández Uribe

Directores

Dr. Domingo Guinea Díaz

Dra. Matilde Santos Peñas

Dra. María C. García-Alegre

Agradecimientos

Con amor, respeto y admiración a mi hijo Oscar y a mi compañera de vida Graciela, por su acompañamiento, paciencia y energía en este camino.

A mis hermanos Omar, Eligio Gustavo y mi hermana Araceli por compartir un mundo fraterno que nutre el alma.

A mi madre Margarita y a mi padre Natalio mi más profundo agradecimiento por su amor incondicional "padres los amo"

Durante este largo trayecto me ha tocado convivir durante mi estancia en el CAR-UPM CSIC (antes IAI-CSIC) con dos generaciones en la famosa "Casita Roja". Las dos generaciones de extraordinarios compañeros han hecho más agradable la estancia. Wilton, Daniel G., Daniel H., Paulo P., Sonia G., David M., Domingo M., Alessandro, y como segunda generación Juan Pablo, Ericka y Esther, y muchos otros del edificio B, del laboratorio de electrónica, gracias Damián B, todos ellos gente extraordinaria y con un enorme carisma.

En general quiero agradecer también a mis directores que me permitieron formar parte del grupo L.E.R. de CAR-UPM CSIC, Domingo Guinea, Maria C. García-Alegre, y en especial Matilde Santos por su enorme soporte.

¡Gracias a todos por haberme permitido esta inolvidable experiencia, hasta la próxima!

Resumen

El sector de los edificios consume entre el 30% y el 40% de la energía mundial. En el caso de la Unión Europea, para satisfacer las necesidades del usuario, del total de energía usado en este tipo de instalaciones el consumo térmico representa más del 60%.

Por otro lado, el cambio climático, la explosión demográfica, el incremento de la esperanza de vida, y la predicción de que dentro de un par de décadas el 80% de la población se concentrará en ciudades, son factores que exigen un nuevo paradigma que interconecte en tiempo real las redes de energía, agua, transporte, residuos, salud, etc., y gestione eficientemente los recursos, disminuyendo en las próximas décadas los efectos nocivos provocados, entre otras causas, por las emisiones de CO₂.

Una parte de la solución podría estar en el uso de energías renovables, que permiten la generación de calor o electricidad, y son respetuosas con el medio ambiente. Es evidente que también ayudaría una gestión eficiente de la energía. En el panorama energético mundial se están empezando a vislumbrar cada vez más aplicaciones orientadas a facilitar esta gestión, con mayores funcionalidades, motivadas en parte por el continuo crecimiento y reducción de tamaño de los dispositivos electrónicos, con mayores capacidades de procesamiento, almacenamiento y canales de comunicación. Facilitar el acceso y control del consumo de energía desde este tipo de instrumentos al usuario, gestor, o proveedor, es un factor clave para dar soporte a las actividades diarias del ser humano. Es un hecho que este acceso se está viendo influenciados por el desarrollo de estándares y tecnologías de la WWW, donde en el mundo del internet ha permitido interconectar millones de páginas relativas a prácticamente todos los aspectos de la vida moderna.

En este trabajo de investigación se propone e implementa una arquitectura de percepción y control inteligente para la gestión eficiente de la energía en un edificio. Esta arquitectura incluye técnicas de computación suave y algoritmos de aprendizaje automático, además de usar una nueva generación de sensores virtuales que hacen uso de tecnologías de la web semántica. Esta nueva generación de dispositivos hace posible percibir el entorno a través de sensores virtuales y proveer servicios conscientes del contexto, enriqueciendo la percepción y retroalimentación del usuario con información para la toma de decisiones.

La necesidad de representar el conocimiento entre dispositivos o servicios con una semántica para el intercambio de información se ha facilitado mediante el uso de ontologías y tecnologías de la web semántica. Con las ontologías se definen de manera explícita las características y propiedades de los sensores, así como los perfiles de comportamiento y agenda de actividades de los usuarios. El contar con un modelo que interconecte a los diferentes actores involucrados: usuario, gestor y proveedor de la energía, conduce a la búsqueda de correlaciones entre datos provenientes de diversas fuentes, y permite una toma de decisiones inteligentes tanto analíticas como heurísticas. Los algoritmos de aprendizaje automático, al extraer patrones en grandes volúmenes de datos, facilitaron la toma de decisiones mediante la obtención de predicciones que permiten adelantarse a posibles escenarios en los que el estado del entorno puede verse afectado por factores internos (necesidades del usuario) o externos (condiciones meteorológicas).

Esta arquitectura se aplicó a un edificio de consumo de energía casi cero (nZEB), del que se dispone de un prototipo real en las instalaciones del CAR_UPM-CSIC (Arganda, Madrid). El edificio, de dos plantas, cuenta con sistemas de almacenamiento de energía térmica, tanto de calor sensible –sistemas geotérmicos de baja entalpía, en el subsuelo- como de calor latente – uso de materiales de cambio de fase (MCF) unidos a un colector solar situado en el techo del mismo. El exceso de calor puede ser utilizado posteriormente para satisfacer la demanda

térmica del edificio nZEB haciendo recircular un fluido calor-transportador por los muros. Por lo tanto, otra de las contribuciones de este trabajo es el diseño y realización de una barrera térmica dinámica, que adapta el gradiente térmico de los muros exteriores mediante unos tubos de polietileno incrustados en las paredes, gestionando este flujo de calor para reducir el consumo de energía para alcanzar la temperatura de confort en el interior.

Se han analizado en detalle los sistemas térmicos utilizados (colector solar, sistema de almacenamiento de entropía en el subsuelo, y barrera térmica dinámica), así como el control del flujo en el circuito hidráulico que los conecta. En el colector se han estudiado las propiedades ópticas que lo optimizan. Además se ha instalado un sistema híbrido panel fotovoltaico FV/MCF, que aprovecha la radiación solar para producir calor latente mediante el cambio de fase en un bidón con MCF. Por otro lado, se ha dividido el intercambiador de calor del subsuelo en zonas para aprovechar mejor la energía almacenada en él.

Se ha hecho uso de herramientas de simulación para entender el flujo de calor a través de la envolvente, permitiendo observar de manera global su comportamiento y visualizar zonas críticas del diseño y oportunidades de mejora (como reducir pérdidas de calor en invierno). También se han tomado datos reales de experimentos realizados en el prototipo de edificio. Para validar los modelos propuestos y los resultados de simulación se hizo uso de una cámara termográfica para adquirir imágenes durante las diferentes estaciones y en diferentes franjas horarias, cubriendo el comportamiento de la envolvente y puntos clave en el interior del edificio.

Un árbol de decisión activa o no la barrera térmica, según los valores de una serie de sensores virtuales y físicos. El flujo de calor hacia la envolvente puede provenir del colector solar o del subsuelo. En este último caso, un controlador basado en lógica borrosa selecciona la zona del intercambiador de calor que debe utilizarse.

Al comprobar que, después de una configuración inicial del sistema, se abre la posibilidad de crear, en este tipo de entornos, una red de datos inteligible por cualquier dispositivo electrónico, se planteó la necesidad de adquirir más datos que se fusionan con datos provenientes de otras fuentes externas, mejorando así la expresividad, agilidad y flexibilidad en el procesamiento de los eventos. Un beneficio clave de este entorno inteligente es que está basado en estándares y especificaciones abiertas, permitiendo reusar y compartir información con otros recursos compatibles tales como dispositivos móviles o incluso bases de conocimiento.

Este trabajo también contempla el desarrollo de una red sensorial de sensores físicos, virtuales y semánticos, y una interfaz de usuario como soporte funcional de la arquitectura propuesta para la gestión eficiente de la energía en edificios.

La investigación realizada es de carácter multidisciplinar, al requerir conocimientos de diferentes ámbitos como: electrónica, transferencia de calor, ciencias de la computación e inteligencia artificial.

Palabras Clave

Edificio inteligente, nZEB, gestión de energía, arquitectura de percepción, sensor semántico, web semántica, transferencia de calor, barrera térmica dinámica, toma de decisiones.

Abstract

Buildings produce high CO₂ emissions as they consume almost 40% of worldwide energy, and a remarkable percentage of this energy is used for achieving thermal comfort conditions, both in heating and cooling. Thermal comfort is one of the first priorities, as it represents around 65% of building energy consumption. This point is highlighted by government policies and tax incentives aimed at efficient energy management to reduce CO₂ emissions. The European Parliament has adopted guidelines that require public buildings after 2019 and new buildings after 2021 to comply with the regulations to be certified as nearly zero energy buildings (nZEB). In these buildings the annual net balance between energy production and consumption should be close to zero.

Solar energy is the most widely renewable energy all over the World. Solar power is sufficient to cover the thermal comfort demands in medium and low latitude regions. However, the variations in solar radiation, including day-night and seasonal cycles, require thermal energy storage systems (TES) to adjust the thermal demand to the energy production.

Another way of storing energy in a building is by means of a wall envelope. Wherever there is a difference in temperature the heat flows naturally from a warmer to a cooler space. During the summer, heat moves from the outside into the building, and the opposite happens in winter. The excess of heat in summer and the heat losses in winter need to be managed to maintain thermal comfort at low cost. Even more, the heating and air conditioning loads increase by daily and seasonal outdoor temperature variations. In buildings, the wall envelope has been proved to be a key factor to reduce heating/cooling loads. To make better use of the thermal energy, we propose the inclusion of fluid-based heat exchange circuits embedded in the structure by using TES, trying to minimize the energy flow and, at the same time, reach the desired indoor temperature. This work proves that a better design of the external walls with a thermal barrier, with a multi-layer structure composed of at least three layers (insulation-concrete-insulation), provide a significant reduction in the energy consumption and a much better use of the energy to achieve thermal comfort in buildings.

This is one of the main contributions of this thesis, the use of a dynamic thermal barrier. This element, integrated with a solar collector and a low enthalpy geothermal system, has been designed, simulated and implemented in an nZEB prototype building, located in Madrid (Spain). The novelty of current approach is the way it manages the fluid flow between the different thermal systems of the building, including the heating transfer to the thermal barrier. The control of the energy flow between these three systems allows a better management of the thermal energy in the building to meet users comfort demand.

On the other hand, currently energy systems are composed of numerous small-scale distributed power generation sources and storage systems, interconnected in micro-grids, with conventional centralized energy generation modules. Therefore, electric companies are interested in controlling and monitoring all these types of heterogeneous devices connected to the electrical and energy infrastructures. In this context, the Internet of Things (IoT) has emerged as a way to improve the conventional strategies for heating/cooling devices management, where pervasive sensors are used for the automatic control of the energy components, based on user behaviours, profiles, and preferences. This new paradigm improves the efficiency of the thermal energy demand by the experience gathered from the customers. Machine learning algorithms or soft computing techniques are integrated to manage the interconnections among different sources including data provided by user context. These energy monitoring and control schemes are related to the sensing, processing, networking devices and advanced techniques.

Following this approach, in this research a decision-making architecture to manage the capture, storage and use of solar thermal energy is presented. It includes the monitoring and control of the roof solar system, the ground heat exchanger, and the dynamic envelope (thermal barrier) using virtual sensors. These systems are integrated in the nZEB prototype that takes into account the occupant behaviours by means of home and user context virtual sensors. Intelligent control (fuzzy logic) and context information are used to represent and integrate knowledge for controlling the dynamic envelope to reduce the thermal energy use for heating and cooling.

The main contributions of current work is summarized as follows: the analysis of the solar collector simulation and experimental results for different parameters; the flow of the thermal energy when a dynamic thermal barrier is integrated in a building; the whole thermal energy transfer model of the experimental building; the developed of an architecture to control, using virtual sensors, context information, and computational intelligence techniques (decision trees and fuzzy logic), the thermal flow between the energy subsystems of the nZEB building; experimental validation in the building prototype by temperature and presence sensor measurements and wall thermal images.

Keywords

Decision-making architecture; distributed sensor network; dynamic thermal barrier; thermal energy; smart building; nZEB, semantic web

Índice general

Índice de figuras	XIII
Índice de tablas	XVII
Listado de términos y abreviaturas	19
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.	1
1.1. Motivación.	1
1.1.1. Consumo de energía en los edificios.....	1
1.1.2. Sensores pervasivos y tecnologías de la web.....	3
1.2. Planteamiento del problema.	5
1.3. Objetivo general de la tesis.....	9
1.4. Estructura de la memoria de la investigación.....	10
CAPITULO 2. FUNDAMENTOS Y TRABAJOS RELACIONADOS.	15
2.1. Lógica descriptiva.	16
2.2. Ontologías.	18
2.3. Tecnologías de la web semántica.....	21
2.3.1. URI.....	22
2.3.2. RDF/RDFs.....	22
2.3.3. Lenguaje de ontologías web.....	28
2.3.4. SPARQL y SWRL.	28
2.4. Trabajos relacionados.	31
2.4.1. De los sensores inteligentes a los sensores semánticos y datos enlazados.....	31
2.4.2. Uso de ontologías en sensores.....	34
2.4.3. Aplicaciones conscientes del contexto.....	38
CAPITULO 3. SISTEMAS DEL EDIFICIO nZEB.	43
3.1 Comportamiento térmico de la envolvente.....	44
3.2 Edificio nZEB: sistema colector solar-intercambiador de energía térmica-barrera térmica dinámica.....	51
3.2.1 Colector solar.	54
3.2.2 Almacenamiento.	58
3.2.3 Barrera térmica dinámica.....	60
3.2.4 Circuito hidráulico.	61
3.3 Edificio nZEB: sistema híbrido FV/MCF.	63
3.3.1 Material de cambio de fase.....	63
3.3.2 Pruebas experimentales para la determinación de parámetros del MCF.	65

3.3.3	Implementación del sistema híbrido panel FV/MCF.....	69
CAPITULO 4. ARQUITECTURA PROPUESTA.		75
4.1.	Capa de Sensores.	76
4.2.	Capa de Procesamiento y Fusión de Datos.	82
4.2.1	Tratamiento de los Datos.	83
4.2.2	Controlador de Lógica Difusa	85
4.2.3	Sensores virtuales: barrera térmica y contexto usuario/edificio.....	86
4.3.	Capa del Conocimiento.	88
4.3.1.	Sensores semánticos: SSN e integración con otras fuentes de información.	90
4.3.2.	Módulo SPARQL/SWRL.....	94
4.3.3.	Módulo Agente de Contexto/Manejador de Procesos y Eventos.....	96
4.3.4.	Capa de Interface.	98
CAPITULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS EN EL EDIFICIO nZEB.		105
5.1.	Resultados experimentales del sistema colector solar.....	105
5.2.	Resultados experimentales en el intercambiador de calor del subsuelo.	106
5.3.	Resultados experimentales de la barrera térmica dinámica.	108
5.4.	Respuesta del sistema híbrido Termo-Fotovoltaico con Material de Cambio de Fase (FV/Térmico con MCF).	109
5.5.	Edificio nZEB: de un entorno inteligente hacia un modelo de ciudad inteligente.....	113
5.5.1.	Primera aproximación a la ciudad inteligente	115
CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.		119
6.1.	Contribuciones y conclusiones.....	119
6.2.	Trabajos futuros.	122
Referencias.....		125
ANEXO A. OWL – CONSTRUCTORES Y AXIOMAS.		135
ANEXO B. SIMULACIÓN BARRERA TÉRMICA DINÁMICA.		137
B.1	Pruebas con temperatura interior igual a 37 °C (310.15 K).	138
B.2	Pruebas con temperatura interior igual a 30 °C (303.15 K).	142
B.3	Pruebas con temperatura interior igual a 24 °C (297.15 K).	147
B.4	Pruebas con temperatura interior igual a 18 °C (291.15 K).	152
B.5	Pruebas con temperatura interior igual a 12 °C (285.15 K).	157
ANEXO C. ENVOLVENTE: USO DE CÁMARA TERMOGRÁFICA.		163
ANEXO D. PATENTES Y PUBLICACIONES.		169

Índice de figuras

Figura 1. 1. Interfaz de usuario de un prototipo de vivienda autosuficiente presentada en Expo Zaragoza 2008 (a) Flujo de energía durante el día (b) Flujo de energía durante la noche.	2
Figura 1. 2. Esquema ilustrativo de los componentes para reducir el consumo de energía generada para la calefacción y refrigeración. El CS captura energía térmica que transfiere al GHX (1) o a la LTD (2). Cuando la fuente térmica no está disponible, se transfiere energía térmica del GHX a la LTD (3).	7
Figura 1. 3. Aspectos que debe cubrir un entorno inteligente enfocado en este caso a una gestión eficiente de la energía.	9
Figura 2. 1 Triangulo semiótico que ilustra la diferencia entre objetos –referente-, conceptos y signos, y como se relacionan entre ellos para formar un significado.	19
Figura 2. 2 El “pastel de las capas de la Web Semántica”	21
Figura 2. 3 Tripletas para representar información de un piranómetro.	23
Figura 2. 4 Tripleta para representar que “el piranómetro CMP3 tiene un transductor termopilaXYZ”.	25
Figura 2. 5. Código en formato RDF/XML que hace uso de la ontología FOAF.	26
Figura 2. 6 Ejemplo del uso de la ontología FOAF para describir datos personales de una persona. Representación gráfica por medio de tripletas.	27
Figura 2. 7 SPARQL búsqueda del patrón definido por el usuario y extracción en un gran almacén de tripletas.	29
Figura 2. 8 Protégé, interfaz para la realización de consultas en SPARQL.	30
Figura 2. 9 Elementos básicos constitutivos de una medición.	35
Figura 2. 10 Representación céntrica de información o modelo semántico para una medición de temperatura.	36
Figura 3. 1 Comportamiento del gradiente de temperatura. (a) Muro de cemento, (b) Muro de cemento con capas de poliestireno en la cara interior y exterior.	45
Figura 3. 2 Modelo del comportamiento de las temperaturas en el interior de una vivienda y en un muro exterior con poliestireno.	46
Figura 3. 3 Temperatura exterior (real), temperatura interior y temperatura en el muro de cemento de 80 cm sin poliestireno (simuladas).	48
Figura 3. 4 Temperatura exterior (real), temperatura interior y temperatura en la parte central de un muro de cemento de 15 cm revestido con capas de poliestireno de 5 cm (simuladas)...	49
Figura 3. 5 Efecto de variar parámetros de la envolvente en la temperatura interior del edificio.	50
Figura 3. 6 Almacenamiento de calor sensible con apoyo de un panel térmico.	51
Figura 3. 7 Sistemas de geotermia de baja entalpia, horizontal (izquierda) y vertical (derecha)51	
Figura 3. 8 Etapas iniciales (a) Mostrando los tubos de PP del sistema geotérmico horizontal (b) Construcción de la barrera térmica dinámica, mostrando tubos de PP cubriendo uno de los muros (c) Vista de perfil de un muro listo para recibir la colada de cemento.	53
Figura 3. 9 Concepto del edificio nZEB ubicado en las instalaciones CAR-UPM CSIC (Madrid, España).	53

Figura 3. 10(a) Esquema del colector solar con tubos de PP (b) Balance de energía en la superficie del colector solar.	55
Figura 3. 11(a) Radiación medida en las instalaciones del CAR-UPM CSIC durante 10 días en invierno. (b) Simulación de temperaturas para diferentes valores α	57
Figura 3. 12 GHX: distribución de las zonas Caliente, Cálida, Templada y Fría.	59
Figura 3. 13(a) Simulación del muro exterior con elementos finitos, (b) Distribución isotérmica en el muro, (c) Variaciones de la temperatura usando la BTD.	61
Figura 3. 14 Circuito hidráulico que interconecta los subsistemas encargados de capturar energía solar térmica, almacenarla, y usarla en la barrera térmica dinámica.	62
Figura 3. 15 Circuito hidráulico con recirculación del fluido de acuerdo a las válvulas activadas por el circuito eléctrico.	62
Figura 3. 16 Comportamiento del (a) Calor latente vs. (b) Calor sensible.	65
Figura 3. 17 MCF en un contenedor transparente. a) Imagen en escala de grises; b) Imagen térmica para visualizar la temperatura de fusión.	66
Figura 3. 18 Configuración del experimento para determinar las características del MCF. (a) Interface gráfica en LabView (b) Sondas de temperatura en el contenedor cilíndrico.	67
Figura 3. 19 (a) Esquema del contenedor y los sensores; (b) Simulación en elementos finitos; (c) Imagen termográfica del cilindro; (d) curva de temperatura para distintos valores de k y C_p	68
Figura 3. 20 Sistema híbrido ACS.	69
Figura 3. 21(a) Panel FV con temperaturas mayores a los 70°C; (b) Bidón con MCF.	70
Figura 4. 1 Arquitectura propuesta.	75
Figura 4. 2 Componentes principales del nodo sensor.	76
Figura 4. 3 Arquitectura física de la red de sensores para la monitorización y control del edificio nZEB.	77
Figura 4. 4 Distribución de los nodos sensores en el edificio nZEB. (a) Planta baja, (b) Planta alta.	79
Figura 4. 5 Diferentes nodos sensores para la medición de temperaturas y control de electroválvulas.	79
Figura 4. 6 Datos de la estación meteorológica.	81
Figura 4. 7 (a) Sistema experimental real; (b) Distribución de las sondas en el sistema FV/MCF.	81
Figura 4. 8 Series temporales de temperatura y precipitación pluvial de la estación meteorológica CAR-UPM CSIC, año 2011.	83
Figura 4. 9 Controlador de Lógica Difusa para la selección de la zona del intercambiador de energía térmica.	85
Figura 4. 10 Flujo de información del sensor virtual barrera térmica.	87
Figura 4. 11 Entradas de datos al sensor virtual contexto usuario/edificio.	88
Figura 4. 12 Modelo semántico del sensor de flujo del circuito hidráulico.	92
Figura 4. 13 Modelo semántico del sensor de temperatura del circuito hidráulico.	92
Figura 4. 14 Modelo semántico del sensor electroválvula del circuito hidráulico.	92
Figura 4. 15 Modelo semántico del sensor de temperatura de la envolvente.	94
Figura 4. 16 Modelo semántico para un sensor virtual de eventos.	94
Figura 4. 17 Consulta SPARQL para detectar sensores con un valor mayor de 20.	95
Figura 4. 18 Árbol de decisión para activar la barrera térmica.	97
Figura 4. 19 Interface de usuario a través del servidor web del CTR.	99

Figura 4. 20 Ventana del colector solar vista a través de un nodo sensor con servidor web incorporado.....	100
Figura 4. 21 Vista de la ontología usada haciendo uso de Protégé.	101
Figura 5. 1 Temperaturas en la cara interior de la fachada Sur del Colector Solar (azotea) y temperatura exterior (septiembre y octubre).	106
Figura 5. 2 Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX): temperaturas del fluido de entrada a la zona caliente del subsuelo proveniente del colector solar (azul), y temperatura de salida de la zona caliente del subsuelo (rojo).	107
Figura 5. 3 Variaciones de temperatura a lo largo de un año en el intercambiador de calor del subsuelo.	107
Figura 5. 4 (a) Imagen visual de un muro y la ventana en escala de grises. (b) Imagen térmica que muestra la ruta que sigue el fluido calo-portador a través del muro o, lo que conocemos como la barrera térmica dinámica.	108
Figura 5. 5 (a) Sistema experimental FV/MCF; (b) Distribución de las sondas en el sistema FV/MCF.....	109
Figura 5. 6 Variación de temperatura en diversas sondas del sistema FV/ térmico con MCF..	110
Figura 5. 7 Imagen térmica del bidón con MCF, con serpentín para la recirculación del fluido proveniente del panel FV.	110
Figura 5. 8 (a) Imagen de un vídeo donde se observa el cambio de fase del MCF, siendo NTC0 la primera sonda que lo detecta: (b) Fotografía del MCF aún en estado sólido, con la sonda NTC2 al fondo del depósito.	111
Figura 5. 9 MCF con un porcentaje aún en estado líquido (zona superior), y el resto no completamente solidificado.....	112
Figura 5. 10 Evolución de la temperatura en el MCF: Cambios de fase detectados NTC1 y NTC2. NTC6 muestra el enfriamiento del panel fotovoltaico.....	113
Figura 5. 11 Modelo para una ciudad inteligente.	114
Figura 5. 12 Conceptos y relaciones para enlazar aplicaciones en un modelo de ciudad inteligente.	115

Índice de tablas

Tabla 1. 1. Potencial de diferentes energías renovables para cubrir la demanda mundial de energía anual (f. elaboración propia con datos de www.dlr.de y www.bmu.de).....	1
Tabla 2. 1 Recursos y predicados con inferencia limitada, pero también con predicados sin inferencia útiles para proveer información adicional como “ <code>rdfs:seeAlso</code> ”	24
Tabla 2. 2 RDFs proporciona semántica a los recursos y predicados de una tripleta.....	24
Tabla 3. 1 Parámetros del modelo del comportamiento de la envolvente en los muros exteriores.	47
Tabla 3. 2 Rangos de temperaturas en las zonas de almacenamiento.	59
Tabla 3. 3 Datos obtenidos para el MCF.	66
Tabla 4. 1 Resultados obtenidos por algoritmo de regresión logística.....	84
Tabla 4. 2 Predicción del evento lluvia.....	85
Tabla 4. 3 Base de Conocimiento del controlador difuso.	86
Tabla 4.4 Resultado de la consulta SPARQL.	95

Listado de términos y abreviaturas

ABox Caja de Aserciones (del inglés Assertional Box)

Contiene los individuos ubicándolos en la jerarquía de conceptos –relaciones entre individuos y conceptos-.

ACS Agua Caliente Sanitaria.

AET Almacenamiento de Energía Térmica.

AETCL Almacenamiento de Energía Térmica de Calor Latente

AETCS Almacenamiento de Energía Térmica de Calor Sensible

CAN Red de Controladores de Área (del inglés Controller Area Network)

Es un protocolo de comunicaciones desarrollado por la firma alemana Robert Bosch GmbH, basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos.

CALOR LATENTE

Es la energía liberada o absorbida por un cuerpo durante un proceso a temperatura constante. Es decir, durante un periodo de tiempo el cuerpo no experimenta un incremento de su temperatura a pesar de contar o tener una fuente externa para esto.

CALOR SENSIBLE

Es el calor intercambiado por un cuerpo que cambia la temperatura, y algunas variables macroscópicas, pero deja sin cambio otras, tales como el volumen o presión.

CALOR ESPECÍFICO

La capacidad calorífica específica, calor específico o capacidad térmica específica es una magnitud física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. En general, el valor del calor específico depende del valor de la temperatura inicial.

DOLCE Ontología Descriptiva para Lingüística e Ingeniería Cognitiva (del inglés Descriptive Ontology for Linguistic and Cognitive Engineering).

De esta ontología se desprende DUL conocida como DOLCE extra ligera (del inglés DOLCE ultra light).

ENERGIA TERMICA

Es la parte de la energía interna de un sistema termodinámico en equilibrio que es proporcional a su temperatura absoluta y se incrementa o disminuye por transferencia de energía, generalmente en forma de calor o trabajo, en procesos termodinámicos.

IoT Internet de las Cosas (del inglés Internet of Things)

LD Datos Enlazados (del inglés Linked Data)

IEEE 802.11b

Es una modificación del estándar IEEE 802.11 que amplía la tasa de transferencia hasta los 11 Mbits/s usando la misma banda de 2.4 GHz. Estas especificaciones bajo el nombre comercial **Wi-Fi** han sido implantadas en todo el mundo.

MCF Material de Cambio de Fase

nZEB Edificio de Consumo casi Nulo de Energía

OPC UA Arquitectura Unificada de OPC (del inglés OPC Unified Architecture)

Estándar de interoperabilidad para el intercambio de datos seguro y confiable en el sector de automatización industrial. Es independiente de la plataforma y garantiza un flujo continuo entre los dispositivos de múltiples proveedores. Cabe destacar que antes de OPC UA existe lo que se conoce solo como OPC, restringido al sistema operativo Windows.

OGC Consorcio Geoespacial Abierto (del inglés Open Geospatial Consortium)

Es una organización internacional sin ánimo de lucro comprometida en la elaboración de estándares abiertos para la comunidad geoespacial internacional. Estos son hechos a través de consensar procesos y están disponibles libremente para cualquiera que desee mejorar y compartir el mundo de datos geoespaciales. Los estándares son ampliamente usados en el monitoreo del clima, defensa, salud, agricultura, meteorología, desarrollo sustentable, etc.

OWL Lenguaje de Ontologías Web (del inglés Web Ontology Language)

Como nota cultural se decide usar el acrónimo OWL en lugar de WOL, ya que la sabiduría y el conocimiento se suelen representar por un búho.

PFV Panel Fotovoltaico.

Formado por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estándares que son:

- Radiación 1000 W/m²
- Temperatura de célula de 25°C.

RDF Marco de Descripción de Recursos (del inglés Resource Description Framework)

Es un modelo de datos semántico para describir recursos físicos o abstractos por medio de URI's, estableciendo relaciones binarias entre ellos para formar un grafo dirigido.

RDFS Esquema RDF (del inglés RDF Schema)

Da una semántica a los recursos y propiedades expuestas en un modelo RDF. Proporcionando facilidades para describir clases y propiedades que permiten definir

términos básicos y las relaciones entre los términos, ofreciendo inferencia limitada y capacidad de ser procesados por un ordenador.

SE Entorno Inteligente (del inglés Smart Environment)

SPARQL Protocolo SPARQL y Lenguaje de Consultas RDF (es un acrónimo recursivo del inglés SPARQL Protocol and RDF Query Language)

Es un lenguaje estandarizado para la consulta y manipulación de grafos RDF en la WEB o un almacén de datos RDF. Lenguaje clave para el desarrollo de la WS.

SSN Red de Sensores Semánticos (del inglés Semantic Sensor Network)

SWRL Lenguaje de Reglas de la Web Semántica (del inglés Semantic Web Rule Language)

Es un lenguaje propuesto para la WS que puede ser usado para expresar reglas, así como lógica, combinando OWL DL con un subconjunto del lenguaje RuleML. Las reglas son de la forma de una implicación entre un antecedente y consecuente. Es decir, siempre que las condiciones especificadas en el antecedente sean verdaderas, entonces las condiciones especificadas en el consecuente son verdaderas.

TBox Caja Terminológica (del inglés Terminological Box)

Contiene las frases que describen jerarquías de conceptos -las clases, las relaciones entre conceptos-.

TRANSFERENCIA DE CALOR

El calor se transfiere, o se transmite, de cosas más calientes a cosas más frías. Si están en contacto varios objetos con temperaturas distintas, los que están más caliente se enfrían y lo que están más fríos se calientan, tendiendo a alcanzar una temperatura en común. La transferencia de calor puede ser por conducción, convección y/o radiación.

URI Identificador de Recursos Uniforme (del inglés Uniform Resource Identifier)

Es una cadena compacta de caracteres para identificar un recurso físico o abstracto, donde recurso es cualquier cosa que tienen una identidad o representación. Ejemplos familiares incluyen un documento electrónico, una imagen, un servicio

WS Web Semántica

W3C Consorcio de la World Wide Web.

Es un consorcio internacional formado por diferentes organizaciones, públicas y privadas, que trabajan conjuntamente para desarrollar estándares con el fin de favorecer y difundir las buenas prácticas en el desarrollo web.

Capítulo 1

Introducción

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. Motivación.

El uso durante años de combustibles fósiles ha favorecido el incremento del volumen de emisiones de CO₂, ocasionando un daño irreversible al medio ambiente. Uno de los principales retos a resolver durante las próximas décadas consiste en la búsqueda de soluciones a los efectos nocivos del cambio climático. Parte de la solución está en el uso de energías renovables, respetuosas con el entorno, que permiten la generación de calor o electricidad. Estas, aunque lentamente pero cada vez con mayor fuerza, van desplazando el uso de combustibles fósiles que aún representan más del 85% de la energía mundial (Teske, y otros, 2015) (Moriarty & Jia Wang, 2015) (EUROPEAN COMMISSION, 2011). Entre las energía renovables, la energía solar cuenta con una tecnología suficientemente desarrollada y al alcance de todos, y cubre en muchos países la demanda requerida para calefacción y refrigeración (IEA, 2012). Durante los próximos años se prevé una gran demanda de la misma, lo que ha hecho apostar a los gobiernos por su empleo en edificios/viviendas, y a promover competiciones tales como el “Solar Decathlon Europe Competition” para la construcción de una vivienda solar eficiente (Vega, Sergio, 2011). En la Tabla 1.1 se muestra el factor en que la demanda mundial del consumo anual de energía puede llegar a ser cubierta por diferentes fuentes de energía renovable.

Tabla 1. 1. Potencial de diferentes energías renovables para cubrir la demanda mundial de energía anual (f. elaboración propia con datos de www.dlr.de y www.bmu.de).

Solar	Geotérmica	Mareomotriz	Eólica
2850	20	10	200

1.1.1. Consumo de energía en los edificios.

El sector de los edificios consume entre un 30% y un 40% de la energía mundial. En el caso de los países de la UE el consumo térmico representa más del 60% del total de energía usado en este tipo de instalaciones. Conscientes de la necesidad de reducir los efectos del cambio climático, en este sector surgen alternativas tales como “viviendas de diseño verde”, “edificios de consumo nulo de energía” (ZEB), y una aproximación a

éstas como “edificios de consumo casi nulo de energía” (nZEB¹) (Figura 1.1) (Guinea, y otros, 2009). Estos modelos fundamentan sus principios en las aportaciones de energía donde se calcula tanto la aportación de la cuota de las energías renovables como la demanda de energía primaria y emisiones CO₂ (Franco & Fantozzi, 2016) (Jalaei & Jrade, 2015) (Sharafí, ElMekkawy, & Bibeau, 2015) (Eicker, Demir, & Gürlich, 2015) (Atanasiu, Bogdan, 2011) (Guinea, y otros, 2010) (Hernández, y otros, 2009).

Figura 1. 1. Interfaz de usuario de un prototipo de vivienda autosuficiente presentada en Expo Zaragoza 2008 (a) Flujo de energía durante el día (b) Flujo de energía durante la noche.



(a)



(b)

Recientemente el Parlamento Europeo aprobó nuevas directivas donde ordena que los edificios públicos después del 2019 y todos los edificios nuevos a partir del 2021

¹ Las viviendas de energía casi nula combinan el estado del arte en gestión eficiente de la energía, técnicas de construcción, y uso de energías renovables.

deben certificarse como edificios de consumo de energía nulo o casi cero (D'Agostino, 2015) (Boermans, y otros, 2011). La propuesta Europea incluye el uso de energías renovables para el consumo local y la creación de sistemas de generación distribuida cerca del usuario final (micro-redes). En algunos países como USA pretenden de manera paulatina (2030) alcanzar niveles en donde los nuevos edificios sean proveedores de energía (ECEEE, 2011). Se observa una difusión y crecimiento en políticas de certificación e incentivos que impulsan la gestión eficiente de la energía y el uso de energías renovables, ya sea en construcciones nuevas o existentes. Esto es no solamente en la calefacción y aire acondicionado sino, también, perfeccionando los sistemas de iluminación, fachada activa, fuentes de generación renovable y almacenamiento, tomando incluso el ciclo de vida del edificio (Becchio, y otros, 2015) (Huang, 2015) (Mohamed, Hasan, & Sirén, 2014) (Sesana & Salvalai, 2013) (Gordon, 2009).

1.1.2. Sensores pervasivos y tecnologías de la web.

La importancia de la gestión de los recursos energéticos radica en que están ligados directamente al desarrollo económico y social de un país. La explosión demográfica, el incremento de la esperanza de vida y la tendencia a que en poco tiempo el 80% de la población se concentrará en ciudades, exige un nuevo planteamiento en la gestión de los recursos energéticos. Se estima que para el 2050 la población mundial alcance los 9 mil millones de habitantes, y teniendo en cuenta los trabajos de (Yin, y otros, 2015) (Penza & Consortium, 2014) (Weidlich, y otros, 2010) las redes de transporte, energía, e información jugarán un papel crucial. Los núcleos de población se interconectarán mediante redes de sensores para el control del transporte, polución, redes de energía, agua, gestión de residuos, puestos de carga para vehículos eléctricos, etc. Disponer de este flujo de datos en tiempo real permite conocer y optimizar los esquemas de consumo de energía, complementando la solución dada por el uso de energías renovables.

En el mundo de internet, en el cual se han creado más de 15.000 millones de páginas que tratan de prácticamente todos los aspectos de la vida moderna (Shadbolt & O'Hara, 2013), se observa como esta interconexión se verá influenciada por el desarrollo de estándares y tecnologías de la World Wide Web (WWW). Así, las tecnologías de la Web Semántica (**WS**) abren la posibilidad de crear en estas ciudades una red de datos inteligible por cualquier dispositivo electrónico portátil o de escritorio (Feigenbaum, y

otros, 2007) (Berners-Lee, Hendler, & Lassila, 2001). Este soporte para el intercambio de datos, información y conocimiento, es un aspecto clave que abre nuevas posibilidades, creando un entorno consciente del contexto en el que se facilita la identificación de los comportamientos necesarios para explorar y beneficiar al usuario de acuerdo a su marco o situación.

Es un hecho inevitable que este cambio hacia un exigencia que plantea interconectar una diversidad de redes con dispositivos heterogéneos y el surgimiento de una vasta cantidad de estándares de la WWW, sea el detonante para la llegada de un entorno inteligente (SE) o aplicaciones conocidas como “Smart” -smart city, smart grid, smart transport, smart water y smart building-, con servicios personalizados para los usuarios. Este tipo de entornos SE, se identifican también como “computación pervasiva”, o ligados al “internet de las cosas” (IoT), y son conocidos también como Inteligencia Ambiental (AmI). El IoT surge en el sector del manufacturado (Uckelmann, Harrison, & Michahelles, 2011), en donde inicialmente se refuerza más el uso de protocolos y estándares tales como el bus CAN, Bluetooth, ZigBee, o Wi-Fi. La IoT o sensores basados en microprocesadores coinciden a inicios de esta década con el uso de estándares del Consorcio de la World Wide Web (W3C), por lo que pasan a conocerse también como “la web de las cosas” (WoT). En los últimos años el surgimiento de nuevos estándares en la W3C, ha hecho nacer dos nuevos conceptos: “sensores semánticos” y “datos enlazados” (LD). En este último campo las aplicaciones han crecido masivamente², surgiendo lo que se conoce como “sensores de datos enlazados”.

De acuerdo a la definición de SE (Cook & Das, 2005) y AmI (Augusto, 2007), se busca crear un entorno proactivo, rico en sensores y actuadores transparentes integrados, capaces de adquirir y aplicar conocimiento, para apoyar al usuario en sus actividades cotidianas. De manera muy similar, la WoT o IoT se refiere a una nueva generación de sensores, “una red de redes de objetos interconectados con dirección única, basada en protocolos de comunicación estándar”, conectando el mundo virtual de las tecnologías de información con los objetos del mundo real, entregando información relevante de manera automática³. Todos estos términos, en muchos casos intercambiables, en este trabajo de investigación, cuentan con numerosas implementaciones y variaciones plasmadas en gran cantidad de publicaciones que van desde entornos inteligentes en ciudades, edificios, escuelas, hospitales, industria,

² <http://lod-cloud.net/versions/2014-08-30/lod-cloud.svg> (consultado 09/2015).

³ <http://mashable.com/2010/10/13/sensors-internet/> (consultado 09/2015).

oficinas, etc., a una diversidad de tópicos que abarcan la gestión eficiente de la energía, control de electrodomésticos, seguridad y salud entre otros (Perttunen, y otros, 2015) (Friesen & McLeod, 2015) (McEwen & Cassimally, 2013) (Nakashima, Aghajan, & Augusto, 2010). Todas ellas suelen plantear objetivos enfocados al usuario, llevando como ingredientes básicos: redes de sensores y actuadores, algoritmos de inteligencia artificial, y una interfaz que permita retroalimentar al usuario.

Resulta motivante fomentar este tipo de aplicaciones inteligentes en la que se vislumbran una completa interconexión entre ellas, por ejemplo, la “casa inteligente” con “micro redes inteligentes”; las “micro redes inteligentes” con las “ciudades inteligentes”⁴; las “ciudades inteligentes” con “el país inteligente”; el “país inteligente” con el “planeta inteligente”⁵. Dentro de poco el flujo creciente de datos manejados por el mundo pervasivo sobrepasará a la actual publicación de documentos en la Web, cuyo éxito se basa principalmente en compartir unas pocas y sencillas abstracciones lógicas (URL, HTML, HTTP, servicios web) (Aberer, Hauswirth, & Salehi, 2007). Es urgente que se continúe con el desarrollo de métodos y herramientas para gestionar, recuperar y explotar toda esta información (Vanhoof & Lauth, 2010), creando retos en la fusión de datos provenientes en tiempo real de distintas redes de sensores, que permitan de manera automática o semiautomática inferir nuevo conocimiento en un determinado dominio (Botts, y otros, 2007).

1.2. Planteamiento del problema.

Los edificios son pervasivos⁶ en cada aspecto virtual de nuestras vidas, desde dónde trabajamos, vivimos, aprendemos, y crecemos hasta dónde jugamos (Salsbury, 2009). Desafortunadamente, en su gran mayoría, el sistema actual de consumo de energía no fomenta una gestión eficiente de la misma. Por un lado, la única relación que mantiene el proveedor de energía con el usuario es mediante el cobro de la potencia contratada y la energía consumida. Por otro lado, a pesar de que existe una gran cantidad de usuarios que recurre a elementos gestores simples, tipo termostatos, en la mayoría de los casos no los llega a usar correctamente. Incluso le llegan a causar cierta frustración al no percibir una relación positiva beneficio-coste que engloba el confort y la optimización

⁴ <http://www.rwe.com/web/cms/de/2034950/smart-country/modellprojekt/> (consultado 09/2015).

⁵ http://www.ibm.com/smarterplanet/us/en/?ca=v_smarterplanet (consultado 09/2015).

⁶ Se usa el término “pervasivo” para remarcar que pasamos una gran parte de nuestro tiempo en algún tipo de edificio.

de la energía (Meier, y otros, 2010). Por lo que al final, el usuario desconoce cómo gestionar de forma eficiente su consumo de energía, siendo poco consciente de los costes asociados a su confort térmico.

Actualmente en la mayor parte de los países europeos se emiten certificados a edificios y viviendas. Para esto, el personal experto hace uso de programas informáticos y herramientas de simulación que determinan el certificado a extender. Pero una vez que éste se emite no hay una vigilancia en tiempo real de que verdaderamente se esté cumpliendo. Esto deja abiertas una serie de preguntas:

- Si no existe un sistema de gestión de energía ¿qué registros se verifican para garantizar que se está cumpliendo con el certificado o etiqueta asignada?
- Si existe un sistema de gestión eficiente de energía pero éste no cuenta con capacidades de autonomía o con el apoyo de la entidad gestora o proveedora de la energía, ¿qué garantiza que se cumple con esta etiqueta al no encontrarse un responsable?
- Si una compañía de seguros puede ajustar de manera dinámica el coste al usuario de un vehículo acuerdo a sus hábitos de conducción⁷, ¿acaso no se podría ajustar el pago de impuestos por la emisión de gases de CO₂ en un edificio?

A pesar de los avances tecnológicos en las últimas décadas, existen aún muchas carencias que impiden cristalizar aplicaciones prácticas y sencillas para llevar a cabo una gestión eficiente de la energía en los edificios. Una de las razones principales se debe a la heterogeneidad existente de los elementos que componen este tipo de entornos. Estos van desde la infraestructura, la diversidad de usuarios, la creciente variedad de sistemas (por ejemplo, iluminación, HVAC, etc.), e incluso las acciones que pueden ejecutar estos sistemas. Otra razón es la dificultad para correlacionar datos provenientes de estos elementos con factores externos –por ejemplo, condiciones atmosféricas-, que permitan una óptima gestión en el consumo de energía.

Para alcanzar el equilibrio entre el confort y la optimización de la energía no sólo se requiere tener una idea acerca de las *preferencias de los usuarios* (tales como sus típicos horarios de actividades), y abrumarlos con interfaces aisladas de varios sistemas comerciales que necesita manipular para intentar optimizar su consumo de energía.

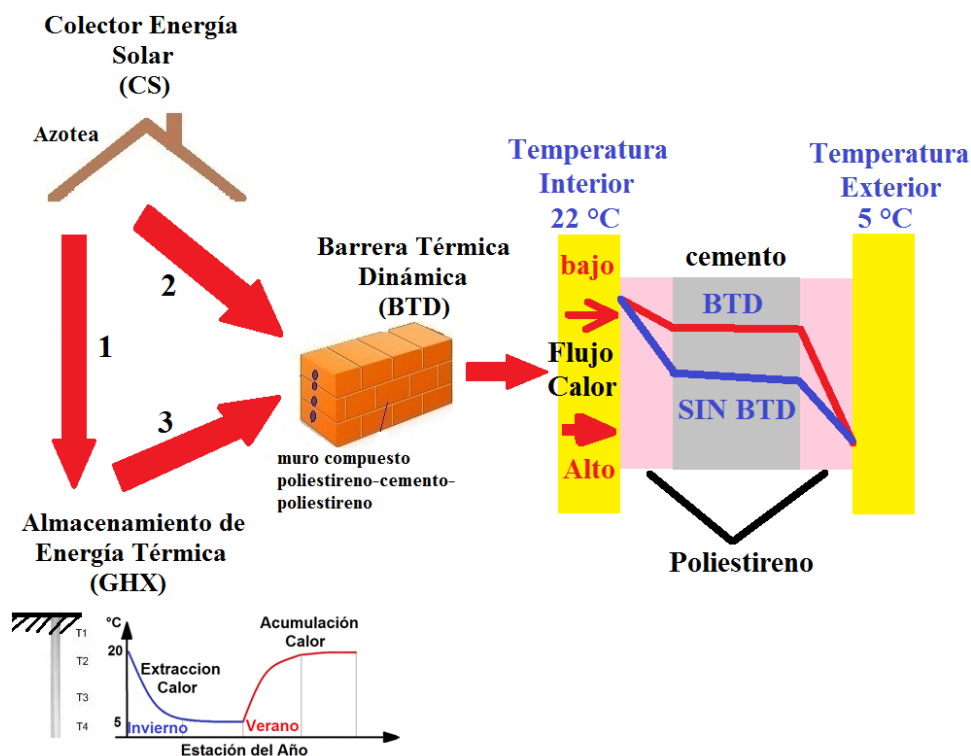
⁷ <http://gigaom.com/2012/05/31/how-your-smartphone-can-lower-your-car-insurance-rates/> (consultado 09/2015).

Además es necesario conocer la interacción entre los sistemas, la estructura y las propiedades del edificio (por ejemplo, su inercia térmica) (Abinger, y otros, 2008), por lo que se hace necesario que esas interfaces que generan almacenes de datos aislados se vayan interconectando.

Este trabajo de investigación conlleva una parte experimental en un prototipo real de edificio nZEB, en donde la arquitectura de percepción y control para la gestión de energía, recae principalmente en cuatro puntos:

- Demostrar mediante modelos y datos adquiridos que es posible manipular el comportamiento de la envolvente de un edificio a lo largo del año. Esta manipulación consiste en modular a través de los muros exteriores el gradiente térmico entre el interior y el exterior. Se demostrará que es posible, mediante un elemento estructural incorporado en la arquitectura del edificio, llamado colector solar (CS), capturar energía térmica en la cubierta, almacenarla en un intercambiador de energía térmica en el subsuelo (GHX), y usarla en lo que denominamos Barrera Térmica Dinámica (BTD) (Figura 1.2).

Figura 1. 2. Esquema ilustrativo de los componentes para reducir el consumo de energía generada para la calefacción y refrigeración. El CS captura energía térmica que transfiere al GHX (1) o a la BTD (2). Cuando la fuente térmica no está disponible, se transfiere energía térmica del GHX a la BTD (3).



- Diseñar un sistema híbrido que haga uso de un material de cambio de fase (MCF) y un panel fotovoltaico (FV). La idea es demostrar mediante modelos y datos adquiridos que es posible acumular energía térmica en el MCF y a la vez reducir la temperatura de la superficie exterior del panel solar. La acumulación de esta energía durante el día puede ser utilizada en la noche para proveer Agua Caliente Sanitaria (ACS).
- Utilizar métodos de computación y algoritmos de aprendizaje automático, para la toma de decisiones a fin de manipular el gradiente térmico dado por la temperatura interior y exterior, con el objetivo de reducir el consumo de energía usado para calefacción y refrigeración.
- Finalmente, teniendo en cuenta la existencia de datos heterogéneos y muchos sensores, utilizar la ontología de red de sensores semánticos (SSN). Con ello, es posible representar no solo los resultados obtenidos de los modelos térmicos y datos provenientes de los procesos de captura, almacenamiento y uso de la energía, sino que también aquellos resultados provenientes de los métodos de computación y algoritmos de aprendizaje automático. Esto facilita la representación de conocimiento en una semántica para el intercambio de información, definiendo de manera explícita las características y propiedades de los sensores.

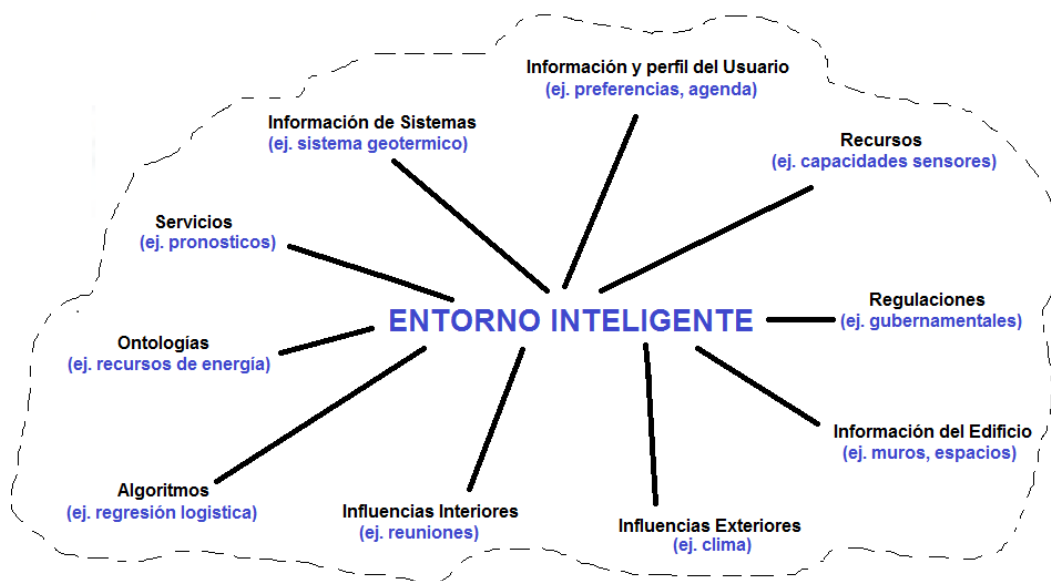
Las herramientas de simulación permiten interconectar simultáneamente múltiples fenómenos físicos para observar de manera global su comportamiento, no sólo para reducir costes sino también visualizar zonas críticas del diseño y oportunidades de mejora (reducir pérdidas de calor en invierno y ganancias en verano). Por otro lado el uso de las herramientas de la web semántica rompe con una heterogeneidad no sólo entre dispositivos sino incluso entre los actores Usuario-Gestor-Proveedor. Esta combinación de edificio con energía casi cero (nZEB) en conjunto con las herramientas utilizadas hacen que emerjan los denominados ***“Edificios inteligentes y sostenibles con arquitecturas de percepción y control para la gestión de energía”***.

Esto conduce a cuestiones del tipo:

- ¿Pueden las tecnologías de la WS utilizarse para reducir la complejidad en la gestión térmica de un edificio y conseguir crear un edificio inteligente y sostenible?
- ¿Puede la arquitectura propuesta en este trabajo cerrar el lazo de percepción-control entre el usuario y el edificio nZEB para una óptima toma de decisiones?

La idea es entonces crear un edificio inteligente y sostenible que facilite llevar a cabo tareas cotidianas de una manera transparente, donde es necesario cubrir una amplia gama de aspectos y facilitar un intercambio de información entre estos (Figura 1.3). Además se pretende que, no resulte complicado de gestionar (Lymberopoulos, Bamis, & Savvides, 2011), sino que a pesar de la reducción de las capacidades cognitivas o de percepción de los usuarios, estas tareas cotidianas pasen inadvertidas (Rogers & Fisk, 2010).

Figura 1. 3. Aspectos que debe cubrir un entorno inteligente enfocado en este caso a una gestión eficiente de la energía.



1.3. Objetivo general de la tesis.

El objetivo principal de esta tesis es el diseño y desarrollo de una arquitectura jerárquica y distribuida de percepción y control inteligente para la gestión eficiente de la energía térmica en un edificio. Para ello se cuenta con una red de sensores comerciales y nodos sensoriales de diseño propio. Sobre estos nodos se encuentra una infraestructura basada en tecnologías de la WS, uso de algoritmos de aprendizaje automático, métodos de computación y uso de herramientas de simulación tales como COMSOL y MATLAB. Con esto se aumenta la percepción del usuario y se retroalimenta con información que le permita evaluar sus acciones.

El objetivo global de la investigación se puede desglosar en los siguientes sub-objetivos:

- Analizar el comportamiento de la envolvente ante condiciones meteorológicas, mostrando las variaciones del gradiente térmico.
- Demostrar mediante modelos térmicos, el funcionamiento del colector solar, y el concepto de barrera térmica dinámica. Explicar el potencial térmico para almacenar energía en el subsuelo.
- Mostrar mediante modelos y datos adquiridos el comportamiento del sistema híbrido material de cambio de fase (MCF) y panel fotovoltaico (FV), como opción para suministrar ACS e incrementar la eficiencia del panel solar.
- Crear una red de sensores apoyada en tecnologías de la Web Semántica (WS) que operen conjuntamente para facilitar al usuario una gestión eficiente de la energía térmica.
- Gestionar los flujos de energía recibidos y almacenados en un edificio, adaptando el perfil de la demanda.
- Optimizar el consumo de la energía en función de la información adquirida, eventos activados por sus ocupantes y condiciones climáticas.
- Organización general del flujo de información en una arquitectura de decisión para gestión óptima de la energía térmica en un edificio.

1.4. Estructura de la memoria de la investigación.

La estructura de este trabajo de tesis doctoral es la siguiente. En este primer capítulo se han presentado tanto la motivación que ha llevado a desarrollar esta investigación como los objetivos generales y específicos de la misma.

En el **capítulo 2**, Fundamentos y Trabajos Relacionados, se presentan los conceptos y tecnologías usados en edificios inteligentes, se incorporan las tecnologías de la web semántica (WS), tras una breve introducción de la lógica descriptiva y de las ontologías. Se presentan ejemplos y se describen algunas funcionalidades de las tecnologías de la WS, como URI's, RDF, OWL, SPARQL, y se incluye brevemente el lenguaje de reglas de la WS (SWRL). En el punto de trabajos relacionados se presenta el estado del arte que relaciona la gestión eficiente de la energía con el uso de las tecnologías de la web semántica, desde la descripción del estándar de la W3C para sensores semánticos y datos enlazados, hasta la representación ontológica de los sensores. También se introduce la importancia del contexto y se incluyen trabajos relacionados con la forma de capturar energía térmica, almacenarla y usarla en una barrera térmica dinámica.

En el **capítulo 3** se describe el edificio de consumo casi nulo de energía (nZEB) y todos los sistemas energéticos incorporados: un colector solar (CS) para capturar energía térmica, un intercambiador de energía térmica en el subsuelo (GHX) o sistema de geotermia de muy baja entalpía, usado para almacenar energía térmica, y, una barrera térmica dinámica (BTD). Aquí se presentan modelos térmicos para mostrar la importancia de tener una BTD, en especial se desarrolla el comportamiento de la envolvente en un edificio nZEB ante cambios climáticos. Se desarrolla el modelo del colector solar (CS) y el modelo de la BTD. Para el GHX se refiere a modelos ya creados presentados en las referencias bibliográficas. De manera similar a la descripción realizada de los sistemas energéticos del edificio nZEB, también se presenta de forma completa un sistema híbrido, basado en un panel FV y material de cambio de fase (MCF). Se muestran conceptos y resultados del sistema, así como ventajas para enfriar durante el día el panel FV y usar durante la noche el calor transferido al MCF. En ambos sistemas surge la necesidad de integrar múltiples datos provenientes de diversas fuentes para llevar a cabo la gestión eficiente del edificio nZEB.

En el **capítulo 4** se presenta la arquitectura de percepción y control inteligente para la gestión eficiente de la energía en un edificio. En esta parte se empieza con la infraestructura requerida para adquirir datos, se describe la red de sensores semánticos y la distribución de los nodos de sensores en el edificio nZEB. Se presentan los métodos de computación, y el algoritmo de aprendizaje automático para la gestión eficiente de la energía térmica. Mediante el uso de la ontología red de sensores semánticos (SSN) se muestra que es posible responder a una serie de preguntas que contienen aspectos relevantes de todo el sistema haciendo uso de SPARQL y reglas SWRL.

En el **capítulo 5** se presentan los resultados y pruebas en los que se muestra la orquestación de todo el sistema de percepción y control, en conjunto, para finalizar con las conclusiones en el **capítulo 6**.

Capítulo 2

Fundamentos y Trabajos Relacionados

CAPITULO 2. FUNDAMENTOS Y TRABAJOS RELACIONADOS.

En este capítulo se presenta una revisión de conceptos clave de esta investigación, así como el estado del arte de la misma, centrándose en:

- La lógica descriptiva como lenguaje formal para la conceptualización de “instancias” tales como individuos, sensores, etc.
- Las ontologías que hacen uso de un lenguaje de lógica descriptiva para el modelado de problemas del dominio.
- Las tecnologías de la Web Semántica (WS) como herramientas para la implementación y pruebas. Se encuentran dentro de las tendencias tecnológicas que más están influyendo en la infraestructura de la información⁸.

Tanto la lógica como la ontología datan de la época de los filósofos griegos, aplicándose desde entonces a la solución de problemas (Hofweber, 2012). Sin embargo, el enlace de las ontologías con la comunidad de la computación y la información tiene lugar hace unas pocas décadas. La lógica aporta la estructura formal y las reglas de inferencia, y las ontologías contribuyen a la definición y descripción de los tipos de componentes que existen en un problema del dominio (Calvanese & Guarino, 2006) (Calvanese, y otros, 2009). Esto permite modelar relaciones entre uno y otros conceptos dentro de un dominio (Allemang & Hendler, 2008).

La visión de la Web Semántica (WS) consiste en extender las capacidades de la web actual en las que la lógica descriptiva y ontologías son claves. En ésta se otorga un significado bien definido a cada enlace existente, haciendo los recursos de la web más accesible no solo a las personas sino a cualquier ordenador. De aquí que muchos sistemas de información modernos pasen a enfocarse del “procesamiento del dato” o “representación céntrica del dato” hacia el “procesamiento del concepto semántico” o “representación ontológica (céntrica de información)” (Grobelnik & Mladenic, 2006). Esto es aplicable a múltiples repositorios que, no sólo permiten enriquecer datos provenientes de una amplia gama de sensores con la finalidad de predecir eventos meteorológicos, sino también enriquecerlos como entidad dentro de un determinado contexto (Gray, y otros, 2011).

⁸ <http://www.gartner.com/newsroom/id/2359715> (consultado 09/2015).

Es importante recalcar que no es objeto de esta tesis doctoral tratar con profundidad la teoría acerca de las ontologías y la lógica descriptiva, sino hacer uso de éstas a través de las tecnologías de la WS para crear un modelo. Este modelo está formado principalmente por datos provenientes de sensores, ubicados en los sistemas de almacenamiento de energía térmica (AET) que son parte de un edificio nZEB. En este trabajo de investigación se presenta una arquitectura jerárquica y distribuida de percepción y control inteligente para la gestión eficiente de la energía en un edificio nZEB. El modelo es una parte medular para identificar conceptos claves y relaciones entre entidades que forman parte de este sistema complejo, edificio nZEB, facilitando la descripción de los sensores y redes de sensores con metadatos, así como representar el conocimiento sobre los eventos de interés observados por la red de sensores.

2.1. Lógica descriptiva.

La lógica descriptiva se desarrolló a mediados de los 80's con la intención de proveer de semántica y técnicas de inferencia, así como formalizar los sistemas basados en redes semánticas y marcos usados hasta entonces (Baader, y otros, 2010). La lógica descriptiva en sus diferentes extensiones está caracterizada por unos conjuntos de constructores que se usan primariamente para describir formalmente conceptos, roles e instancias, así como sus relaciones. Donde los componentes conocidos como TBox y ABox son claves en las aplicaciones de lógica descriptiva.

Cada lógica descriptiva cuenta con una semántica, sintaxis y motores de inferencia. La semántica es el estudio del significado, centrándose en la relación entre significantes tales como palabras, frases, signos y símbolos, y lo que representan. La sintaxis, por otro lado, es el estudio de los principios y procesos por los cuales las sentencias son construidas en lenguajes particulares. Los motores de inferencia están basados sobre reglas y procedimientos para inferir nuevo conocimiento, muchas veces oculto en los grandes volúmenes de datos e información.

En la lógica descriptiva el concepto “*Estación Meteorológica*” puede definirse como una expresión usando otros conceptos como “sistema con sensores de temperatura, humedad y viento”. A la vez “sensor de temperatura” puede componerse de un transductor tal como un “NTC”. En este caso “*Estación Meteorológica*” forma parte del TBox. Por otro lado, si afirmamos que “*Bracer 123*” es en este caso una instancia de

“Estación Meteorológica”, entonces “Bracer 123” forma parte del ABox. Se puede interpretar (**I**) lo anterior como:

Sensor^I

= {Sensor Presion, Sensor Temperatura, Sensor Humedad, Sensor Viento, Sensor Radiacion}

Transductor^I = {Diafragma, NTC, Ultrasonido}

tieneTransductor^I =

{(Diafragma, Sensor Presion), (NTC, Sensor Temperatura), (ultrasonido, Sensor Viento)}

estaciónMeteorologica^I = {(Sensor Temperatura, Sensor Humedad, Sensor Viento)}

A partir de estas escuetas definiciones se pueden crear descripciones de conceptos más complejos como componentes del TBox. Así, se puede generar el siguiente concepto usando el constructor de la lógica descriptiva conocido como “Cuantificador existencial \exists ”:

estaciónMeteorologicaCompleja^I = {(estaciónMeteorologica \sqcap (\exists tiene. microcontrolador))}

El cuantificador existencia \exists se interpreta como que debe haber al menos alguna entidad del tipo que define a su derecha, en este caso “un microcontrolador”. El símbolo \sqcap se refiere a una intersección entre el elemento a su izquierda y el definido a la derecha. En este ejemplo, “estacionMeteorologicaCompleja” se define como la intersección de aquellas instancias creadas por aquellas que forman parte del conjunto “estacionMeteorologica” y “aquellas que cuentan con un *microcontrolador*”.

Para finalizar con el TBox y continuar con el ejemplo supongamos que existe una definición de “dispositivoElectrónico”, como cualquier componente que tenga un “microcontrolador”.

El ABox, se puede definir como un par de estaciones meteorológicas y dispositivos electrónicos, además de aseverar el hecho de que la estación meteorológica “BWS200” cuenta con un microcontrolador:

$$ABox = \left\{ \begin{array}{l} \text{estaciónMeteorologica}(\text{Bracer } 123, \text{BWS200}, \text{LW301}), \\ \text{estaciónMeteorologicaCompleja}(\text{LW301}) \\ \text{dispositivoElectrónico}\{\text{Garmin GPS}, \text{Xbox One}, \text{TPlink83}\}, \\ \text{tienemicrocontrolador}(\text{PIC32}, \text{BWS200}) \end{array} \right\}$$

En el TBox se hizo una definición haciendo uso del cuantificador existencial, por ello el resultado de procesar el TBox con el ABox arrojaría como salida una nueva estación meteorológica compleja y un nuevo dispositivo electrónico, el “BWS200”.

Las ventajas de usar la lógica descriptiva para representar un modelo dentro de un dominio son:

- Por defecto el modelado se hace de manera formal facilitando su interpretación por ordenadores.
- Se cuenta con motores de inferencia y razonamiento, representando información a partir de las afirmaciones creadas por los conceptos y restringidos por los axiomas, de tal forma que se pueden inferir conclusiones (Poli & Obrst, 2010).
- Comparando el TBox con el esquema utilizado para modelar una Base de Datos, el TBox además de usarse en la fase de desarrollo como sucede con el esquema, también se utiliza en tiempo de ejecución para imponer las restricciones expresadas en los axiomas.
- Razonamiento en base a la conocida suposición de mundo abierto (OWA) donde cualquier información no especificada explícitamente se considera desconocida.

2.2. Ontologías.

Una de las definiciones de ontología más conocida es la que se hizo en (Studer, Benjamins, & Fensel, 1998):

Una ontología es una especificación formal y explícita de una conceptualización compartida.

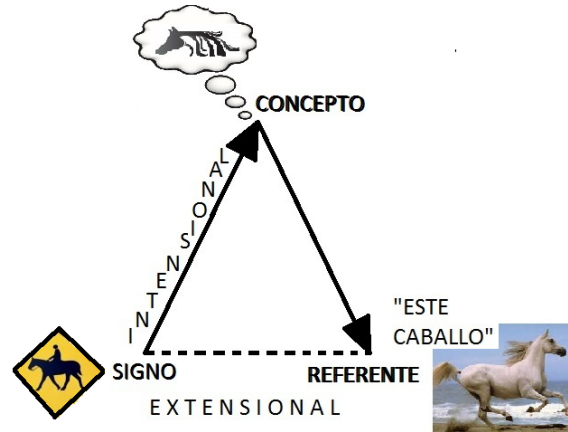
La conceptualización es una interpretación estructurada de una parte del mundo que la gente usa para pensar y comunicarse acerca del mundo (Borst, 1997). En (Guarino, Oberle, & Staab, What is an Ontology?, 2009), se destacan tres aspectos en esta definición.

Para la conceptualización resalta la importancia de ciertos aspectos terminológicos referentes a conceptos y relaciones. Donde el concepto siempre es intencional – abstracciones de la experiencia-, sin embargo, las relaciones son intencionales (conceptuales) o extensionales, opuesta una de la otra.

Como se muestra en la Figura 2.1 y pasando a “una parte del mundo” o dominio conocido como “*Hipódromo*”, se puede empezar a definir relaciones conceptuales unarias como *jockey*, *pura sangre*, etc., y, binarias como “*monta a*”, “*compite con*”, etc., donde definimos *jockey* como del tipo “*persona*” y *pura sangre* del tipo “*caballo*”. Un axioma que hace referencia a que un jockey es quien monta un caballo permite

establecer relaciones extensionales como “Laura *monta a* Affirmed” y Laura en otra carrera de caballos puede montar otro pura sangre, quizás “Kelso”.

Figura 2. 1 Triangulo semiótico que ilustra la diferencia entre objetos –referente–, conceptos y signos, y como se relacionan entre ellos para formar un significado.



El segundo aspecto, “una especificación formal y explícita”, remarca la dificultad que siempre ha existido de poder expresar parte de un conocimiento en términos computacionales. Incluso expresarlo en términos del lenguaje natural resulta imposible puesto que el significado se determina por las experiencias pasadas de la persona, por lo que con frecuencia surgen malos entendidos entre usuarios que tengan diferentes referencias para el mismo término (Ceravolo & Damiani, 2008).

El uso de la lógica descriptiva permite expresar el conocimiento humano en términos computacionales. Haciendo uso de su sintaxis y semántica, y teniendo cuidado en usar definiciones compartidas de conceptos, roles e individuos, así como sus relaciones, se podría eliminar cualquier ambigüedad. En general, si a nivel extensional tenemos individuos *jockey* = {Roberto, Cristina, Tom, Laura}, *puraSangre* = {Affirmed, Kelso, Secretariat} y hechos *monta-a*(Roberto, Affirmed) que, como vimos en lógica descriptiva, se conoce como el ABox, a nivel intencional se deben incluir conceptos, axiomas, relaciones entre conceptos y sus propiedades; es decir, el TBox. Se pueden escribir axiomas para expresar que la relación “*monta a*” es asimétrica e intransitiva, es decir “Tom *monta a* Affirmed” pero “Affirmed *no monta a* Tom”. Mientras que la relación “*compite con*” es simétrica “Tom *compite con* Cristina”, “Cristina *compite con* Tom”; pero también es transitiva, y si “Tom *compite con* Cristina” y “Cristina *compite con* Harris”, entonces “Tom *compite con* Harris”.

Lo anterior puede definirse fácilmente en el Lenguaje de Ontologías Web (OWL) que esta mapeado sobre la lógica descriptiva. Incluso se puede definir el “dominio” y “rango” de una propiedad o relación. Por ejemplo, para la relación “*monta a*” se establecería un axioma para definir que su dominio sea del tipo “*jockey*” y su rango sea del tipo “*puraSangre*”:

“monta a” dominio “jockey”
“monta a” rango “purasangre”
jockey “monta a” puraSangre

Por lo que si encontramos la siguiente relación: “Juan *monta a* Secretariat”, está claro quién es el jockey y quien es el caballo pura sangre.

Este primer y segundo aspecto deja claro que es posible construir modelos que pueden ser más o menos expresivos, dependiendo de las herramientas usadas y del conocimiento propio del usuario. Esto ha permitido la creación de ontologías con niveles muy distintos que van desde el uso de lenguajes formales tales como la lógica descriptiva hasta el simple uso de metadatos, taxonomías, y tesauros. Adicionalmente, durante el diseño de una ontología es clave conseguir un conjunto de compromisos ontológicos (*ontological commitment*), es decir, definir sólo aquellos conceptos y axiomas esenciales en el TBox, y sobre todo no definir en el TBox hechos situacionales (*state of affairs*) del dominio que comprometan la reusabilidad o usabilidad de la ontología. Por ejemplo, que durante una competición femenina se defina que “*jockey*” es del tipo femenino, cerrando así la posibilidad de usarse en una competición mixta.

El tercer y último aspecto se refiere a que una ontología debe tener una “conceptualización compartida”, lo que implica que, independientemente de que se haga uso de la lógica descriptiva o cualquier otro lenguaje formal para definir una ontología con axiomas, propiedades, etc., ésta será inútil si no se captura la semántica específica usada en la terminología de los usuarios que utilizarán la ontología (Guizzardi, y otros, 2009). Es decir, será inútil contar lo que se conoce en lógica descriptiva como TBox a menos que para todos los involucrados en el uso y explotación de la ontología signifique lo mismo.

Para la construcción de ontologías se suele recomendar basarse en una ontología formal ya existente como DOLCE (Giancarlo & Wagner, 2008) (Gangemi, y otros, 2002), y basarse en patrones existentes que permitan reducir arbitrariedades sin exigir técnicas sofisticadas. Adicionalmente, se recomienda hacer un análisis de

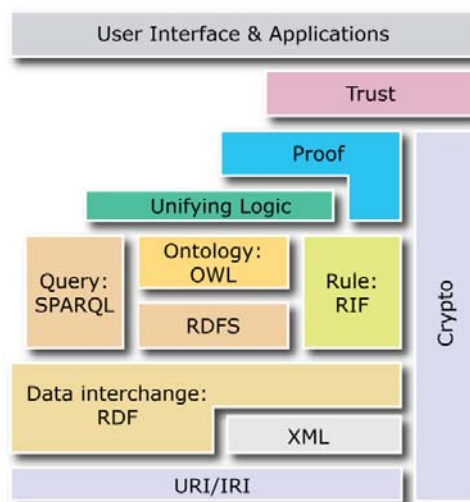
requerimientos para definir las clases o conceptos importantes del dominio incluyendo propiedades de éstas y proveer información, así como las restricciones y/o conocimiento del dominio. Durante la etapa de diseño se puede comenzar por definir los principales conceptos, propiedades y axiomas (TBox), diseño “Arriba-Abajo”, o los individuos (ABox) del dominio, diseño “Abajo-Arriba” (Keet, 2012) (Guarino & Welty, 2009) (Guizzardi G. , 2005) (Borgo & Masolo, 2009) (Varzi, 2007).

En este trabajo de investigación, se utiliza la ontología de redes de sensores semánticos (SSN) y la ontología del tiempo (OWL-TIME), además de entre otras recomendadas por la W3C, enfocada en la definición de conceptos adicionales usados en un entorno inteligente (*Smart Environment, SE*). Se crea de forma natural un modelo, que identifique específicamente aquellos conceptos que la arquitectura propuesta use para la gestión de energía térmica en un edificio nZEB.

2.3. Tecnologías de la web semántica.

La denominada Web Semántica (WS) es una web capaz de describir las cosas de tal forma que las computadoras puedan entenderlas. Existen reglas de sintaxis y una semántica formal sobre las que se construyen las sentencias que describen cosas, permitiendo incluso razonar sobre ellas. Para esto la W3C desarrolló el llamado “*pastel de las capas semánticas*”⁹ formado por un conjunto de estándares, Figura 2.2. Algunos de ellos se describirán a continuación, pues son necesarios para el desarrollo de este trabajo de investigación.

Figura 2. 2 El “pastel de las capas de la Web Semántica”.



⁹ <http://www.w3.org/2007/03/layerCake.png> (consultado 09/2015)

Estas tecnologías de la Web Semántica permiten enriquecer el contenido de los documentos de manera descriptiva de tal forma que se puedan procesar automáticamente y, a la vez, permitan construir sistemas de software más inteligentes para explotar esta información (Davies, Grobelnik, & Mladenic, 2009). En la Web Semántica el enlace de un recurso (persona, libro, página web, etc.) a otro significa algo. Estos enlaces con significado, como se verá más adelante, permiten situar información en contexto. Hoy en día empiezan a surgir ya aplicaciones gestionadas por esta tecnología, como las enfocadas a los sensores¹⁰.

2.3.1. URI.

Las URI¹¹ pueden definirse como localizador de recurso uniforme (URLs, http://en.example.org/wiki/Main_Page), como nombres (URNs, urn:isbn: 978-0123859655 -el libro “Semantic Web for the Working Ontologist”-), o como ambos. El uso de URIs para identificar recursos permite adoptar lo que se conoce como esquema de nombres únicos en el mundo de la WWW, es decir, se da la capacidad de especificar sin ambigüedad el concepto o el significado que se pretende transmitir.

2.3.2. RDF/RDFs.

El elemento principal del modelo semántico creado en RDF¹² es la “sentencia”, representado en una tripleta de la forma Sujeto-Predicado-Objeto (s-p-o), que consta de un recurso, una propiedad y un valor de la propiedad:

- En el sujeto se refiere a la cuestión o cosa que se describe, generalmente es un recurso identificado por un URI.
- El predicado hace referencia a los atributos de la cuestión o cosa que describe. Describe las relaciones entre el sujeto y el objeto, interconectándolos mediante una propiedad tal como: “tiene nombre”, “tiene transductor”, “es escritor”, “le gusta”, etc. El predicado siempre está identificado por un URI.

¹⁰ http://www.w3.org/community/ssn-cg/wiki/SSN_Applications (consultado 09/2015).

¹¹ <http://www.w3.org/TR/2008/NOTE-cooluris-20081203/> (consultado 09/2015).

¹² <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/> (consultado 09/2015).

- El objeto es la cuestión o cosa a la que se refiere con el predicado. El objeto puede ser otro sujeto en cuestión o un valor de la propiedad. El primer caso da una enorme flexibilidad al modelo para establecer enlaces adicionales que proporcionen más información. En el segundo caso, cuando se asigna un valor, se hace uso de tipos de datos primitivos numéricos o cadenas de caracteres.

Este modelo permite descomponer cualquier “conocimiento” en tripletas. Por ejemplo la sentencia “El CMP3 tiene un sensor de termopila y mide la radiación solar” en RDF se puede representar como:

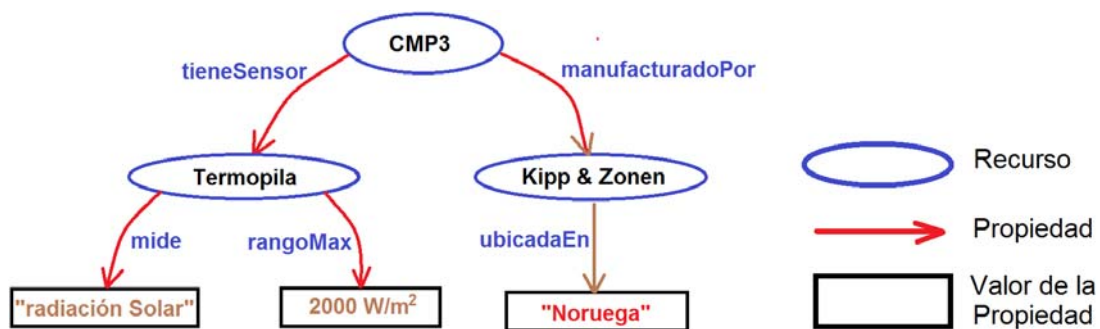
- “CMP3”-“tieneSensor”-“Termopila”
- “Termopila”-“mide”-“radiación solar”

Se puede agregar más información como:

- “CMP3”-“es manufacturado por”-“Kipp & Zonen”
- “Kipp & Zonen”-“está ubicado”-“Noruega”
- “Termopila”-“tiene un rango máximo”-“2000 W/m²”

La representación natural de estas tripletas se muestra en la Figura 2.3, donde podemos notar de forma sencilla que el recurso “CMP3” tiene dos propiedades “tieneSensor” y “manufacturadoPor”.

Figura 2. 3 Tripletas para representar información de un piranómetro.



RDF da plena libertad para declarar incluso cosas absurdas al no ofrecer semántica y capacidad alguna para que una máquina pueda detectarlo. Para evitar esto, con la llegada de RDF schema –RDFs¹³- se da una semántica a los recursos y propiedades expuestas en las tripletas RDF (Tabla 2.1), siendo esto clave para agrupar y diferenciar los recursos que forman el modelo RDF. Proporcionar una estructura a los recursos definidos en RDF permite, a partir de tripletas existentes, inferir nuevas tripletas.

¹³ RDFs es un estándar de la W3C disponible en el siguiente enlace: <http://www.w3.org/TR/rdf-schema/>

RDF/RDF's puede expresarse de varias formas, en este capítulo se muestran un par de ejemplos en donde el formato será el RDF/XML, dado que XML es bastante conocido por tener una amplia utilización en el mundo del internet.

Tabla 2. 1 Recursos y predicados con inferencia limitada, pero también con predicados sin inferencia útiles para proveer información adicional como "rdfs:seeAlso".

Recursos y predicados con inferencia limitada.	Algunos predicados sin inferencia.
rdfs:Resource	rdfs:comment
rdfs:Literal, rdfs:Datatype (rdf:XMLLiteral)	rdfs:label
rdfs:Class	rdfs:seeAlso
rdfs:subClassOf	rdfs:isDefinedBy
(rdf:Property), rdfs:subPropertyOf	
rdfs:domain, rdfs:range	

Como primer ejemplo básico se puede definir lo siguiente: "CMP3" *rdf:type* "Piranómetro Térmico". Así "CMP3" es una instancia del recurso "Piranómetro Térmico", pero a su vez "Piranómetro Térmico" es un tipo de clase. Continuando se dispone de una serie de definiciones de clases, propiedades y entidades, Tabla 2.2.

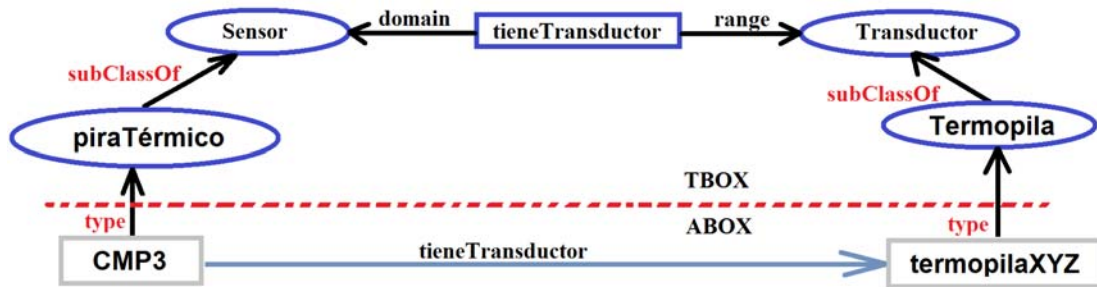
Tabla 2. 2 RDFs proporciona semántica a los recursos y predicados de una triplete.

Definiciones	Explicación
1 <Sensor, rdf:type , Class> <Transductor, rdf:type , Class>	Sensor es un tipo de clase. Transductor es un tipo de clase.
2 <tieneTransductor, rdf:type , Property>	tieneTransductor es un tipo de propiedad.
3 <Termopila, rdfs:subClassOf , Transductor> <piraTérmico, rdfs:subClassOf , Sensor>	Termopila es una subclase de Transductor. piraTérmico es una subclase de Sensor
4 <CMP3, rdf:type , piraTérmico> <termopilaXYZ, rdf:type , Termopila>	CMP3 es una instancia del tipo piraTérmico. termopilaXYZ es una instancia del tipo Termopila
5 <tieneTransductor, rdfs:domain , Sensor> <tieneTransductor, rdfs:range , Transductor>	tieneTransductor tiene como dominio a Sensor. tieneTransductor tiene como rango a Transductor. Es decir, esta propiedad toma como valores a la izquierda aquellos que pertenezcan al tipo Sensor y a la derecha aquellos que pertenezcan al tipo Transductor.

En la Figura 2.4 se representa gráficamente el contenido de la Tabla 2.2. La línea roja punteada marca la diferencia entre lo que se conoce como TBox –parte superior- definido por RDFs, y lo que se conoce como ABox –parte inferior- con las instancias.

Por lo tanto, la relación *tieneTransductor*(*termopilaXYZ*, *CMP3*) es válida. Se puede incluso hacer una inferencia ya que si se sabe que “*CMP3*” es un “*piranómetro Térmico*”, automáticamente “*CMP3*” es un “*Sensor*”, ya que por definición de “*piranómetro Térmico*” es una subclase de “*Sensor*”.

Figura 2. 4 Triplete para representar que “el piranómetro *CMP3* tiene un transductor *termopilaXYZ*”.



En este tipo de aplicaciones es común definir una serie de prefijos usados para no escribir el “URI” completo de los recursos a los que se puede acceder. Se coloca al inicio del documento que define la ontología. Por ejemplo, para no escribir el URI completo para acceder al recurso “`type`” <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#type>, se prefiere definir al inicio de un documento RDF un prefijo `xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"` y solo referirse al recurso como `rdf:type`. De forma similar se define una sola vez `xmlns:rdfs` <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>, para acceder a los recursos enlistados tales como `rdfs:domain` o `rdfs:range`.

Como un segundo ejemplo, un poco más completo, se hace uso de una ontología con mucho éxito, conocida como FOAF (Gangemi & Presutti, 2009), que constituye un patrón para describir información de personas. Esta ontología contiene conceptos que forman un vocabulario mínimo para describir información o datos acerca de una persona (sujeto que se describe o recurso) y como tal se puede especificar en un documento RDF/XML. La Figura 2.5 muestra el código en formato RDF/XML para representar la información de contacto de una persona haciendo uso de esta ontología. Inicialmente se utiliza `rdf:Description`. En este código se representa información de contacto de una persona descrita en “`ex:oscarhdez`”. Para ello, toma prestado los recursos definidos en FOAF, usados para describir datos de la persona tales como su nombre, correo, página web y apellido (atributos del recurso).

Al ser un modelo basado en un estándar de la W3C, se puede hacer uso de una herramienta en línea para validarlo y mostrar su representación gráfica en forma de tripletas¹⁴. Si se corta este código y se pega, en esta herramienta en línea se verán las tripletas mostradas en la Figura 2.6. Con esta representación gráfica es fácil identificar los recursos, propiedades y valores de las propiedades. Además, es fácil de enriquecer aún más este tipo de representación. Así, usando una ontología de geo localización GPS para poner en contacto a personas vinculadas por *foaf:knows* dentro de un rango de distancias menores a 1km.

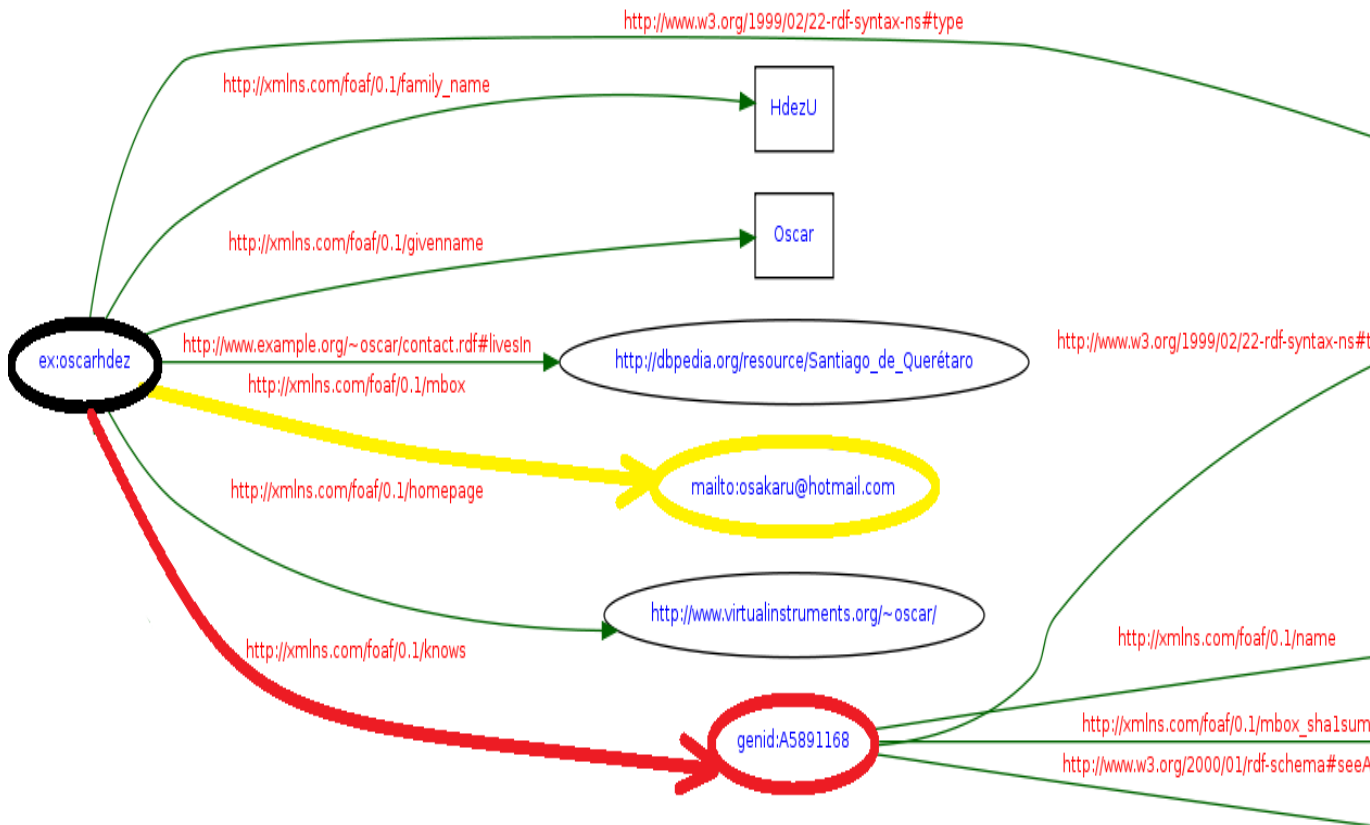
Finalmente, se puede ver que *foaf:knows* apunta a un nodo con un número extraño, llamado “nodo en blanco”, que representan un sujeto o un objeto del cual se desea hacer aseveraciones pero no hay forma de direccionarlo con una URI apropiada (su uso es típico en las redes sociales para representar la identidad real de los miembros).

Figura 2. 5. Código en formato RDF/XML que hace uso de la ontología FOAF.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<rdf:RDF
  xmlns:ex="http://www.example.org/~oscar/contact.rdf#"
  xmlns:foaf="http://xmlns.com/foaf/0.1/"
  xmlns:rdf="http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#"
  xmlns:rdfs="http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#">
  <rdf:Description rdf:about="ex:oscarhdez">
    <foaf:knows rdf:nodeID="Nb6a46deda99241f3b86466fa67d87bb8"/>
    <foaf:homepage rdf:resource="http://www.virtualinstruments.org/~oscar/">
    <ex:livesIn rdf:resource="http://dbpedia.org/resource/Santiago_de_Querétaro"/>
    <foaf:family_name>HdezU</foaf:family_name>
    <foaf:givenname>Oscar</foaf:givenname>
    <rdf:type rdf:resource="http://xmlns.com/foaf/0.1/Person"/>
    <foaf:mbox rdf:resource="mailto:osakaru@hotmail.com"/>
  </rdf:Description>
  <rdf:Description rdf:nodeID="Nb6a46deda99241f3b86466fa67d87bb8">
    <rdf:type rdf:resource="http://xmlns.com/foaf/0.1/Person"/>
    <foaf:name>Domingo</foaf:name>
    <rdfs:seeAlso rdf:resource="http://http://www.car.upm-
csic.es/people/domingo/foaf.rdf"/>
    <foaf:mbox_sha1sum>241021fb0e6289f92815fc210f9e9137262c252e</foaf:mbox_sha1sum>
  </rdf:Description>
</rdf:RDF>
```

¹⁴ <http://www.w3.org/RDF/Validator/> (consultado 09/2015).

Figura 2. 6 Ejemplo del uso de la ontología FOAF para describir datos personales de una persona. Representación gráfica por medio de triplas.



2.3.3. Lenguaje de ontologías web.

El lenguaje de ontologías web (OWL) parte del hecho fundamental de utilizar la habilidad de descripción de RDF y la *capacidad de manejar clases y propiedades estructurales* de RDFs y *extenderlas* de manera relevante. RDF está, en cierta forma, limitado a predicados binarios y, como se analizó al final del punto anterior, RDFs define dentro de su estándar una jerarquía de subclases y propiedades, con definiciones de dominio y rango sobre estas propiedades (Antoniou & Harmelen, 2009). El Lenguaje de Ontologías Web (OWL) permite modelar conceptos del mundo real, entidades y fenómenos capaces de ser procesados por una computadora. OWL está mapeado sobre un lenguaje de lógica descriptiva por lo que hace uso de una serie de constructores y axiomas. Durante el diseño de la ontología limita y guía, no permitiendo cualquier definición de tripletas como se hace en RDF, sino solamente aquellas que respeten las restricciones definidas explícitamente e incluso permite detectar hechos indeseables haciendo uso de motores de inferencia como Pellet, Racer o Fact++. Para conseguir un balance entre su poder expresivo y un soporte de razonamiento efectivo se han creado tres versiones: OWL Full, OWL DL y OWL lite.

Hace unos años salió el nuevo estándar OWL 2 (Cuenca Grau, y otros, 2008). El OWL2 DL se basó en la lógica descriptiva llamada SROIQ (D), más expresiva que el lenguaje OWL DL (SHOIN(D)), dando más propiedades y cualificadas restricciones numéricas. En el anexo A se pueden ver algunos constructores y axiomas que permiten mayor expresividad.

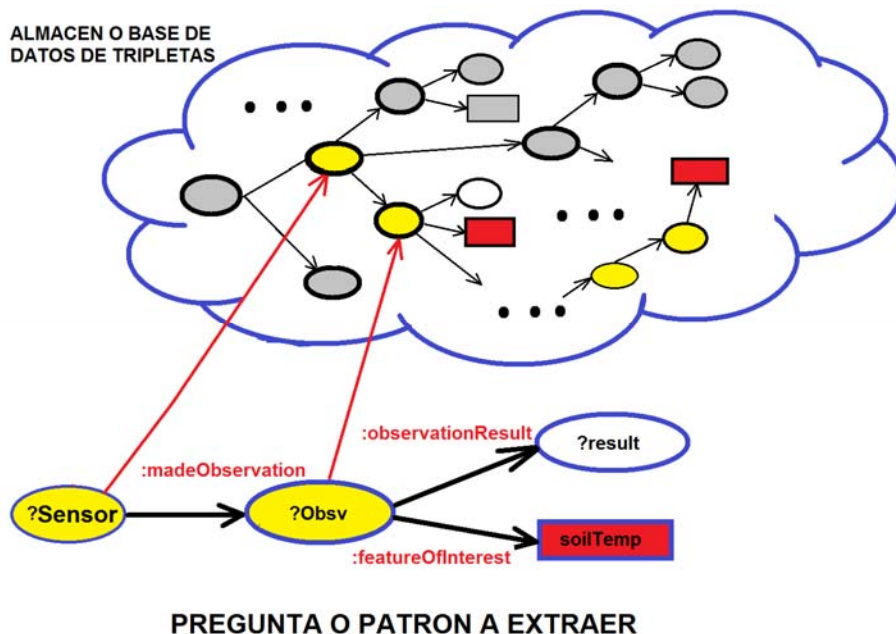
2.3.4. SPARQL y SWRL.

SPARQL¹⁵ es un lenguaje de consultas declarativas basado en HTTP para RDF, propuesto como estándar por el W3C. En la Figura 2.2 se ven las capas que forman parte de la WS, SPARQL se muestra como un elemento para recuperar información que se encuentra al nivel de OWL y RDFs. Como se ha visto en general y con ejemplos concretos, la propuesta de la WS intenta identificar y relacionar recursos. Todo esto da como resultado final una serie de grafos dirigidos que van apuntado a uno u otro recurso, haciendo crecer esta estructura del tipo Sujeto-Predicado-Objeto. SPARQL es

¹⁵ La especificación que describe SPARQL 1.1 se encuentran en <http://www.w3.org/TR/sparql11-query/> (consultado 09/2015).

un lenguaje que de forma natural accede a esta estructura y extrae la información consultada mediante un patrón que el usuario define. En toda esta estructura hace una búsqueda del patrón requerido por el usuario, extrae la información y la despliega al usuario en caso de emparejarse en cualquier tripleta de la estructura mostrada en la Figura 2.7.

Figura 2. 7 SPARQL búsqueda del patrón definido por el usuario y extracción en un gran almacén de tripletas.



Un componente más que se considera clave en esta tesis doctoral es el uso de un lenguaje de reglas para la Web Semántica, conocido como SWRL¹⁶. En donde una regla tiene la forma:

$$\textit{antecedente} \rightarrow \textit{consecuente}$$

Donde tanto el antecedente como el consecuente son conjunciones atómicas, y una vez que el antecedente evalúa a verdadero, el consecuente es verdadero. Un ejemplo sencillo es:

- $\textit{padre}(?w, ?x) \square \textit{hermano}(?x, ?z) \rightarrow \textit{tío}(?w, ?z)$

Donde se lee:

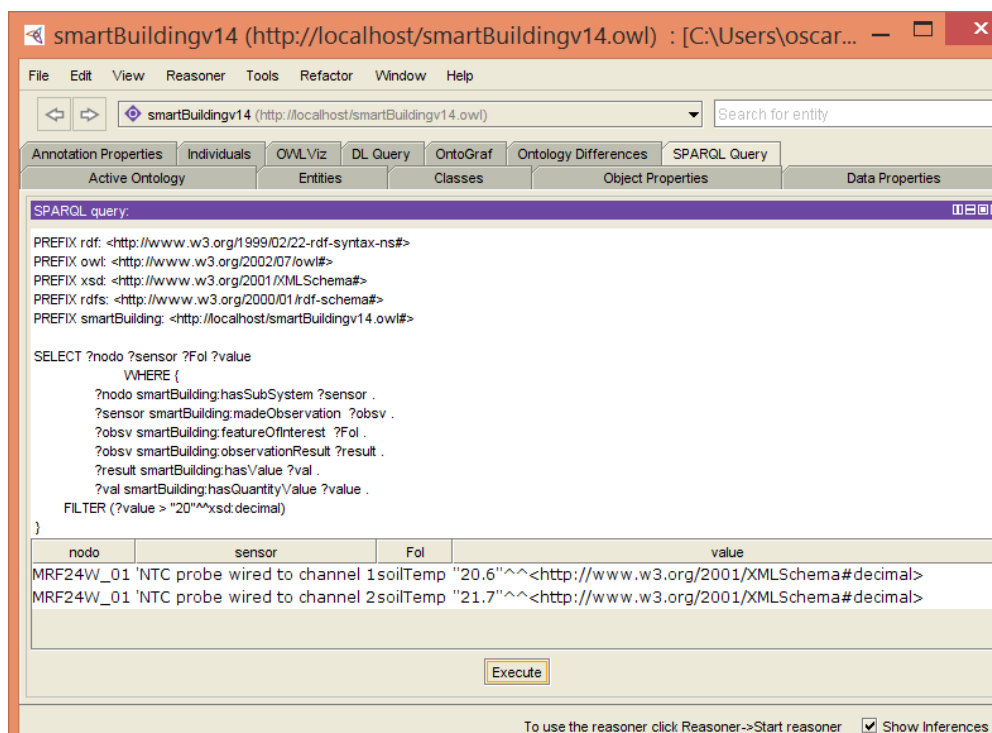
- x es padre de w , y z es hermano de x , entonces z es tío de w .

Mostrar una ontología sobre estas líneas con formato RDF/XML sería difícil de interpretar y de entender o ver su alcance, por muy simple que ésta fuera. Los trozos que se han mostrados lo han puesto de manifiesto. Afortunadamente la creación de

¹⁶ <http://www.w3.org/Submission/SWRL/> (consultado 09/2015).

herramientas como Neón¹⁷ (Suárez-Figueroa, Gómez-Pérez, & Fernández-López, 2012) y Protégé¹⁸ (Ramakrishnan & Vijayan, 2014) apoyan la creación de ontologías permitiendo definir clases, tipos de datos, propiedades de los objetos, datos y anotaciones, y facilitan visualizar su estructura. En la Figura 2.8 se muestra una consulta en SPARQL hecha desde la interfaz de Protégé. En general estas herramientas incorporan una ventana no solo para hacer consultas en SPARQL, sino incluso permiten ejecutar sentencias de lógica descriptiva y hacer uso de motores de inferencia para encontrar nueva información e incorporarla a la ontología.

Figura 2. 8 Protégé, interfaz para la realización de consultas en SPARQL.



Finalmente, SWRL no forma parte explícita de las capas de la Web Semántica, pero se encuentra un notable uso para el desarrollo de estas aplicaciones, como se pone de manifiesto en varios trabajos relacionados que se citan en el punto siguiente.

¹⁷ http://neon-toolkit.org/wiki/Main_Page.html (consultado 10/2015)

¹⁸ <http://protege.stanford.edu/> (consultado 10/2015).

2.4. Trabajos relacionados.

En “Madrid, Ecocity 2012”¹⁹ se mostró la importancia de considerar el uso de las tecnologías de la información y comunicaciones, así como el uso de energías renovables, para impulsar la creación de “ciudades inteligentes” (Corral, 2012). Estas ciudades inteligentes, aparte de reducir los costes totales de los servicios de energía, impulsan un crecimiento económico que crea sostenibilidad (ACEEE, 2011). Los Entornos Inteligentes (*Smart Environment*, SE), contemplan tanto la macro como la micro escala, por lo que van desde la interconexión de ciudades inteligentes que usan redes de sensores y servicios, hasta temas de movilidad, medio ambiente y logística entre otros (Sánchez, y otros, 2013), llegando hasta la integración de aspectos más finos en los objetos de uso diario por las personas.

Detrás del incremento de entornos inteligentes (ciudades, edificios, casas) se encuentra este crecimiento de dispositivos y aplicaciones creados por las grandes compañías²⁰, que abarcan una gran amplitud de sectores. Esta revolución comercial tiene cada vez más fuerza principalmente por el interés de empresas líderes de no quedarse fuera de la batalla en el control y monitorización de todo tipo de dispositivos conectados a la infraestructura eléctrica (Foster, 2010), y por la representación que tienen los edificios en la emisión de gases de CO₂ a nivel mundial.

A continuación, se presentan los antecedentes de lo que se denominó sensor semántico y datos enlazados. Posteriormente se verá el papel de las ontologías y las tecnologías de la WS en los entornos inteligentes. En esta parte se describe el concepto de la representación ontológica de los datos de un sensor, usada en el trabajo de investigación. Finalmente muestran algunos trabajos relacionados, haciendo énfasis en el uso de ontologías y tecnologías de la WS en el mundo de los sensores y aplicaciones conscientes del contexto.

2.4.1. De los sensores inteligentes a los sensores semánticos y datos enlazados.

Después de acuñar el término “SmartHouse” en los 80’s para denominar a las viviendas y edificios con capacidades inteligentes de gestión de los recursos

¹⁹ <http://catttelefonica.webs.upv.es/?p=1440> (consultado 09/2015).

²⁰ <http://www.navigantresearch.com/research/navigant-research-leaderboard-report-smart-city-suppliers> (consultado 09/2015).

energéticos, es a finales del siglo pasado cuando realmente crece el panorama de aplicaciones para una gestión eficiente de la energía. Se consolidan las tecnologías de información y comunicación (TIC's) en este sector, con redes y protocolos bajo estándares internacionales como BACNET, LONWORKS, KNX, ZIGBEE y el bus CAN. Recientemente, también el estándar OPC UA se ha utilizado en este sector, con un acercamiento a los servicios WEB que permite llevarlo hasta los servicios de la Web Semántica (Rohjans, Fensel, & Fensel, 2011).

En este trayecto, el uso del sensor basado ya en un microprocesador empezó a jugar un papel irremplazable como medio para adquirir información sobre el objeto o proceso a ser medido, y es ahí donde crece el interés por conceptualizar y crear modelos que permitieran encapsular o codificar cierta información en una base de datos de conocimiento (Sydenham, 1994).

El concepto de *sensor inteligente*, que acuña el Laboratorio de Propulsion a Chorro (JPL, del inglés Jet Propulsion Laboratory) (Delin, 2002) (Delin & Jackson, 2001), implica el uso de un sensor con una fuerte cohesión entre el hardware, software y servicios. Esta cohesión está marcada por el nacimiento de estándares tales como IEEE 1451, WPAN, o Bluetooth, y el uso de algoritmos de aprendizaje automático.

El IEEE 1451 se centra en reducir la complejidad con la que los diseñadores se enfrentan, para establecer una comunicación digital con los transductores y actuadores, e incorpora metadatos para describir puntos importantes como tipo de señal, acoplamiento, fecha de calibración, etc., por lo que el sensor es capaz de emitir una alarma cuando necesita ser calibrado. Los *algoritmos de aprendizaje automático* permiten adelantarse a posibles escenarios en los que el estado del entorno puede verse afectado por factores tanto internos (necesidades del usuario) como externos (condiciones meteorológicas) (Gu, 2011). La detección de patrones anómalos (Raciti & Nadjm-Tehrani, 2013) (Jakkula, Crandall, & Cook, 2009), reconocimiento de actividades (Crandall & Cook, 2013) (Nair, Ramakrishnan, & Krishnaswamy, 2011), predicción de eventos (Dong & Poh Lam, 2014) y optimización, son algunos de los algoritmos usados con este tipo de sensores.

El OGC es quien describe a inicios de la primer década de este siglo la “*Web de Sensores*” (SWE) como “*una web con entrada a la red de sensores y datos históricos a los que se puede acceder usando protocolos e interfaces estándares*”. Para ello desarrollan una serie de interfaces de servicios web y metadatos para los sensores

basados en XML, tales como el de observaciones y mediciones (O&M), descripción de sensores y proceso asociados con las observaciones (SensorML).

Una aplicación basada en estos estándares es la web de sensores hidrológicos al sur de la cuenca del río Esk, desplegada por CSIRO (Guru, y otros, 2008). En esta se armoniza con estándares geo espaciales, estándares de sensores y alertas tales como el IEEE 1451 “transductor inteligente” (Song & Lee, 2009). Además, se hace uso de una representación ontológica (O&M-OWL) de las series temporales de las observaciones para proveer un modelo más expresivo. Por lo que hace uso de motores para inferir características complejas sobre los datos de los sensores (Henson, y otros, 2009) (Hendler, 2009).

Más adelante, la reciente iniciativa de la W3C *Red de Sensores Semánticos* – Grupo Incubador (**W3C SSN-XG**) se planteó dos objetivos²¹:

1. Desarrollar una ontología para describir sensores y redes de sensores para usar en aplicaciones web de sensores.
2. Estudiar y recomendar métodos usando ontologías para semánticamente habilitar el desarrollo de aplicaciones de acuerdo a estándares disponibles tales como los de la Web de Sensores (SWE) del OGC.

En esta iniciativa se ha creado la ontología de la red de sensores semánticos (SSN). La ontología SSN se puede enfocar a cualquiera (o una combinación) de las siguientes perspectivas: de sensor, de dato u observación, de sistemas, y de características y propiedades. En esta ontología el sensor no se restringe a un dispositivo de medición físico, mediante la clase “sensor” se provee la estructura para representar un objeto concreto de detección y mediante la clase “observación” se provee la estructura para representar un valor único atribuido a una sola propiedad por un sensor particular.

La ontología SSN se alineó a la ontología *DOLCE ultra lite* (**DUL**) y se agregó el núcleo del patrón *Estímulo-Sensor-Observación* (**SSO**) (Compton, y otros, 2012) (Janowicz & Compton, 2010). Por lo anterior, varios módulos conceptuales se han construido sobre este patrón para cubrir conceptos clave de los sensores y facilitar información espacial, temporal y temática, esencial para descubrir y analizar datos de sensores (Broring, y otros, 2012).

La propuesta más reciente de datos enlazados (LD) surge dentro de la Web Semántica, consistiendo en un conjunto de técnicas para la publicación de datos

²¹ <http://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/XGR-ssn-20110628/> (consultado el 09/2015).

estructurados sobre la WWW usando formatos estándares e interfaces, resultando sencillo combinarlos con otros datos enlazados para generar nuevo conocimiento (Wood, y otros, 2013). Aquí es necesario proporcionar enlaces a las instancias de una fuente con otros datos ‘externos’, basado en el conocimiento previo (la vinculación **DBpedia**²² a **Wikipedia** para extraer información estructurada RDF/RDFs), identificadores de recursos únicos (números de ISBN o direcciones http), o búsqueda de patrones (nombre, latitud, y longitud para enlazar a **Geonames** a **DBpedia**) (Parundekar, Knoblock, & Ambite, 2010). Uno de los principales objetivos es hacer disponibles los datos a la mayor cantidad de usuarios posible a través de la web, mediante unos sencillos principios²³, conociéndose como datos enlazados abiertos (LOD). Las aplicaciones reales que ya hacen uso de estas tecnologías crecen de forma exponencial, como se muestra su evolución en los diagramas existentes de LOD entre el 2007²⁴ y el 2014²⁵.

2.4.2. Uso de ontologías en sensores.

Los Entornos Inteligentes son cada vez más una realidad tangible en una amplia variedad de sectores, como consecuencia del continuo crecimiento de dispositivos con mayores capacidades de procesamiento y conectados a la red de redes con interfaces y algoritmos más sofisticados. En el sector de la energía este tipo de entornos inteligentes busca, entre otras cosas, clarificar el grado de interacción que se da entre los diferentes elementos que forman la cadena de suministro –producción/captación, almacenamiento, distribución y uso- eliminando las barreras impuestas por una heterogeneidad semántica. El uso de tecnologías de la WS y ontologías facilitan esto, agregando semántica a los datos y representándolos en un modelo RDF. Es decir, reducen el obstáculo de los diferentes *modelos conceptuales* que comunican y representan la cadena de suministro en el mundo real, adaptándose entre ellos al comportamiento de los usuarios y condiciones cambiantes del entorno.

La Figura 2.9 muestra los elementos básicos constitutivos de una medición. Pasar de aquí a una representación ontológica de las mediciones hechas por sensores no es una tarea trivial. Principalmente porque las raíces etimológicas de la medición tiene

²² <http://wiki.dbpedia.org/>

²³ <http://www.w3.org/DesignIssues/LinkedData.html>

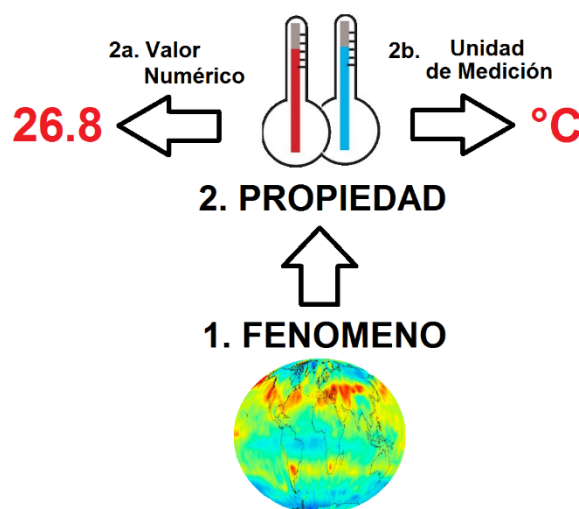
²⁴ <http://lod-cloud.net/versions/2007-05-01/lod-cloud.png>

²⁵ <http://lod-cloud.net/versions/2014-08-30/lod-cloud.png>

marcados dos significados, una connotada descripción objetiva profundamente influenciada por el modelo Euclidiano de la Geometría, y una evaluación subjetiva (Mari L. , 2003). Esto se refleja en la teoría representacional de la medición, que se nutre de dos componentes principales: un marco filosófico empírico y un método matemático de teoremas de representación.

En las aplicaciones del mundo real se requiere una teoría de la medición que no sea tan abstracta (Frigerio, Giordani, & Mari, 2010). Es importante no sólo representar los fenómenos observados por símbolos sino incluir cuestiones ontológicas que pueden ser analizadas para mejorar la comprensión sobre el mundo real, tales como: “¿Qué puede ser observado?, o “¿Cómo las observaciones están relacionadas con la realidad?” (Kuhn, 2009). Una de las propuestas consiste en modelar un sistema de medición para enlazar la teoría de la medición, desarrollada en términos representacionales, y la práctica de la medición, codificada en documentos estándares tales como el vocabulario internacional de la metrología. Este distingue que el objeto actual bajo medición no es el sistema sino una propiedad individual denominada *mensurando*.

Figura 2.9 Elementos básicos constitutivos de una medición.

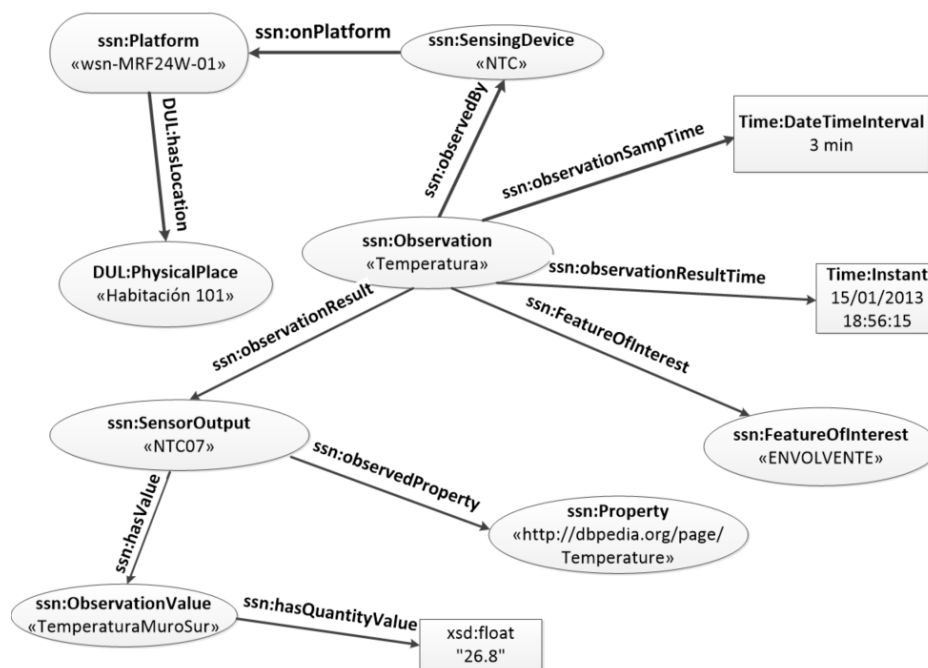


Las entidades, la medición como proceso, el sistema bajo medición, las propiedades generales e individuales, y los valores de las propiedades, constituyen la ontología operativa sobre la cual la ciencia de la medición está fundamentada (Mari L. , 2011). Estas propiedades de los objetos y cómo varían en el tiempo son temas fundamentales de la ciencia (Masolo, 2010); propiedades y unidades tales como la longitud de un barco

medido en metros son vitales para las ciencias exactas y la ingeniería (Rijgersberg, van Assen, & Top, 2011).

La principal razón del uso de sensores es llevar a cabo *observaciones* detectadas, sobre alguna característica de interés mediante estímulos producidos en el propio entorno. Éstas, ya sea dentro del método científico o desde el punto de vista filosófico, tienen como objetivo tanto filtrar información recabada como aprender más sobre algún fenómeno. En la Figura 2.10, se hace uso de la “*representación céntrica de información o representación ontológica*” para representar la información de un sensor de temperatura. Para esto se aplica la ontología de sensores semánticos (SSN) y la ontología formal “DOLCE Ultra Light” (DUL). Este tipo de representación en tripletas está basada en una observación, definida en la ontología SSN como una situación que muestra una característica observada, una propiedad determinada, un sensor, un método de medida, y un valor observado para la propiedad.

Figura 2. 10 Representación céntrica de información o modelo semántico para una medición de temperatura.



Para llevar a cabo esta observación se cuenta con un dispositivo para medir (ssn:SensingDevice), situado sobre una plataforma (ssn:Platform) y esa plataforma existe sobre una ubicación (DUL:PhysicalPlace). Para determinar la “temperatura” se usa el dispositivo “NTC” que existe sobre la plataforma “wsn-MRF24W”, ubicada en una habitación del edificio. Así, definiendo las relaciones entre las entidades y las

propiedades, se genera información de contexto, y al procesarla a nivel computacional de forma automática se facilita la creación de un entorno inteligente.

Existen trabajos sobre este tema publicados sobre todo en actas de congresos nacionales e internacionales, como el taller “Web de Sensores Semánticos”²⁶. En estos se observa que este tipo de tecnologías encuentran un abanico de posibilidades de aplicación no sólo en las redes de sensores sino también como una atractiva herramienta para gestionar el uso de la energía y de recursos renovables a través de las ontologías. La casa de la Opera de Sídney utiliza tecnologías de la WS para conectar un modelo basado en el estándar internacional conocido como Clases Fundamentales de la Industria (IFC) con bases de datos existentes con el objetivo de brindar servicios para la gestión de los recursos del edificio (Schevers, y otros, 2007).

En particular, algunos trabajos que hacen uso de este tipo de representación en los que la gestión de la energía es un punto clave son los de (Bonino, Corno, & Razzak, 2011), así como los que van más allá e integran información relativa a las partes del edificio (Vinagre Díaz, Wilby, & Rodríguez González, 2013) (Dibley, y otros, 2012), y sistemas de energías renovables contenidos (Kofler, Reinisch, & Kastner, 2011) o modelos de energía (Chee Tahir & Bañares Alcantara, 2012). Un par de estudios que hacen una revisión exhaustiva sobre cómo estas tecnologías aportan soluciones en el sector de los edificios para la gestión eficiente de la energía se encuentra en (Abanda, Tah, & Keivani, 2013) (Raisul Alam, Bin Ibne Reaz, & Alauddin Mohd Ali, 2012).

Finalmente, cabe destacar trabajos relacionados muy cercanos al edificio nZEB sobre el que se realiza la experimentación en esta Tesis. En (Thiele, Sant, & Pilon, 2015) se hacen pruebas incrustando material de cambio de fase micro encapsulado sobre los muros, reduciendo y retardando de forma sustancial la carga térmica sobre el edificio. Especialmente siguiendo el enfoque de Krecke (Patente nº US 2,012,026,109,1A1, 2012) como aquí se hace para el edificio nZEB, se presentan trabajos muy relacionados en (Krzaczek & Kowalczyk, 2012) (Krzaczek & Kowalczyk, 2011). En estos, un modelo 3D por elementos finitos se centra en el comportamiento de la barrera térmica dinámica donde algoritmo de control se usa para simular condiciones reales de trabajo. En estos trabajos se muestra:

²⁶ <http://www.w3.org/2005/Incubator/ssn/wiki/Events>

- Un diseño óptimo del muro externo, donde se concluye que la barrera térmica debe contar con al menos tres capas (poliestireno-cemento-poliestireno).
- La barrera térmica dinámica reduce la demanda de calefacción y enfriamiento en al menos tres veces comparada con los métodos de aislamiento tradicional en los muros.

2.4.3. Aplicaciones conscientes del contexto.

Aparte de contemplar características tales como el control remoto de dispositivos, sus protocolos de comunicación, uso de algoritmos de aprendizaje automático, estándares y regulaciones de redes de comunicación, en los SE el contexto ha pasado a cobrar una enorme relevancia. En este tipo de aplicaciones es importante recolectar información acerca de las entidades relevantes para el entorno tales como usuarios, lugares y objetos.

El reconocimiento del contexto permite una cooperación entre los sensores, dispositivos y objetos que forman parte del entorno. En este sentido se define contexto como cualquier información que pueda ser usada para caracterizar la situación de una entidad, donde entidad puede ser una persona, lugar, o cualquier objeto físico o computacional. Ahora bien, como tipos de contexto se pueden tener, entre otros, la *localización* (posición), *identidad* (perfil del usuario), *tiempo* (secuencia de eventos), *actividad* (trabajando), *entorno* (variables meteorológicas) y *recursos* (tipo de dispositivos). De aquí pasamos a una segunda definición, las aplicaciones conscientes del contexto. Es decir, aquellas que una vez que identifican el contexto proporcionan información relevante para ejecutar determinadas tareas, ya sea con o sin apoyo del usuario.

Algunos trabajos de investigación relacionados con este tipo de tecnologías donde el contexto cobra gran importancia son: (López, y otros, 2015) (Donohoe, Jennings, & Balasubramaniam, 2015) (Albreshne, Lahcen, & Pasquier, 2014) (Fernández-Montes, y otros, 2014). En la creación de entornos inteligentes y gestión eficiente de la energía en la domótica, contemplando necesidades y contexto del usuario, se encuentran los trabajos de: (Sommaruga, Formilli, & Rizzo, 2011) (Valiente-Rocha & Lozano Tello, 2010) (Bonino, Castellina, & Corno, 2008), y propuestas para extender la ontología SSN o enriquecerla para crear aplicaciones conscientes del contexto en (Ploennigs,

Schumann, & Lécué, 2014) (Cabral, Compton, & Müller, 2014) (Leggieri, Passant, & Hauswirth, 2010).

Estos trabajos comparten la visión de que un uso apropiado de la información puede agregar servicios con conocimiento en múltiples contextos siempre y cuando haya un claro entendimiento mutuo entre las entidades que forman parte de este entorno. Para esto cabe destacar que hacen uso de diversas ontologías, por ejemplo, en el caso de la gestión eficiente de la energía en un edificio se encuentra la utilización de ontologías en:

- Materiales de la envolvente, proporcionando información de los muros y ventanas.
- Perfiles de usuario, información relevante que permita identificar entre otras cosas su edad, gustos y necesidades.
- Energías renovables, con información de los sistemas usados.
- Sensores, para caracterizar sus capacidades y funciones.
- Unidades de medida.

En resumen, el uso de las tecnologías de la Web Semántica en conjunto con las ontologías permite interconectar de una manera simple una diversidad de dispositivos heterogéneos y representar la información dentro de un *contexto semántico* (Corcho & García Castro, 2010) (Compton, y otros, 2009). El uso de ontologías permite codificar una descripción del mundo dentro de un dominio con algún propósito, por ejemplo, para definir de manera explícita las características y propiedades de un sensor mediante una conceptualización compartida entre las entidades involucradas. El reto de los SE es ajustar dinámicamente los sistemas de acuerdo al entorno y actividad del usuario, haciendo uso de las funciones soportadas por los dispositivos y conceptualizada en una ontología.

Capítulo 3

Sistemas del Edificio nZEB

CAPITULO 3. SISTEMAS DEL EDIFICIO nZEB.

Los sistemas de almacenamiento energía térmica (AET) han despertado un enorme interés en los últimos años dentro del sector de los edificios. La intención de estos es reducir el empleo de energía de alta calidad para climatización o agua caliente sanitaria (ACS). En este capítulo se verán dos casos de uso que abarcan este tipo de sistemas: un sistema de almacenamiento de energía térmica de calor sensible (AETCS) y un sistema de almacenamiento de energía de calor latente (AETCL).

El sistema de AETCS es una parte del edificio nZEB, quedando enmarcado dentro de los principales componentes que veremos más adelante: colector solar (CS), intercambiador de energía térmica del subsuelo (GHX) y barrera térmica dinámica (BTD). El almacenamiento de calor sensible se refiere al uso de un sistema de geotermia de muy baja entalpia o intercambiador de energía térmica del subsuelo. Este acumula la energía en el subsuelo que se usará en la envolvente de un edificio nZEB. El muro exterior como parte de la envolvente se encargará de usar la energía térmica almacenada o en su defecto la energía capturada por un elemento estructural incorporado como parte de la arquitectura del edificio nZEB, el colector solar.

El sistema AETCL está basado en un sistema híbrido compuesto por un panel fotovoltaico (FV) y un material de cambio de fase (MCF). La temperatura exterior y radiación solar influyen fuertemente en la eficiencia de un panel FV. Este sistema híbrido permite por un lado ahorrar energía en agua caliente sanitaria y por el otro mejorar la eficiencia del panel FV.

En especial, como el sistema AETCS está relacionado directamente con el edificio nZEB se verá primeramente un apartado especial para entender el comportamiento de la envolvente en el edificio nZEB. Es decir, como un muro exterior de cemento muestra un gradiente térmico de temperatura diferente al de un muro compuesto por una capa de cemento y forrado con poliestireno, y como responden estos a las variaciones de la temperatura exterior. Esto nos dará la pauta para justificar la necesidad de un tipo de barrera térmica dinámica, que no solo muestra un gradiente térmico de temperatura similar al muro compuesto sino que además es posible que ajuste su gradiente de temperatura entre el interior y el exterior de forma dinámica. Nivelando tanto los picos diarios como estacionales observados en las curvas de demanda de energía, reduciendo el consumo de energía en calefacción y refrigeración.

3.1 Comportamiento térmico de la envolvente.

En esta sección se introduce el concepto de gradiente térmico haciendo uso de un modelo para comparar el comportamiento de un muro de cemento y de un muro de cemento aislado con poliestireno. Posteriormente se desarrolla el modelo térmico de un edificio para observar el comportamiento de la envolvente con cambios meteorológicos durante el día y la noche a lo largo de diferentes estaciones del año.

La envolvente del edificio –fachada, suelo, techo- es la interface entre el exterior y el interior. Cubre funciones vitales como el servir de barrera ante un ambiente externo hostil, regulando el paso de luz natural, ventilación y control térmico, a través de sus elementos estructurales tales como ventanas y muros (Lstiburek, 2007). La energía transferida a través de la envolvente es calculada con la ley de transferencia de calor, ecuación 3.1. Esta representa la variación de la energía a través del grosor del muro combinando la resistencia térmica y capacidad térmica:

$$\frac{dQ}{dt} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.1)$$

Donde:

k	Conductividad Térmica (W/m.*K)
x	Distancia o grosor (m)
T	Temperatura (K)
ρ	Densidad (kg/m ³)
C_p	Calor Específico (J/kg.*K)

En estado estacionario y condiciones de flujo de calor en una sola dimensión, se obtiene la ecuación de transferencia de calor o velocidad de transferencia de calor, Q (W):

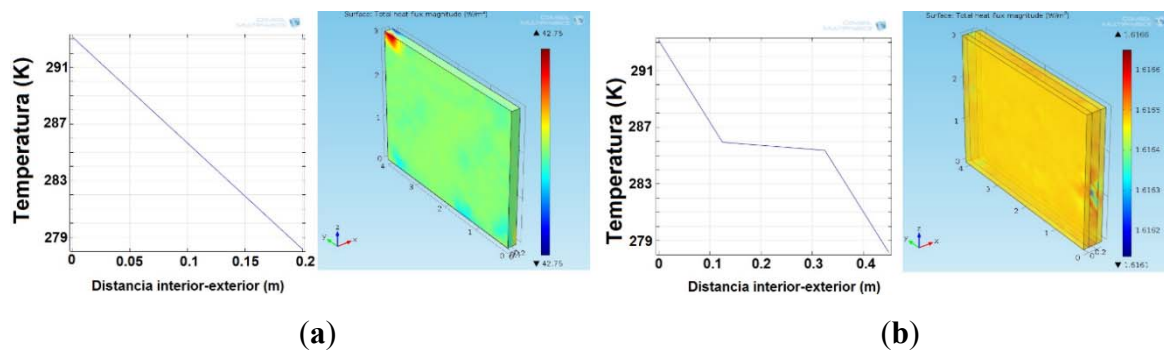
$$Q = -kA \frac{\Delta T}{x}, \quad (3.2)$$

A es la superficie (m²) sobre la que se proyecta el calor de forma perpendicular, y ΔT es la diferencia de temperaturas (K) entre las caras de la superficie. De la misma podemos derivar la ecuación de flujo de calor, q (W/m²):

$$q = \frac{Q}{A} \quad (3.3)$$

Por ejemplo, dado un muro de cemento con una $k = 0.57 \text{ W/m.K}$, $A = 3\text{m} \times 4\text{m} = 12 \text{ m}^2$, $x=0.2\text{m}$, $T_{\text{interior}} = 293.15 \text{ K}$ (20°C), $T_{\text{exterior}} = 278 \text{ K}$ (5°C), se encuentra mediante (3.2 y 3.3) que la transferencia de calor por conducción es de $Q = 513 \text{ W}$ y el flujo de calor es $q = 42.75 \text{ W/m}^2$. Agregando a ambos lados del muro una capa de poliestireno de 12.5 cm , con una $k = 0.028 \text{ W/m.K}$, se obtiene una reducción en la transferencia de calor por conducción $Q = 19.44 \text{ W}$ y del flujo de calor $q = 1.62 \text{ W/m}^2$.

Figura 3. 1 Comportamiento del gradiente de temperatura. (a) Muro de cemento, (b) Muro de cemento con capas de poliestireno en la cara interior y exterior.



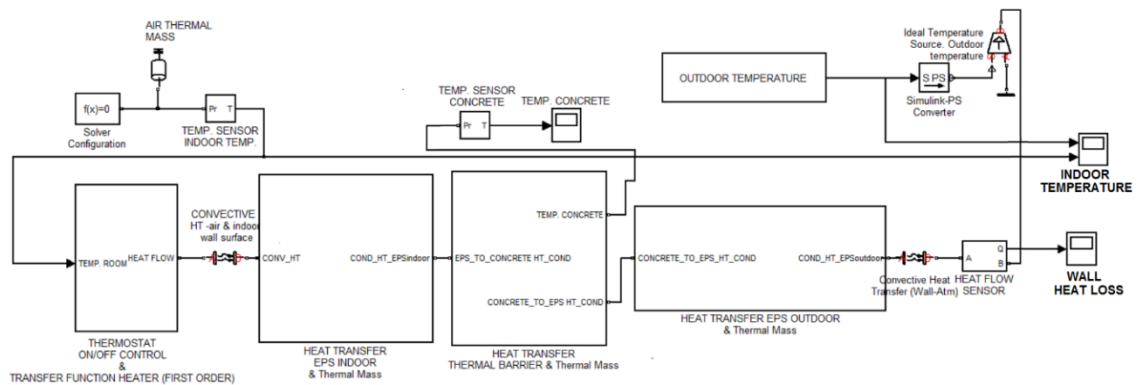
En la Figura 3.1 se muestra la distribución de la temperatura mediante un par de modelos hechos en COMSOL Multiphysics²⁷, considerando las características de cada uno de los casos mencionados anteriormente. En la Figura 3.1a, se muestran los resultados para el caso del muro de puro cemento. Se puede ver una caída lineal de temperatura a lo ancho del muro, tomando como punto de origen la cara interior del muro de cemento. En la Figura 3.1b, se muestran los resultados para el caso del muro compuesto, cemento revestido con poliestireno. Como se puede ver, en esta última Figura se aprecia un comportamiento diferente para el gradiente de temperatura entre el interior y exterior. Esto se debe a que la caída de temperatura se da en mayor parte en la capa de poliestireno ya que su conductividad térmica es menor (1/20 comparada con la conductividad térmica del muro de cemento). Así el muro de cemento es virtualmente isotérmico a la temperatura interior y exterior, es decir, su temperatura se encuentra siempre cerca del promedio de temperatura interior y exterior, que en esta caso es la media entre 293.15 y 278 K , por lo tanto, 285.6 K . La bifurcación creada por estas capas de poliestireno proporciona una considerable reducción en el flujo de calor. Sin

²⁷ <http://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (consultado 30/SEP/2015).

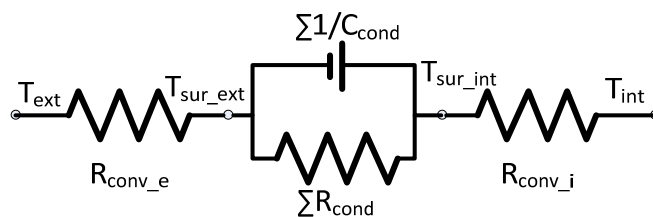
embargo este muro sigue siendo del tipo estático, por lo que según la estación del año será más o menos eficiente.

Para ver el comportamiento de la temperatura interior del edificio y en la envolvente, provocado por las variaciones de la temperatura ambiente, la Figura 3.2a muestra un modelo implementado en Matlab/Simulink. El modelo representa el balance de calor entre el edificio y el entorno a través de su envolvente. El modelo simplifica el intercambio de calor entre el interior y el exterior tomando sólo en cuenta los efectos de conducción y convección de transferencia de calor en la fachada del edificio tanto la parte externa e interna a través de las capas de la envolvente. La caracterización de estos procesos se soporta en el modelo equivalente de resistencia térmica, Figura 3.2b, considerando la ecuación anteriormente vista (3.1). El modelo permite parametrizar algunas de las variables, las cuales se muestran en la Tabla 3.1 para dos casos específicos. En el primer caso se cuenta con un muro de cemento de 80 cm de espesor sin capas de poliestireno. Para el segundo caso el grosor del muro de cemento es de apenas 15 cm, y está recubierto de capas de poliestireno de 5 cm en cada una de sus caras. En ambos casos estas propiedades proveen una alta inercia térmica a los muros, en especial para el caso 1 el muro de cemento presenta un grosor bastante notorio.

Figura 3. 2 Modelo del comportamiento de las temperaturas en el interior de una vivienda y en un muro exterior con poliestireno.



(a)



(b)

Tabla 3. 1 Parámetros del modelo del comportamiento de la envolvente en los muros exteriores.

CEMENTO LIGERO	Caso 1	Caso 2	Unidades
Grosor	0.80	0.15	m
Densidad	1200	1200	kg/m ³
Calor Especifico	860	860	J/kg*K
Conductividad Térmica	0.57	0.57	W/m*K
Coef. Convección aire cara interior	24		W/m ² *K
Coef. Convección aire cara exterior	34		W/m ² *K
POLIESTIRENO			
Grosor		0.05	m
Densidad		35	kg/m ³
Calor Especifico		1450	J/kg*K
Conductividad Térmica		0.028	W/m*K
Edificio nZEB			
Altura	5		m
Frente	10		m
Largo	10		m
<i>Temperatura interior inicial</i>	7.5		°C
Ventanas			
Altura	1		m
Grosor	1		M
Densidad	2500		kg/m ³
Calor Especifico	840		J/kg*K
Conductividad Térmica	0.78		W/m*K
Coef. Convección aire cara interior	25		W/m ² *K
Coef. Convección aire cara exterior	32		W/m ² *K

Para el caso de la transferencia de calor por convección, la ley de enfriamiento de Newton ha sido usada, la ecuación 3.4, que representa la transferencia de energía en una superficie en contacto con un fluido producido por el proceso de convección del fluido. En el análisis actual los fluidos son el aire exterior e interior.

$$\frac{dQ}{dt} = h\Delta TA \quad (3.4)$$

Donde h es el coeficiente de convección, el cual depende de las condiciones externas tales como la velocidad del viento, humedad o densidad del aire, y las características de la superficie como la geometría o rugosidad. ΔT es la diferencia de temperaturas entre la superficie y el ambiente, y A es el área total de la superficie.

La resistencia térmica por convección se define en la ecuación 3.5.

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \quad (3.5)$$

La resistencia térmica debido a la conducción es formulada por la ecuación 3.6.

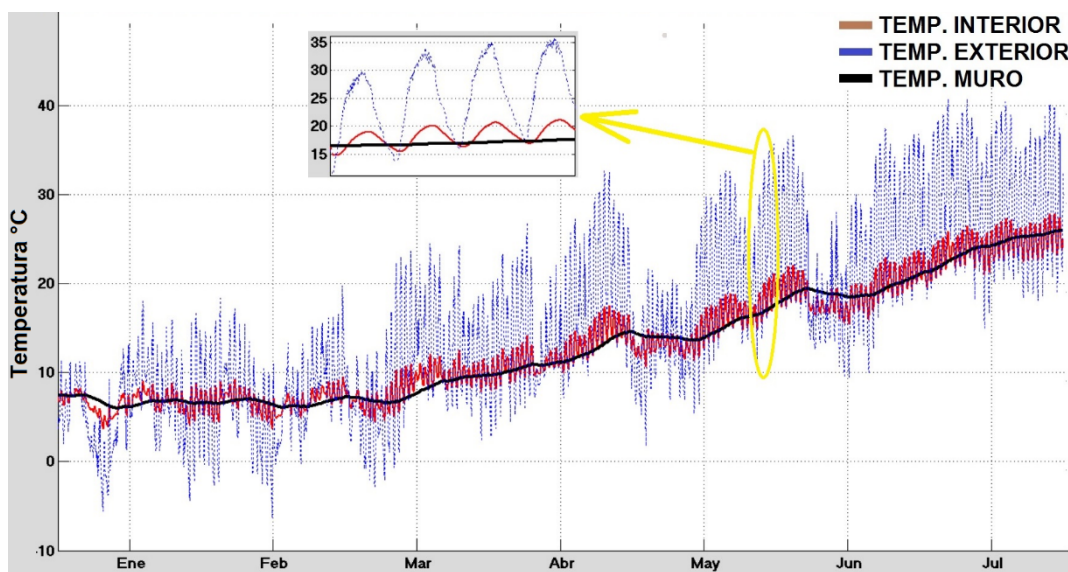
$$R_{cond_i} = \frac{L_i}{k_i A} \quad (3.6)$$

Y la capacidad térmica de cada capa, está dada por la ecuación 3.7.

$$C_{cond_i} = \rho_i C_{pi} \quad (3.7)$$

Como las capas de la envolvente están conectadas en serie, la resistencia equivalente es obtenida sumando las resistencias individuales de cada capa, y opuestas con la capacidad inversa equivalente.

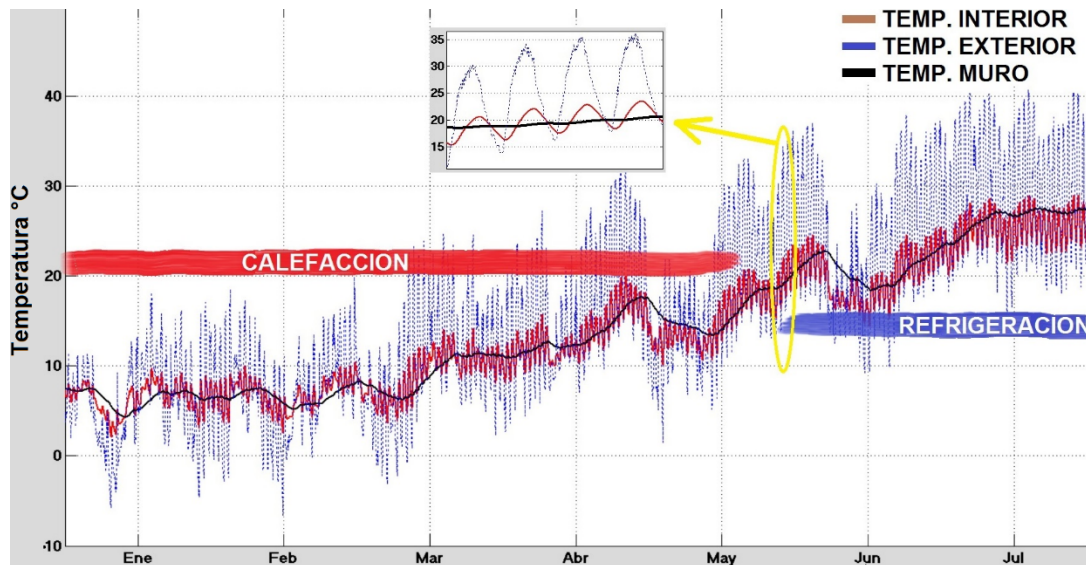
Figura 3. 3 Temperatura exterior (real), temperatura interior y temperatura en el muro de cemento de 80 cm sin poliestireno (simuladas).



En la Figura 3.3 y 3.4 se muestran los resultados de una simulación para el caso 1 y caso 2 respectivamente (ver Tabla 3.1). Haciendo zoom en una determinada área se puede observar el comportamiento de la temperatura interior, la temperatura del muro tomada justo a la mitad de su grosor y la temperatura exterior. Los datos de la temperatura exterior han sido adquiridos por una estación meteorológica, mientras que la temperatura interior y la temperatura del muro son calculadas por el modelo. En ambos casos se aprecian los efectos de retardo y amortiguamiento para la temperatura interior y la temperatura en la parte media interna del muro. Se observa además que

hasta mediados del quinto mes del año se requiere una energía térmica extra para calentar el edificio y alcanzar una temperatura interior de confort. Sucede lo contrario en los meses de verano, donde cierta energía adicional es requerida para enfriar el interior del edificio.

Figura 3. 4 Temperatura exterior (real), temperatura interior y temperatura en la parte central de un muro de cemento de 15 cm revestido con capas de poliestireno de 5 cm (simuladas).

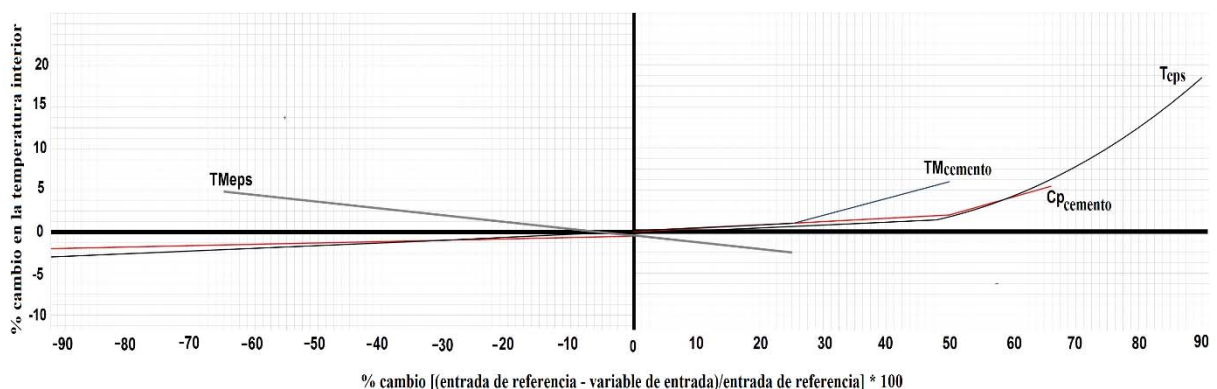


Para el caso 1, se encontró que una capa de cemento con un grosor de 25 cm, mostraba un comportamiento en la temperatura interior muy similar a la temperatura exterior, tanto que estaban prácticamente solapadas, es decir, a pesar de contar con un efecto de retardo y amortiguamiento con respecto a la temperatura exterior, estas temperaturas se mantienen muy cercanas una de la otra.

En especial para el caso 2, se ejecutaron varias simulaciones con la intención de mostrar la sensibilidad del modelo a varios parámetros de entrada para reflejar que tanto afecta cada uno de ellos la temperatura interior. Uno de ellos fue la masa térmica, la cual está definida mediante tres propiedades básicas: un calor específico alto C_p , una densidad alta ρ , y una moderada conductividad k . En este caso un cambio de masa térmica del 40% representa una variación por esta cantidad en cada una de estas tres propiedades. Las variables que se movieron durante estas pruebas son: la masa térmica de la capa de cemento (TMcemento), la masa térmica del poliestireno (TMeps), la capacidad térmica del cemento ($C_{pcemento}$) y el grosor de la capa de poliestireno (Teps).

La sensibilidad de la temperatura interior se muestra en la Figura 3.5. El grosor de las capas de poliestireno es un parámetro relevante alto al momento de reducir su grosor hasta un 90%, repercute en un incremento de temperatura de hasta un 20%. Un comportamiento similar se exhibe por la masa térmica de la capa de cemento, donde al sufrir un decremento en un 50% la temperatura interior se incrementa más del 5%. La masa térmica del poliestireno refleja que los valores de referencia dados en la Tabla 3.1 son bastantes adecuados, un incremento descontrolado genera una subida en los valores de temperatura interior. Se puede apreciar que el grosor de la capa de poliestireno no presenta una fuerte relación lineal con respecto a la temperatura interior como lo viene haciendo su masa térmica. En todos estos casos, el modelo ha respondido como se esperaba, además de observar que un incremento de grosor tanto en la capa de poliestireno como en la capa de cemento, reducen las variaciones de la temperatura interior. Sin embargo, se debe tener presente que un edificio fuertemente aislado también presenta un riesgo de sobrecalentamiento (Kunkel & Kontonasiou, 2015).

Figura 3. 5 Efecto de variar parámetros de la envolvente en la temperatura interior del edificio.



Se observa que la temperatura interior está claramente afectada por el clima, presentando el mismo comportamiento que la temperatura exterior, excepto por los efectos de retardo y amortiguamiento producidos por la inercia térmica de la envolvente. Estos efectos están ligados a la conductividad térmica, calor específico, masa y densidad. La combinación de estas propiedades da como resultado un muro con una alta inercia térmica, que permite suavizar los efectos de la temperatura exterior sobre la temperatura interior, en donde el muro de cemento forrado con poliestireno presenta un grosor considerablemente inferior al del muro de cemento sin recubrimiento.

Se puede concluir que este tipo de envolventes sigue siendo estática por lo que no pueden ajustar su gradiente térmico de temperatura de forma dinámica, es decir, presentan un mejor comportamiento en determinados climas pero no compensen las variaciones temporales durante las estaciones del año o incluso durante el día y noche.

3.2 Edificio nZEB: sistema colector solar-intercambiador de energía térmica-barrera térmica dinámica.

Los sistemas de AETCS hacen referencia a sistemas que almacena energía térmica sin cambio de fase y está asociado con un cambio de temperatura de la sustancia. Esto ocurre agregando calor al medio de almacenamiento, ya sea sólido o líquido, lo que produce un incremento de su temperatura. Por ejemplo, en la Figura 3.6 se muestra un panel térmico con una tubería que va del panel a estar sumergida a manera de serpentín en un contenedor con agua de calefacción sanitaria. Cuando el fluido en el panel térmico alcanza una determinada temperatura recircula hacia el tanque, provocando un incremento lineal de la temperatura del agua contenida en el depósito.

Figura 3. 6 Almacenamiento de calor sensible con apoyo de un panel térmico.

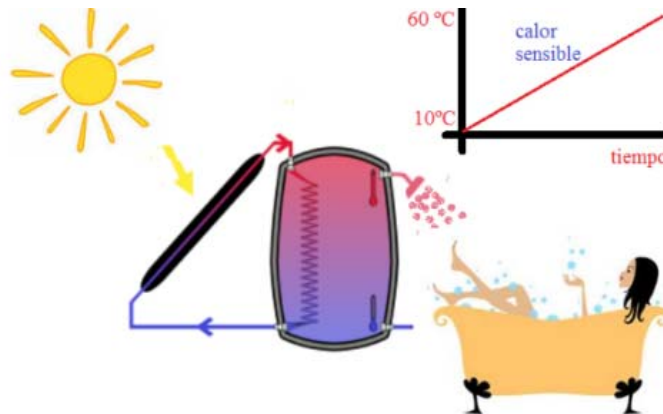
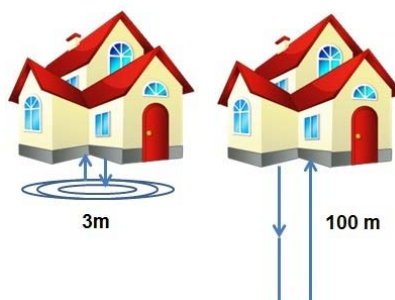


Figura 3. 7 Sistemas de geotermia de baja entalpia, horizontal (izquierda) y vertical (derecha)



Dentro de los sistemas AETCS se encuentran los de geotermia de muy baja entalpia, situados a una profundidad menor de 100 m, con temperaturas de trabajo por debajo de los 85°C (Figura 3.7). Estos sistemas suelen requerir de elementos de apoyo tales como bombas de calor para proporcionar una mayor potencia. Los sistemas geotérmicos de tipo vertical son más eficientes puesto que están instalados a profundidades mayores de 20 m donde la temperatura no se ve afectada por las condiciones meteorológicas locales.

La energía calorífica almacenada para estos sistemas viene dada por la ecuación 3.8:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = \dot{m}C_p(T_f - T_i) \quad (3.8)$$

Dónde:

Q	Es la energía calorífica almacenada [J]
\dot{m}	Es la masa de la sustancia almacenada [kg]
C_p	Es el calor específico de la sustancia [J/kg°C]
T_i y T_f	Temperatura inicial y final, respectivamente [°C]

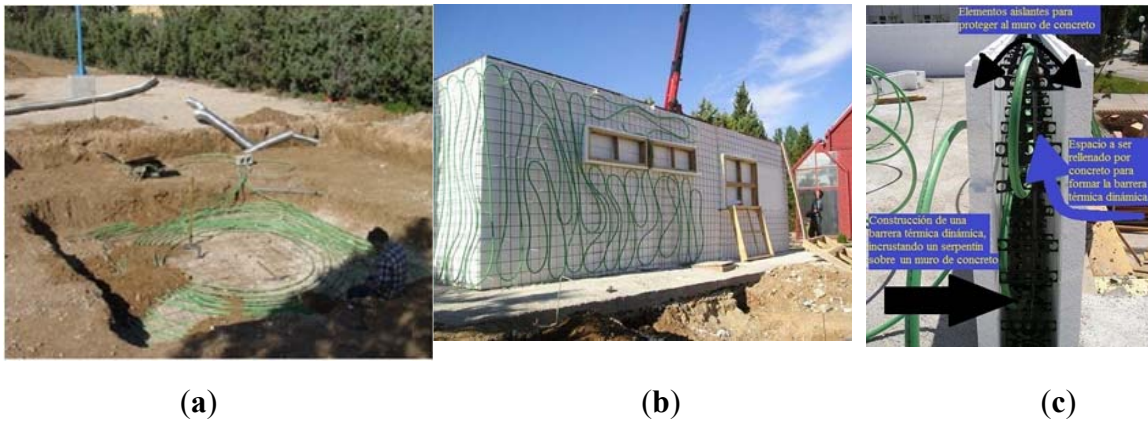
El edificio nZEB con el que trabajamos tiene dos plantas. Está basado en la propuesta hecha por Krecké para el sistema comercial ISOMAX (Patente nº US 2,012,026,109,1A1, 2012), y forma parte de los sistemas de almacenamiento de energía térmica de calor sensible (AETCS). El edificio nZEB está construido en las instalaciones del CAR-UPM CSIC (Madrid, España). Este edificio nZEB presenta el diseño de un tipo de envolvente que responde a cambios exteriores.

En la Figura 3.8 se muestran las etapas iniciales durante la construcción del edificio nZEB. En este trabajo se ha utilizado un sistema de geotermia de muy baja entalpia de tipo horizontal, que cuenta con varios anillos concéntricos formados por tubos de polipropileno (PP), ubicados en el subsuelo (Figura 3.8a). Se observa la preparación de un muro cubierto con tubos de PP (Figura 3.8b) y como estos se incrustan entre las dos capas de poliestireno entre las cuales se colara el cemento para crear la barrera térmica dinámica (Figura 3.8c).

Con este tipo de envolventes se ocasiona un menor gasto de energía eléctrica para mantener el confort del usuario ante un clima exterior que varía de forma dinámica a lo largo del año. Algunas propuestas de envolventes dinámicas se presentaron en la

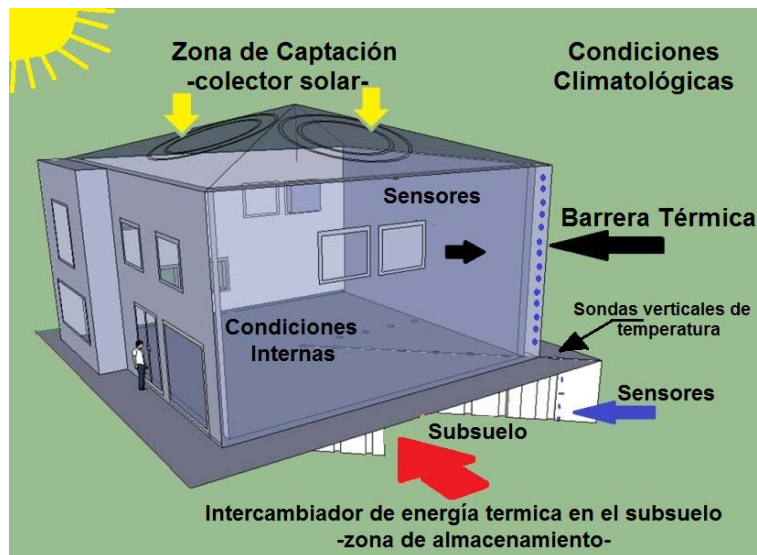
competición Solar Decathlon Europe 2012 (SDE2012²⁸), donde la propuesta de vivienda de la Universidad de Portugal y el equipo de Andalucía permitía adaptar la envolvente o al menos algunos de sus elementos estructurales a las diferentes estaciones del año.

Figura 3. 8 Etapas iniciales (a) Tubos de PP del sistema geotérmico horizontal (b) Construcción de la barrera térmica dinámica, con los tubos de PP cubriendo uno de los muros (c) Vista de perfil de un muro antes de recibir la colada de cemento.



El concepto del edificio nZEB, se muestra en la Figura 3.9. Este consta de dos plantas y tiene tres componentes principales para llevar a cabo una tarea específica:

Figura 3. 9 Concepto del edificio nZEB ubicado en las instalaciones CAR-UPM CSIC (Madrid, España).



²⁸ <http://www.sdeurope.org/downloads/sde2012/> (consultado 09/2015).

- i) Colector solar o zona de captación de energía solar colocada como parte de la arquitectura del edificio nZEB. Este será conocido de ahora en adelante como CS.
- ii) Sistema de geotermia de muy baja entalpia, de ahora en adelante intercambiador de energía térmica en el subsuelo o zona de almacenamiento, para almacenar o recuperar la energía térmica en el subsuelo. Conocido como GHX.
- iii) Barrera térmica dinámica o zona de uso, por esta fluirá un líquido caloportador proveniente del colector solar o el intercambiador de energía térmica en el subsuelo. Esta será conocida como BTD.

Como veremos a continuación, la interconexión de estos tres sistemas mediante un circuito hidráulico hará posible modificar el gradiente térmico entre el interior y el exterior. Con esto se abre la posibilidad de poder adaptar este gradiente térmico de manera dinámica a cambios meteorológicos a lo largo del año, beneficiando la cara interior de los muros exteriores y por lo tanto, reduciendo la carga de calefacción y refrigeración.

3.2.1 Colector solar.

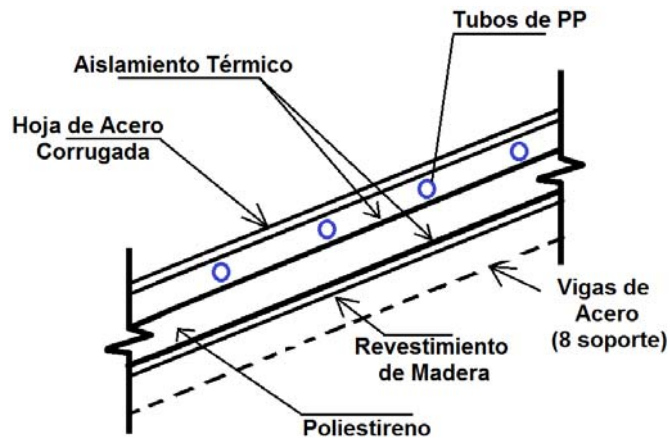
En algunos climas se combinan sistemas geotérmicos de baja profundidad y paneles térmicos con la finalidad de aumentar la eficiencia energética (Cauret, 2008). El principio de funcionamiento de estos sistemas es el de aprovechar el panel solar térmico para inyectar calor al subsuelo de manera independiente y, mediante el geotérmico, extraer el calor acumulado. En este caso el sistema geotérmico de muy baja entalpía del edificio nZEB recibe una inyección de energía térmica que no proviene de un panel solar térmico sino de un elemento estructural integrado como parte de la arquitectura del edificio.

El colector solar (CS) está formado por una chapa metálica a cuatro aguas, donde cada una de ellas está orientada a un punto cardinal con un ángulo de inclinación de 30° y cuenta con un tratamiento de pintura especial sobre su superficie. Adicionalmente se adhieren dos tubos de PP a cada una de las caras, con un diámetro $\Phi = 0.22$ m y una longitud $L = 200$ m. El CS es responsable de la captura de energía solar, la cual juega un papel fundamental en el balance de energía del edificio, como fuente de energía

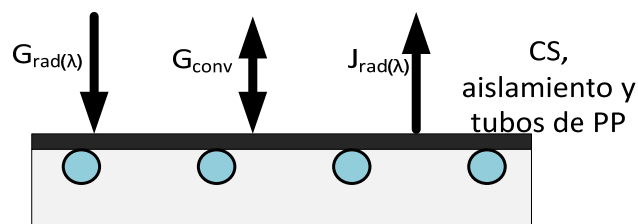
renovable. La captura de calor en el CS se produce mediante un fluido calo-portador que circula por los tubos de PP. Cuando el fluido gana calor se hace recircular por el intercambiador de energía térmica del subsuelo para almacenar este calor, o va directamente a la barrera térmica para variar el gradiente térmico entre el interior y el exterior. Debido a su diseño y orientación, el CS suministra rangos de temperatura a través de sus caras, siendo la sur la que capta más energía térmica y la cara norte la que menos. Un esquema del CS se muestra en la Figura 3.10a.

Como sabemos, la radiación incidente sobre un cuerpo u objeto puede ser transmitida, reflejada o absorbida por éste, dependiendo de propiedades intrínsecas del objeto tales como los coeficientes de absorción o reflexión. El coeficiente de absorción, conocido como valor “alfa”, α , puede ser usado para determinar el comportamiento térmico del elemento con la radiación solar incidente. En general, la energía solar absorbida dependerá del color de la superficie del objeto. Valores de temperatura más altos son alcanzados con colores oscuros (valores α grandes, cercanos a 1), y al contrario con colores ligeros (valores α pequeños).

Figura 3. 10(a) Esquema del colector solar con tubos de PP (b) Balance de energía en la superficie del colector solar.



(a)



(b)

La energía capturada por la capa del colector es transferida al fluido, y transportada a donde se demande. El balance de la capa del colector determina la cantidad de energía solar que puede ser absorbida por el fluido, y por tanto, la cantidad de energía solar disponible.

El balance térmico que ocurre en el colector se muestra en la Figura 3.10b y se modela por la ecuación 3.9.

$$Q = G_{rad(\lambda)} + G_{conv} - J_{rad(\lambda)} \quad [W/m^2] \quad (3.9)$$

Donde $G_{rad(\lambda)}$ and $J_{rad(\lambda)}$ representan las ganancias y pérdidas de la energía debido a los procesos de radiación, dependiendo tanto de la temperatura ambiente y el colector, y donde, G_{conv} es el flujo térmico generado por convección.

La ganancia de radiación está definida por la radiación total incidente, tanto de onda corta como de onda larga. La radiación de onda corta corresponde a la radiación solar total, mientras que la radiación de onda larga incluye aquellas producidas por todos los cuerpos que se encuentran alrededor del colector que emiten radiación de acuerdo a la ecuación de Stefan-Boltzmann's. Por lo tanto, las ganancias de radiación son modeladas por la ecuación 3.10.

$$G_{rad(\lambda)} = \sigma \cdot \alpha_{\lambda l} \cdot f(\Omega) \cdot T_{amb}^4 + \alpha_{\lambda s} \cdot SR \approx \alpha_{\lambda s} \cdot SR \quad (3.10)$$

Donde $\alpha_{\lambda l}$ y $\alpha_{\lambda s}$ (valores alfa), representan el promedio de absorción para el espectro de ondas largas y cortas respectivamente. SR es la radiación total incidente a la superficie del colector, incluyendo la radiación directa y difusa, σ la constante Stefan-Boltzmann, y $f(\Omega)$ es cercana a cero, por lo que la onda de radiación de onda larga se ha considerado irrelevante comparada con la radiación de onda corta.

Las pérdidas por radiación se describen por la ecuación 3.11.

$$J_{rad(\lambda)} = \sigma \varepsilon_{\lambda l} T_{col}^4 \quad (3.11)$$

Y el proceso de convección por la ecuación 3.12 (ley de enfriamiento de Newton).

$$G_{conv} = h(T_{amb} - T_{col}) \quad (3.12)$$

Donde h representa el coeficiente de convección.

De acuerdo con el balance de energía, la energía total capturada por la superficie se obtiene de la ecuación 3.13.

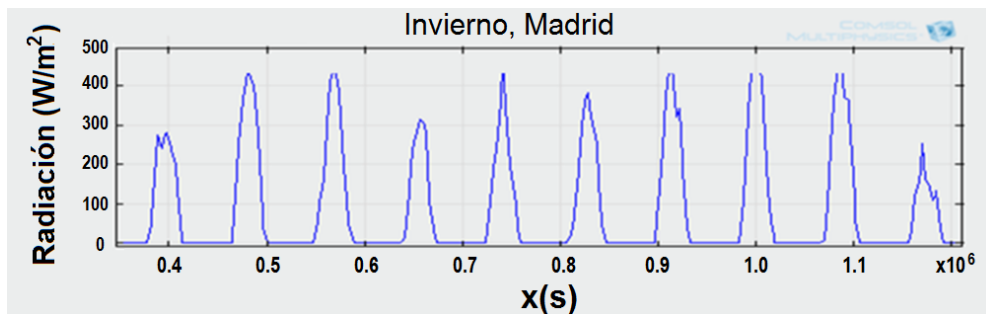
$$Q = \alpha_{\lambda_s} \cdot SR + h(T_{amb} - T_{col}) - \sigma \epsilon_{\lambda_l} T_{col}^4 \quad (3.13)$$

Este balance de energía de la superficie, depende de factores ambientales tales como la temperatura exterior, radiación solar o ángulo incidente de radiación. Esto puede ser parcialmente controlado mediante las propiedades ópticas de la superficie, por lo que la energía capturada se optimiza para un alto valor de absorción de ondas cortas y un bajo valor de emisividad. En la simulación, este comportamiento se simplifica aplicando la ley de Kirchhoff's (emisividad es igual a absorción), y considerando la superficie como un cuerpo gris (propiedades ópticas independiente de longitudes de onda larga). Por lo que las condiciones límites de la superficie de captura externa del modelo se definen por la ecuación 3.14. Donde un alto valor de absorción optimiza la energía capturada cuando la radiación solar es más alta que las pérdidas por radiación. Por lo tanto, para condiciones externas dadas, la caracterización del colector es un factor relevante para definir su eficiencia térmica. Este comportamiento es analizado en el modelo mediante un análisis paramétrico comparando el promedio de la temperatura en la superficie del colector para valores diferentes de absorción: 0.1, 0.4 y 0.7.

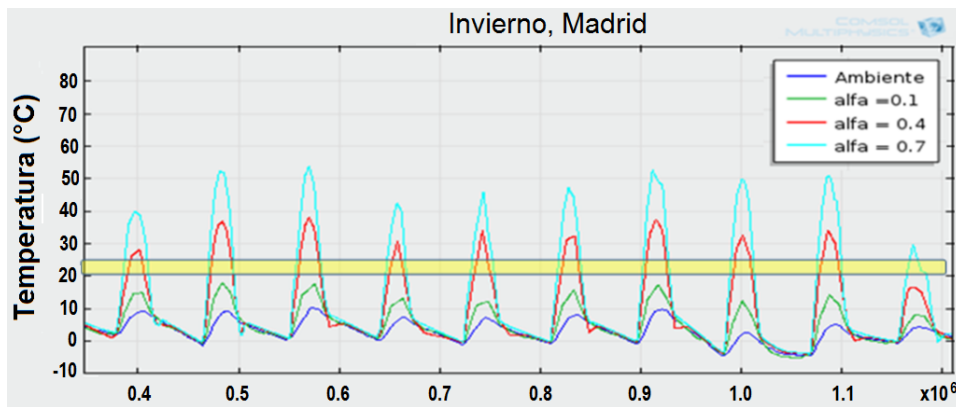
$$Q = \alpha(SR - \sigma T_{col}^4) + h(T_{amb} - T_{col}) \quad (3.14)$$

La Figura 3.11a muestra la radiación solar capturada durante 10 días en el invierno. En la Figura 3.11b se muestran los resultados de una simulación hecha en COMSOL Multiphysics para distintos valores del coeficiente α . La banda en amarillo representa la temperatura de confort. Claramente se observa que para $\alpha > 0.4$, se alcanzan temperaturas por encima de la temperatura de confort a pesar de encontrarse en días de invierno. Para estos valores más altos se alcanzan temperaturas de hasta 55°C.

Figura 3. 11(a) Radiación medida en las instalaciones del CAR-UPM CSIC durante 10 días en invierno. (b) Simulación de temperaturas para diferentes valores α .



(a)



(b)

Los resultados muestran la gran influencia de la absorción en la eficiencia del CS. A pesar de encontrarse en días de invierno, el promedio de la superficie externa de este alcanza valores por encima de la temperatura de la banda de confort para valores de absorción mayores a 0.4. A valores mayores de este coeficiente, mayor es la cantidad de energía disponible, más allá de la banda de confort. Por lo tanto, es posible la captura de energía térmica en el CS para propósitos de calefacción, siempre y cuando este sea óptimamente provisto de propiedades ópticas.

El modelo también demuestra que la energía disponible para refrigeración, con temperaturas por debajo de 20°C es independiente de la superficie de absorción. Por lo que de acuerdo a la aproximación de un cuerpo gris, la elección de un color oscuro para el colector mejora la captura de energía térmica para propósitos de calefacción sin tener un gran impacto en la energía térmica capturada para propósitos de refrigeración.

3.2.2 Almacenamiento.

El subsuelo sobre el que se cimienta el nZEB se caracteriza por una alta inercia térmica, por lo que se usa como tanque de almacenamiento. Este sistema de almacenamiento acumula la energía térmica (calor o frío) de acuerdo a la temperatura del fluido, de ahí el nombre de intercambiador de energía térmica del subsuelo (Van Rennen, 2011). Al recircular el fluido calo-portador sobre esta zona puede ganar o ceder calor, y donde de acuerdo a la época del año tendera a almacenar más calor y ceder más frío (verano) ó almacenar más frío y ceder más calor (invierno).

Este intercambiador de energía térmica del subsuelo (GHX) cuenta con varios anillos concéntricos formados por tubos de PP, ubicados en el subsuelo a dos y tres metros de profundidad. Al usar tubos de PP que se encuentran a muy poca profundidad,

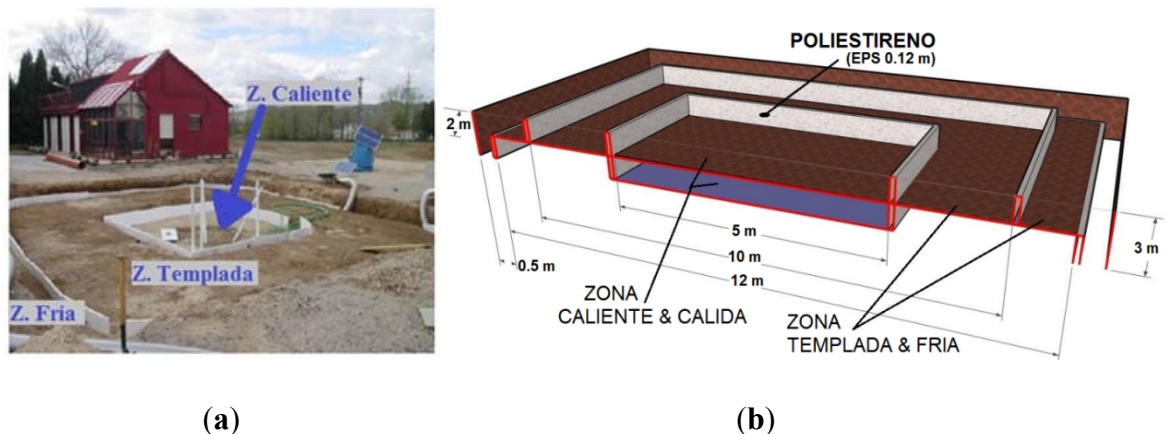
provoca que la energía térmica almacenada se vea influenciada por la radiación solar (Axelsson, 2012). Debido a esto, se cuenta con diferentes zonas de almacenamiento aisladas con paredes verticales de poliestireno expandido (EPS). Contando así con cuatro divisiones: zona caliente, cálida, templada y fría. La Tabla 3.2 muestra los diferentes rangos de temperaturas en las zonas de almacenamiento, lo que provee al sistema de una capacidad selectiva para escoger de manera dinámica el rango de temperatura deseado.

Tabla 3. 2 Rangos de temperaturas en las zonas de almacenamiento.

ZONA	RANGO	CARACTERISTICAS
Caliente	19-21°C	2 tubos de PP, ubicados a 3 m. bajo el suelo y dentro del perímetro de los muros exteriores.
Cálida	17°C – 19°C	2 tubos de PP, ubicados a 2 m. bajo el suelo y dentro del perímetro de los muros exteriores.
Templada	14°C – 17°C	3 tubos de PP, ubicados a 2 m. bajo el suelo y dentro del perímetro de los muros exteriores.
Fría	11°C – 14°C	2 tubos de PP, ubicados a 2 m. bajo el suelo y fuera del perímetro de los muros exteriores.

La zona caliente y cálida se encuentra sobre un área de 5 m x 5 m, centrada sobre la base del edificio nZEB, pero a profundidades de tres y dos metros respectivamente. La zona templada y fría cuenta con tubos de PP a dos metros de profundidad. La zona templada abarca el área que resulta de la resta del área formado por la base del edificio nZEB (10 m x 10 m) y el área de la zona caliente. La zona fría es la única que se encuentra fuera del perímetro formado por la base del edificio nZEB, pero aun estando fuera cuenta al final con paredes verticales de EPS. Los tubos de PP en cada una de estas zonas se desenrollan para formar anillos concéntricos de menor a mayor tamaño hasta cubrir el área respectiva de la zona de almacenamiento.

Figura 3. 12 GHX: distribución de las zonas Caliente, Cálida, Templada y Fría.



Las Figuras 3.12 muestran la distribución de las zonas. En la Figura 3.12a, se aprecia el aislamiento de la zona central como el espacio asignado para el tubo PVC vertical que albergará las sondas de temperatura, al final se aprecia parte de la pared vertical del EPS para cerrar la zona fría. En la Figura 3.12b se muestra un dibujo con corte transversal que identifica las zonas de almacenamiento mencionadas, la longitud que abarcan y su profundidad. Como es de suponer haciendo uso de la misma longitud de tubos de PP, la zona caliente contara con un mayor número de anillos concéntricos que la zona fría, en esta última los tubos de PP solo alcanzan a dar un par de vueltas.

3.2.3 Barrera térmica dinámica.

Cabe destacar que en esta investigación se hicieron pruebas con el fluido caloportador circulando en la barrera térmica, aunque también podría recircular sobre el techo interior. La barrera térmica dinámica (BTD) controla la circulación del fluido sobre los muros exteriores, regulando así el flujo de calor entre el interior y el exterior. Cada muro exterior, tanto de la planta baja y alta, cuenta con un tubo de PP que puede accionarse independientemente.

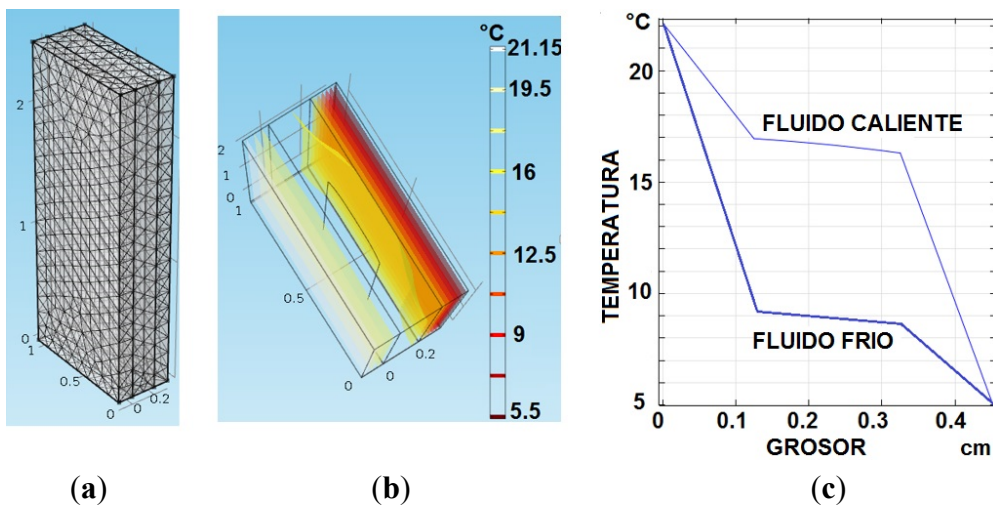
La Figura 3.13 muestra una simulación hecha en COMSOL Multiphysics de la barrera térmica dinámica donde se mantiene la temperatura interior a 22°C y la exterior a 5°C . Las características y parámetros de las capas de la barrera térmica, cemento y poliestireno son los de la Tabla 3.1.

La Figura 3.13a muestra el modelo de la barrera térmica dinámica en elementos finitos. La Figura 3.13b representa los resultados de la simulación cuando circula un fluido a 17°C en los tubos de PP. Se puede observar en la parte media, justo en la capa de cemento, una línea delgada en forma de U invertida. Esta representa un segmento del tubo de PP, en este se simula circular un fluido calo-portador a 17°C , se aprecia claramente que la distribución isotérmica favorece la cara interior de la barrera térmica. La Figura 3.13c muestra el gradiente de temperatura entre el interior y el exterior al simular una inyección en los tubos de PP de un fluido a 17°C (fluido caliente) y un fluido a 5°C (fluido frío).

Este modelo permite comprobar algo importante, que la barrera térmica dinámica crea una semi superficie en la cara interior del muro, la cual ayudará a estabilizar la temperatura de confort. Circulando el fluido calo-portador para inyectar o disipar energía térmica, ya sea que se haga uso de una zona de almacenamiento o incluso

directamente de la energía térmica del CS. La barrera térmica dinámica permite mejorar el proceso de transferencia de calor a través de los muros exteriores, variando el gradiente térmico entre el interior y exterior, consiguiendo reducir el uso de energía secundaria (eléctrica) para calefacción o refrigeración (Guinea, Peña, & Hernández, GENEDIS, 2009) (Guinea, y otros, 2010). En el anexo B se muestran otras simulaciones realizadas, que fueron llevadas a cabo para comprender mejor el fenómeno y que incluso se usaron para el desarrollo de un controlador difuso que forma parte de la arquitectura de decisión propuesta.

Figura 3. 13(a) Simulación del muro exterior con elementos finitos, (b) Distribución isotérmica en el muro, (c) Variaciones de la temperatura usando la BTd.



Finalmente, es importante tener presente que sin el uso de la barrera térmica dinámica, la capa de cemento se mantendría en este caso a una temperatura promedio entre el interior y el exterior, 9.5°C $((22-5)/2)$, creando un perfil de temperatura más adverso sobre la cara interior para mantener una temperatura de confort.

3.2.4 Circuito hidráulico.

Por último, para completar el modelo del edificio nZEB, se ha implementado un circuito hidráulico que interconecta los 3 subsistemas térmicos.

Por ejemplo, en la Figura 3.14 se muestra el circuito hidráulico para ejemplificar la interconexión entre los diferentes subsistemas encargados de capturar la energía térmica, almacenarla, y usarla en la barrera térmica dinámica.

Figura 3. 14 Circuito hidráulico que interconecta los subsistemas encargados de capturar energía solar térmica, almacenarla, y usarla en la barrera térmica dinámica.

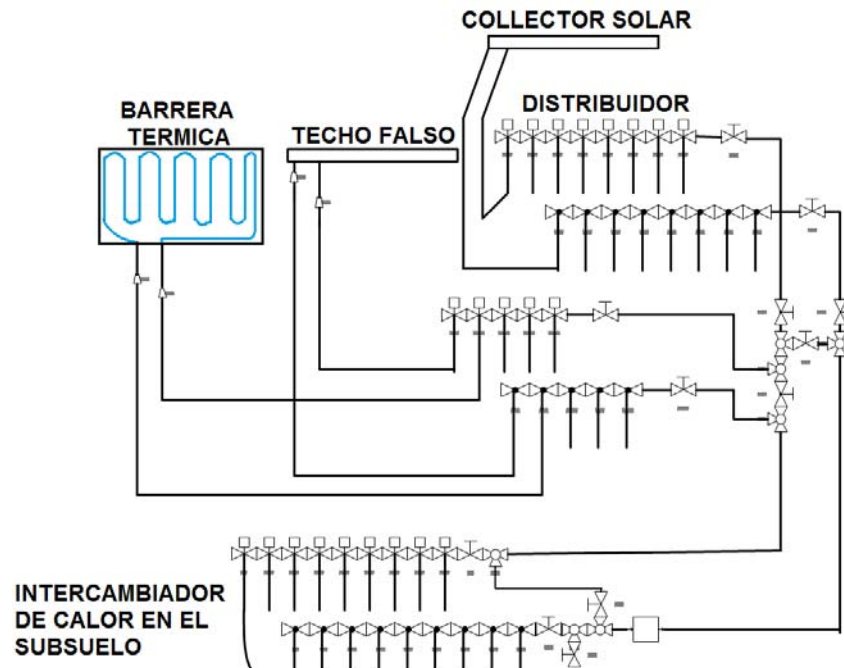
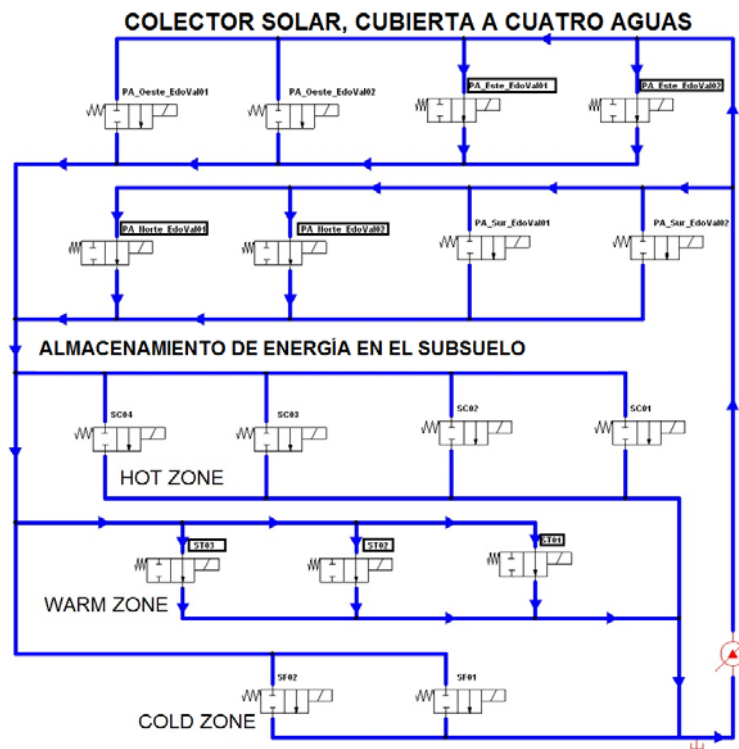


Figura 3. 15 Circuito hidráulico con recirculación del fluido de acuerdo a las válvulas activadas por el circuito eléctrico.



En la Figura 3.15 se muestra con detalle una simulación del circuito hidráulico que cubre la captación de la energía y su almacenamiento. Al captar energía solar en la

cubierta del techo mediante el CS, dependiendo de la temperatura alcanzada, ésta se transporta a una de las zonas de almacenamiento del subsuelo. Hay una transferencia de calor en el circuito del subsuelo y por lo tanto en el terreno de la zona asignada. La energía térmica que se almacena en el subsuelo puede ser posteriormente usada para el ajuste de la barrera térmica, adaptándola a las diferentes estaciones del año durante el día y la noche.

3.3 Sistema híbrido FV/MCF.

En este apartado se va a presentar otro sistema de AET, conocido como sistema de almacenamiento de energía térmica de calor latente (AETCL). El uso de un sistema de AETCL puede ser muy efectivo y tiene la ventaja de proporcionar una alta densidad de almacenamiento energético. Este sistema consiste de un panel fotovoltaico (FV) y uso de un material de cambio de fase (MCF). El objetivo de este sistema híbrido se resume en los siguientes puntos:

1. Capturar energía térmica durante el día en el panel FV y, a la vez, controlar la temperatura en el mismo para mantener una mejor eficiencia en la generación de energía eléctrica.
2. Almacenar la energía térmica en el bidón con MCF proveniente de la energía removida en el panel FV. En caso de desear recuperar esta energía para usarla en ACS, es necesario contemplar el uso de un circuito secundario.

Antes de pasar a ver el sistema híbrido, es necesario tener unos conceptos básicos y proceder en este caso a determinar las propiedades características de un MCF, esto con la meta conseguida de forma similar en el punto anterior, familiarizarse con más términos que como veremos en el siguiente capítulo serán características a observar dentro de la ontología de sensores semánticos.

3.3.1 Material de cambio de fase.

Un MCF es una sustancia de naturaleza isotérmica en los cambios de estado, con un alto calor de fusión la cual, al fundirse o solidificarse a ciertas temperaturas, es capaz de almacenar o liberar grandes cantidades de energía. En este trabajo de investigación se

utiliza un MCF del tipo sólido-líquido, el cual absorbe o cede calor durante su fusión sin que se produzca un cambio en su temperatura.

Hay una enorme variedad de MCF con diferentes temperaturas de fusión y solidificación, ya sean del tipo orgánico (ej. compuestos de parafinas), inorgánicos (ej. hidratos de sal) o eutécticos (ej. inorgánicos-orgánicos). Por esto hay un enorme rango de aplicaciones de los MCF que van desde control de temperatura solar o espacial, para conservar y transportar bienes en el sector de alimentación y medicinas, en la ropa para regular la temperatura del cuerpo en ambientes inhóspitos, etc. (Sharma, y otros, 2009). Una aplicación reciente es el producto Micronal® de la empresa BASF que usa un MCF que va incrustado sobre el muro del edificio, para almacenar energía durante el día mientras se funde y mantener el edificio cálido durante la noche mientras se solidifica²⁹. Esta es otra forma de cambiar el comportamiento dinámico de la envolvente.

La cantidad de energía almacenada dependerá de la masa y el calor latente del material, dado por la ecuación 3.15, que cuenta con tres términos. El primero es el mismo que para el almacenamiento de calor sensible (ecuación 3.4), en esta parte el MCF se encuentra en estado sólido. El segundo se aplica cuando el MCF se encuentra en el proceso de transición de sólido a líquido, es decir, se está fundiendo. El tercer término también hace referencia al calor sensible del MCF, recordando que una vez que este se encuentra por completo en fase líquida, es imposible continuar almacenando calor latente.

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} m C_p dT + m a_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} m C_p dT \quad (3.15)$$

$$= \dot{m} [C_{fs}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{fl}(T_f - T_m)]$$

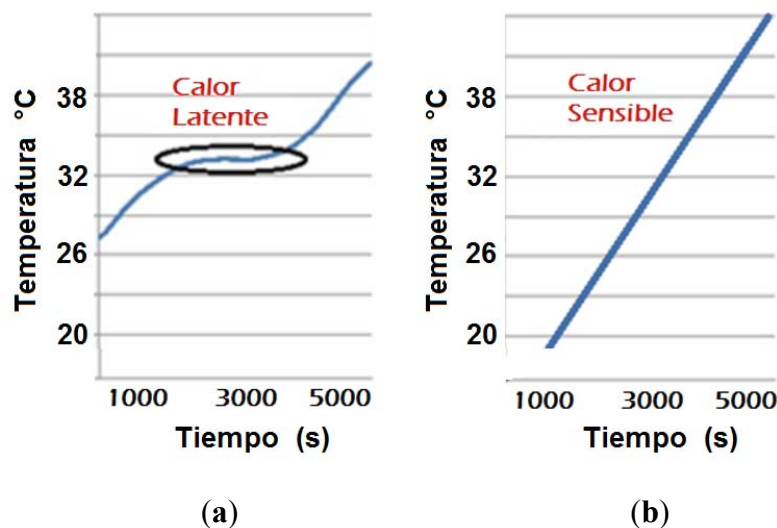
Dónde:

Q	Energía calorífica almacenada [J]
C_{fs}	Promedio de calor específico en fase solida entre T_i y T_m , [J/kg°K]
C_{fl}	Promedio de calor específico en fase liquida entre T_m y T_f [J/kg°K]
a_m	Fracción fundida.
Δh_m	Calor de fusión por unidad de masa [J/kg]
m	Masa de la sustancia almacenada que cambia de fase [kg]
T_i, T_f, T_m	Temperatura inicial, Temperatura final y Temperatura de fusión.

²⁹ http://www.micronal.de/portal/basf/ien/dt.jsp?setCursor=1_290798 (consultado 09/2015).

En la Figura 3.16 se muestra la temperatura durante unas pruebas en las que se inyectó energía térmica a un contenedor con MCF. La Figura 3.16a muestra el comportamiento del MCF, donde se ha marcado mediante una elipse el periodo de cambio de fase de sólido a líquido, lo que corresponde al segundo término de la Ec. (3.5). Al llegar al rango de temperatura de cambio de fase, se mantiene una temperatura constante aun cuando se siga transfiriendo calor al material. Es decir, se le seguía inyectando energía térmica, la cual era almacenada sin ocasionar un cambio de temperatura. Antes y después de la elipse se aprecian las pendientes correspondientes al calor sensible -primer y tercer término de la Ec. (3.5)-. En la Figura 3.16b se muestra el comportamiento del almacenamiento de calor sensible para un fluido como el agua, que también cuenta con un cambio de fase de sólido a líquido pero a 0°C.

Figura 3. 16 Comportamiento de (a) Calor latente vs. (b) Calor sensible.



3.3.2 Pruebas experimentales para la determinación de parámetros del MCF.

El MCF con el que se ha trabajado fue obtenido mediante una donación, y lo único que se sabía sobre él es que era del tipo parafina compuesta sólido-líquido. Debido a esto se llevaron a cabo una serie de pruebas para caracterizarlo y poder realizar experimentos adicionales en el sistema prototipo FV/MCF (Hernández, Guinea, & San Martín, 2015).

La primera de estas pruebas consistió en identificar su temperatura de fusión mediante una cámara de termografía. Para esto se tomó una pequeña muestra del MCF,

se fundió y se vació en un contenedor de cristal de forma cuadrada (Figura 3.17a). Este contenedor contaba con un trozo de tubo PVC enrollado. Se esperó a que el MCF se solidificara nuevamente. Una vez solidificado, se hizo circular agua a 45°C durante 30 minutos por el tubo de PVC con la intención de irlo fundiendo gradualmente. Así se determinó que su temperatura de fusión se encuentra aproximadamente en el rango de 33°C a 34°C, como se muestra en las marcas de la Figura 3.17a y 3.17b.

Una segunda prueba consistió en determinar su densidad, tanto en estado sólido como líquido. Se depositó un trozo de este MCF en un contenedor cilíndrico de acero inoxidable para fundirlo. Una vez en estado completamente líquido se procedió a extraer cuidadosamente una masa determinada de éste mediante una jeringuilla. Este contenido fue pesado tanto en su estado líquido como sólido en una báscula electrónica de precisión lo que, al conocer el peso de la jeringuilla, permitió obtener los resultados que se muestran en la Tabla 3.3.

Figura 3. 17 MCF en un contenedor transparente. a) Imagen en escala de grises; b) Imagen térmica para visualizar la temperatura de fusión.

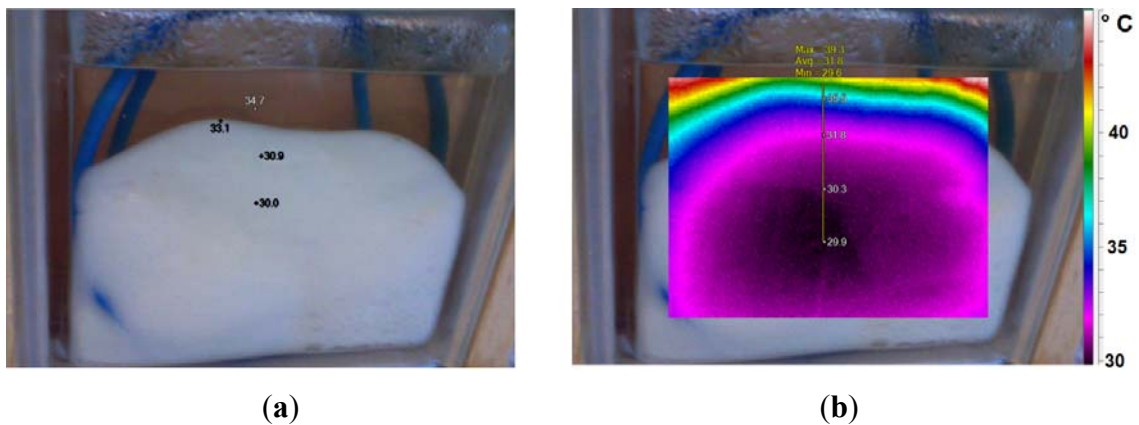


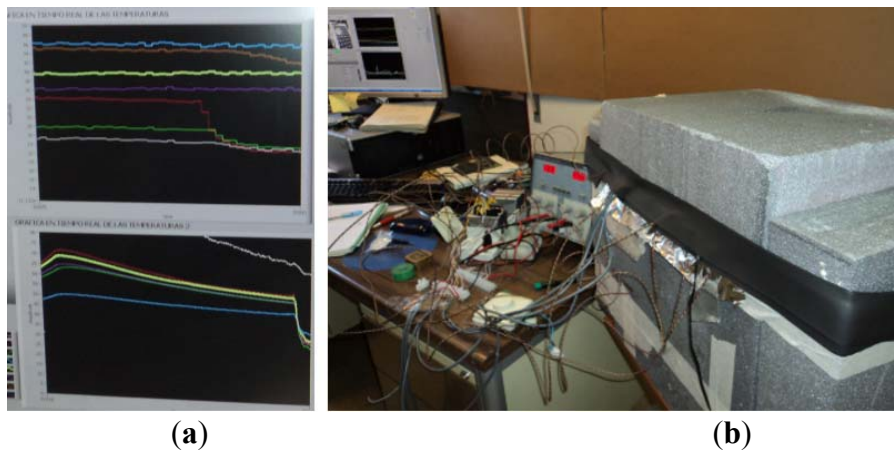
Tabla 3. 3 Datos obtenidos para el MCF.

ESTADO	MASA (gr)	VOLUMEN (ml)	DENSIDAD (kg/m ³)
SÓLIDO	0.0046	3.75	1226
LÍQUIDO	0.0046	3.85	1194

La tercera prueba consistió en determinar la constante de termo conductividad “k” y su capacitancia térmica “Cp”. Para esto se configuró un experimento apoyándose en un sistema de adquisición de datos para monitorear y almacenar valores de los sensores, además de contar con una interface para visualizar esta información.

El sistema utilizado para adquirir los datos durante estas pruebas fue el compactDAQ de National Instruments, por lo que la interface para introducir y visualizar la información en tiempo real fue desarrollada sobre la plataforma LabView. En la Figura 3.18a, se pueden observar gráficas de temperatura durante la realización de una de las pruebas. En la Figura 3.18b se pueden apreciar las sondas de temperatura que van hacia el contenedor Pss que se encuentra aislado y que contiene el MCF.

Figura 3. 18 Configuración del experimento para determinar las características del MCF. (a) Interface gráfica en LabView (b) Sondas de temperatura en el contenedor cilíndrico.



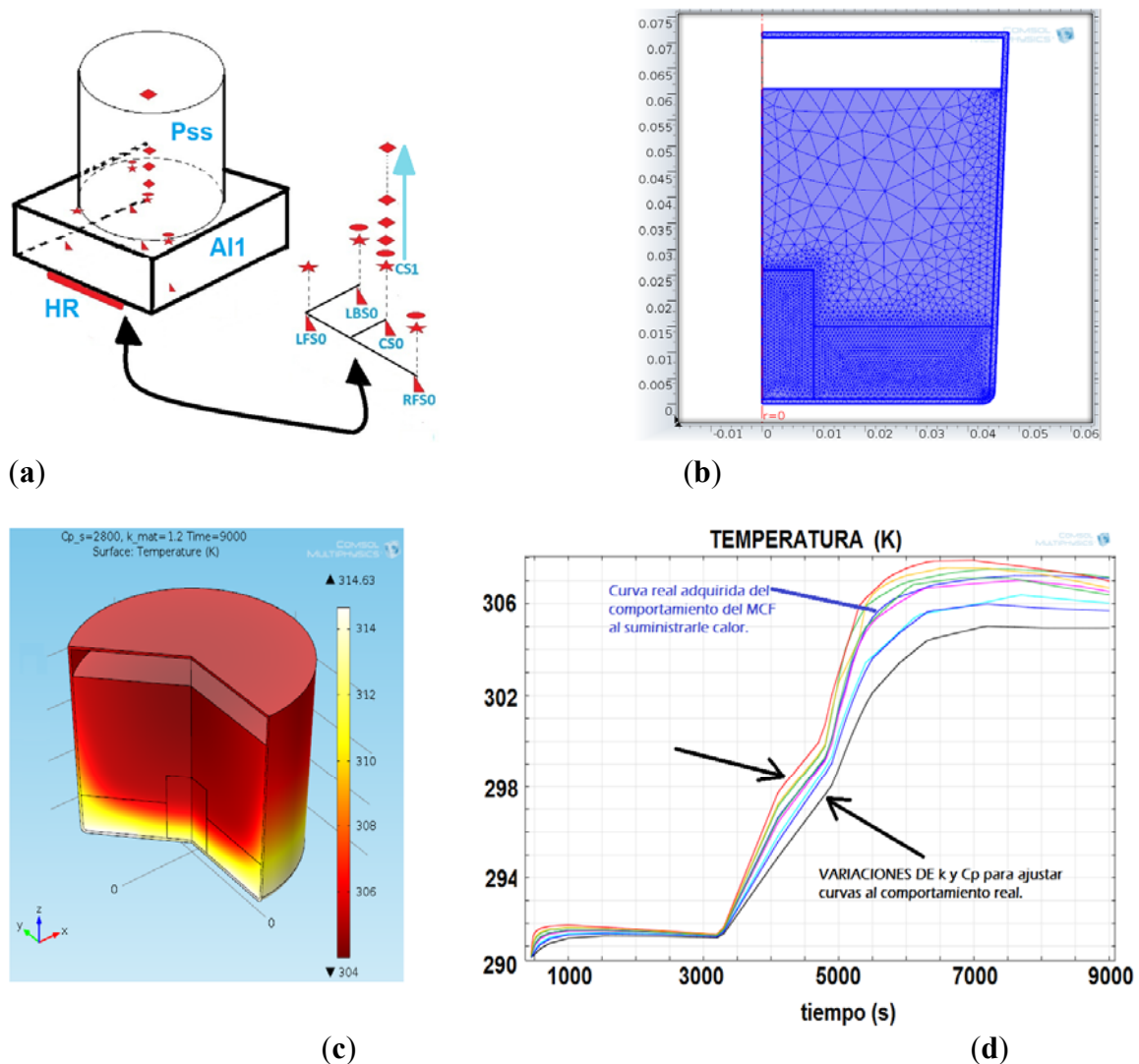
En la Figura 3.19a se puede ver la configuración del experimento, ubicando la resistencia calefactora de 25 W (HR), una placa de aluminio (A11), y el contenedor de acero inoxidable (Pss). También se pueden apreciar las diferentes alturas a las que han sido colocados los sensores, tomando como referencia la parte inferior de la placa de aluminio:

- LFSx, sensor izquierdo que se encuentra al frente y en el nivel x.
- LSBx, sensor izquierdo que se encuentra al fondo y en el nivel x.
- CSx, sensor central del nivel x.
- RFSx, sensor derecho que se encuentra al frente y en el nivel x.
- Los sensores del nivel $x=0$ proporcionan las temperaturas de la parte inferior de la placa A11.
- Los sensores del nivel $x=1$ miden las temperaturas de la placa A11 en la parte superior.
- Los sensores del nivel $x=2$ proporcionan las temperaturas del fondo del Pss por la parte interior, encontrándose al mismo tiempo en contacto con el MCF.
- Los sensores de nivel $x=3-5$ se encuentran dentro del MCF a diferentes alturas.

- El sensor del nivel $x=6$ da información de la capa de aire que se encuentra entre la altura máxima del MCF y la tapa del contenedor cilíndrico.

En la Figura 3.19b se presenta el modelo en elementos finitos modelado en COMSOL Multiphysics. En este modelo se hizo una división del mallado más fino del centro y de la base del contenedor de aluminio para lograr una mayor precisión. En la Figura 3.19c se muestra la distribución de la temperatura obtenida en 3D con un corte transversal que representa el Pss sobre el cual se aloja el MCF. El Pss presenta un mayor calentamiento en la parte inferior ya que está colocado sobre una placa de aluminio que en su cara inferior lleva adherida una resistencia calefactora. En la Figura 3.19d se muestran los resultados del análisis paramétrico. Se variaron los valores de k y C_p para ajustar la curva del modelo al sistema real. El mejor ajuste se consiguió con los valores de $C_{p_{f1}} = C_{p_{fs}} = 2800 \text{ J/kgK}$ y $k = 1.2 \text{ W/mK}$.

Figura 3. 19 (a) Esquema del contenedor y los sensores; (b) Simulación en elementos finitos; (c) Imagen termográfica del cilindro; (d) curva de temperatura para distintos valores de k y C_p .



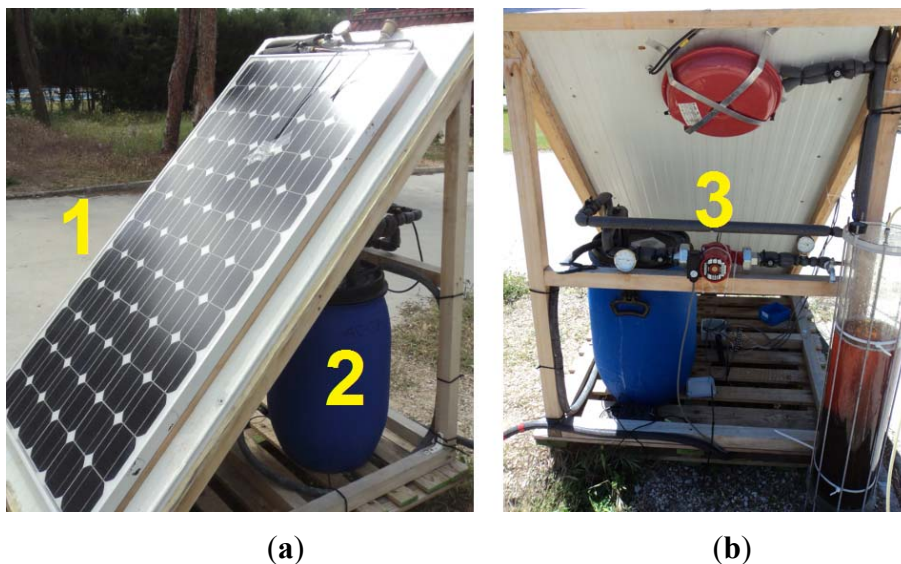
3.3.3 Implementación del sistema híbrido panel FV/MCF.

El sistema híbrido diseñado para suministrar agua de calefacción sanitaria (ACS) hace uso de un panel FV y un MCF del tipo sólido a líquido (FV/MCF). El objetivo de este sistema es aprovechar el calor captado en la superficie del panel FV y transportarlo hacia el interior de un bidón con el MCF para su almacenamiento y posterior uso. Este proceso provoca a su vez una beneficiosa caída de temperatura en el panel FV, aproximadamente a la temperatura de cambio de fase de 33°C.

Este sistema cuenta con tres componentes principales (Figura 3.20):

1. Un panel FV mono cristalino (Figura 3.20a, 1), que llega a alcanzar temperaturas de hasta 80°C en verano, por lo que su eficiencia desciende considerablemente.
2. Un bidón que contiene MCF con temperatura de cambio de fase en el rango de los 32°C a los 34°C, contenido en un bidón (Figura 3.20a, 2).
3. Un sistema hidráulico, inicialmente con un circuito primario sumergido en el MCF contenido dentro del bidón (Figura 3.20b, 3).

Figura 3. 20 Sistema híbrido ACS.



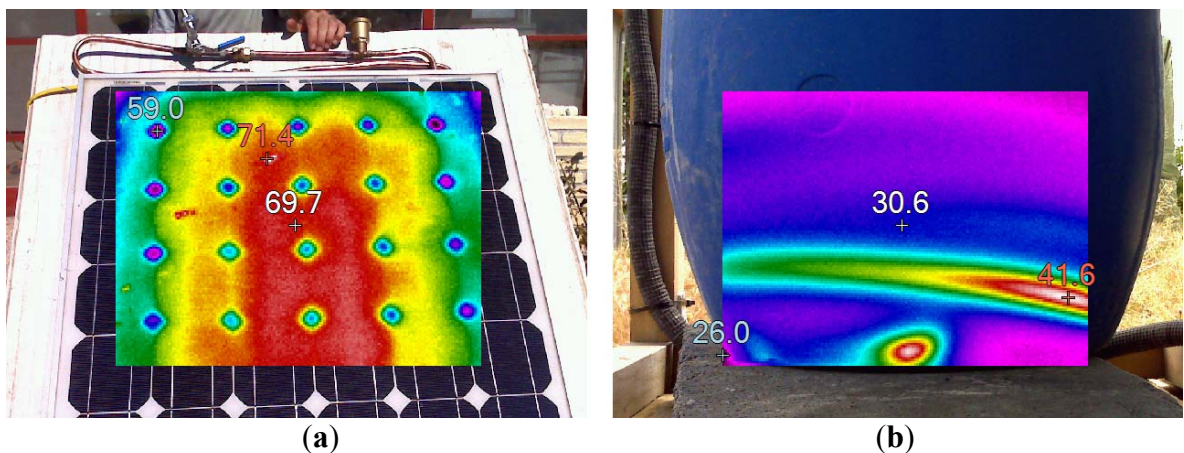
Un panel FV cuenta con una hoja de especificaciones técnicas del fabricante, donde se describen determinadas características del sistema, pero cuyas medidas se realizan de acuerdo a la normativa EN 61215 en condiciones estándar (1000W/m², AM 1.5, 25°C) (Balfour, Shaw, & Bremer Nash, 2013) (Rekioua & Matagne, 2012) (Arcuri, Reda, &

De Simone, 2014) (Ferrara & Phillip, 2011). Es decir, son condiciones ideales que en el día a día de la operación del panel solar suelen muy raramente presentarse.

Por lo anterior, a pesar de que en el laboratorio el panel mono cristalino tiene una mayor eficiencia que un panel con estructura amorfa, en condiciones reales puede ocurrir que la celda amorfa llegue a una producción anual de energía superior a la mono cristalina, ya que las condiciones del entorno -por ejemplo, temperaturas de trabajo alrededor de los 60°C- desfavorecen mayormente la eficiencia de la mono cristalina.

Durante las pruebas de este sistema híbrido panel FV/MCF se detectó que el panel solar alcanzaba fácilmente temperaturas por encima de los 80°C durante el verano, e incluso durante el primer mes de inicio del otoño, como se muestra en la foto térmica de la Figura 3.21a. En la Figura 3.21b se presenta una foto térmica del bidón un par de horas después de llevar a cabo dos recirculaciones, en la que se puede observar temperaturas por encima de la temperatura de cambio de fase.

Figura 3. 21(a) Panel FV con temperaturas mayores a los 70°C; (b) Bidón con MCF.



Aunque existen ciertos criterios establecidos para seleccionar el MCF más adecuado para una determinada aplicación, tales como la temperatura de cambio de fase dentro del rango deseado, estabilidad química para el número de ciclos térmicos, calor específico por unidad de volumen y masa, etc., el MCF donado se encontró apto para ser usado en este sistema híbrido en base a las pruebas realizadas en el punto anterior. También se observó que durante las pruebas en los meses de verano, cuando no se circulaba el fluido por las noches, el MCF no llegaba en algunos casos a solidificarse. De forma similar, durante el día en el crudo invierno, en algunas ocasiones no se lograba fundir gran parte de su masa. Presentando una reducción en la capacidad de

ofrecer un control de temperatura para el panel FV o una reducción en la capacidad de suministrar energía térmica.

Capítulo 4

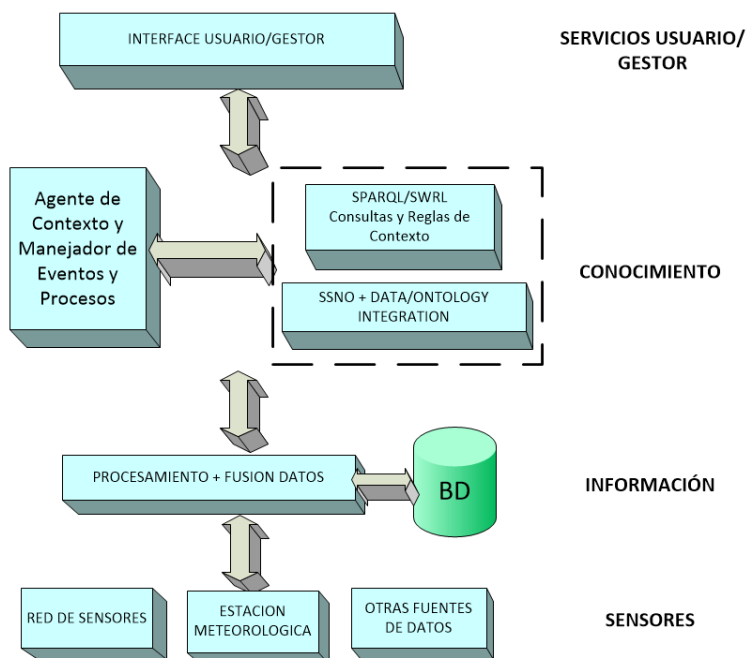
Arquitectura Propuesta

CAPITULO 4. ARQUITECTURA PROPUESTA.

El principal objetivo de este trabajo es crear una arquitectura distribuida de percepción y control inteligente para la gestión eficiente de la energía térmica de un edificio. En este capítulo se presenta la arquitectura para la integración y control de los sistemas de almacenamiento de energía térmica vistos en el capítulo anterior, así como de la red de percepción sensorial de la que se dispone. Dentro de ésta se encuentra una infraestructura basada en la web semántica, que aúna e integra nodos sensoriales de diversa naturaleza.

Esta arquitectura se divide en cuatro capas interconectadas entre sí (Figura 4.1), soportada en los artículos (Hernández, y otros, 2015) (Uribe, y otros, 2015). La de más bajo nivel es la red de sensores. El procesamiento y la fusión sensorial de las medidas obtenidas a este nivel se realizan en la segunda capa. A nivel superior está la aportación de la red semántica a la integración de estos datos en el edificio inteligente. Por último encontramos el nivel de comunicación con el usuario.

Figura 4. 1 Arquitectura propuesta.

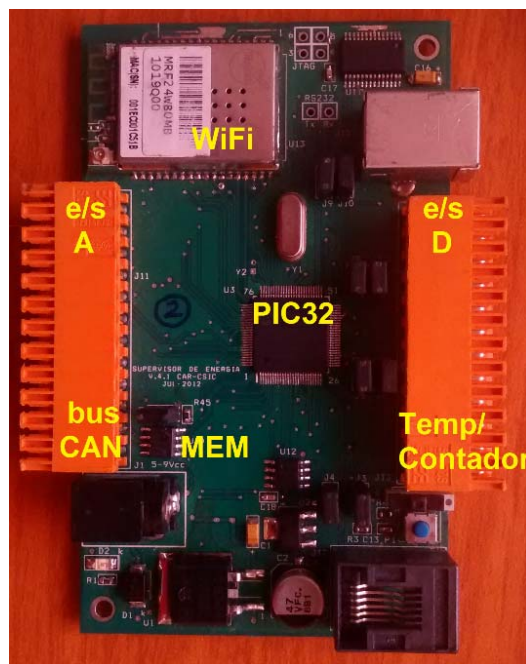


Se van a describir los elementos más importantes de cada uno de estos niveles, que van a permitir la gestión de los sistemas térmicos vistos en el capítulo anterior.

4.1. Capa de Sensores.

A nivel sensorial se encuentra una red de nodos físicos. Se conoce como nodo sensor tanto el elemento primario o transductor como su hardware y software para procesar datos adquiridos. Este hardware está generalmente compuesto por una unidad de procesamiento para llevar a cabo cálculos computacionales, puertos de comunicación para interactuar con el entorno, y una unidad de medición a través de la cual se pueden conectar varios transductores (Figura 4.2). Recordemos que en la ontología de sensores semánticos (sección 2.4.1), el concepto sensor no se restringe a un dispositivo de medición físico, sino que implica un cambio de paradigma donde se permite modelar cualquier cosa que pueda estimar o calcular el valor de una propiedad. Esto proporciona una gran potencia interpretativa para mejorar la funcionalidad, rendimiento y capacidades de un sistema de sensores (Hunter, y otros, 2010).

Figura 4. 2 Componentes principales del nodo sensor.

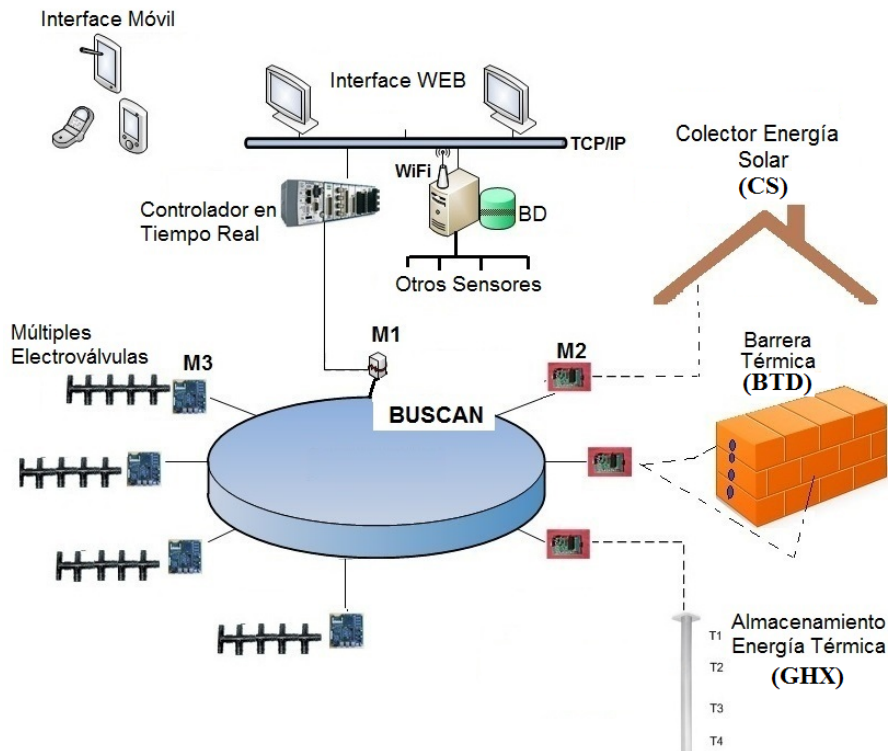


En el prototipo del edificio nZEB usado para probar la arquitectura de decisión propuesta se han utilizado principalmente tres tipos de nodos sensores, desarrollados específicamente para adquirir datos del sistema, con capacidades de protocolos de comunicación IEEE 802.11b, bus CAN y puerto serie. Estos nodos sensores son responsables de la adquisición de datos de variables tales como la temperatura interior o

exterior, mediciones de flujo, cambios en los estados de las válvulas del circuito hidráulico, el encendido y apagado de un pequeño recirculador, etc.

La arquitectura de la red sensorial se muestra en la Figura 4.3. Como se puede observar, conectan con los sistemas térmicos del edificio vistos anteriormente (colector solar, barrera térmica, etc.).

Figura 4. 3 Arquitectura física de la red de sensores para la monitorización y control del edificio nZEB.



Los principales componentes de la red de sensores del edificio se detallan a continuación, donde los tres primeros, M1, M2 y M3, son desarrollos propios (Patente nº ES 2 380 029 B1, 2013) (Hernández, Guinea, & Garcia-Alegre, 2014).

1. M1: módulo pasarela.
2. M2: sensores dedicados a medir temperaturas dentro y fuera del edificio en varios puntos: temperatura interior, del subsuelo, en los muros, en ventanas, y en el techo.
3. M3: sensores para la apertura y cierre de válvulas, monitorización de la temperatura y flujo volumétrico del fluido calo portador.
4. Controlador en Tiempo Real (CTR): sistema de control de bajo nivel principal con sistema operativo VxWorks.
5. Ordenador: PC usado principalmente para el intercambio de datos e información con el CTR, y adquirir dato de otras fuentes de información.

6. BD: almacena información que proviene de los sensores para su posterior procesamiento.
7. Interface móvil y WEB: Tanto el CTR como el nodo sensor basado en un PIC de 32 bits tienen un servidor web, y permiten habilitar aplicaciones móviles.

Los nodos sensores están basados en microprocesadores de 16 y 32 bits. Estos responden a peticiones de datos hechas por el CTR y a eventos, y envían datos cada determinado tiempo. También almacenan datos y procesan mensajes. Estos nodos están compuestos de:

1. Sondas NTC para medir temperaturas interiores y exteriores.
2. Salidas digitales y un módulo de potencia para operar válvulas que controlan el circuito hidráulico del edificio nZEB.
3. Memoria EEPROM para el almacenamiento de promedios históricos tales como reportes horarios, diarios y semanales.
4. Modulo con bus CAN y un protocolo sencillo para el intercambio de mensajes y comandos.
5. Para el PIC16, un visor de 7 segmentos que además de mostrar la temperatura por sonda, facilita acceder a funciones tales como auto-calibración y configuración de las sondas NTC.
6. Para el PIC32, un servidor web para acceder a valores en tiempo real, mostrar la ubicación de cada una sus sondas NTC, y funciones de configuración como las mencionadas para el PIC16 (auto calibración, configuración de sondas NTC, banda muerta, y otros).

La Figura 4.4 muestra la distribución de los sensores en la planta baja y alta del edificio nZEB. Se puede ver que en su mayoría se trata de nodos de temperatura y presencia. M1 (cuadrado azul oscuro) es un módulo pasarela para conectar los datos provenientes del bus CAN al CTR. Está situado en el cuarto de control, planta baja. En esta planta, los nodos sensores M2 (cuadrado rojo) se usan para adquirir la temperatura interior y en mayor parte la temperatura del subsuelo a diferentes profundidades, repartidos de forma equidistante. También en esta planta, los nodos sensores M3 (cuadrado amarillo) permite abrir y cerrar válvulas de la zona de almacenamiento (GHX). En la planta alta, los sensores M2 miden la temperatura interior y la de los muros exteriores, tanto su cara interna como externa. El nodo sensor M3 permite abrir y cerrar válvulas de la zona de captura de la energía (CS), y en este caso de la zona de uso (BTD).

Además se cuenta también con un par de sensores de presencia (círculos azul claro), en las dos plantas.

Figura 4. 4 Distribución de los nodos sensores en el edificio nZEB. (a) Planta baja, (b) Planta alta.

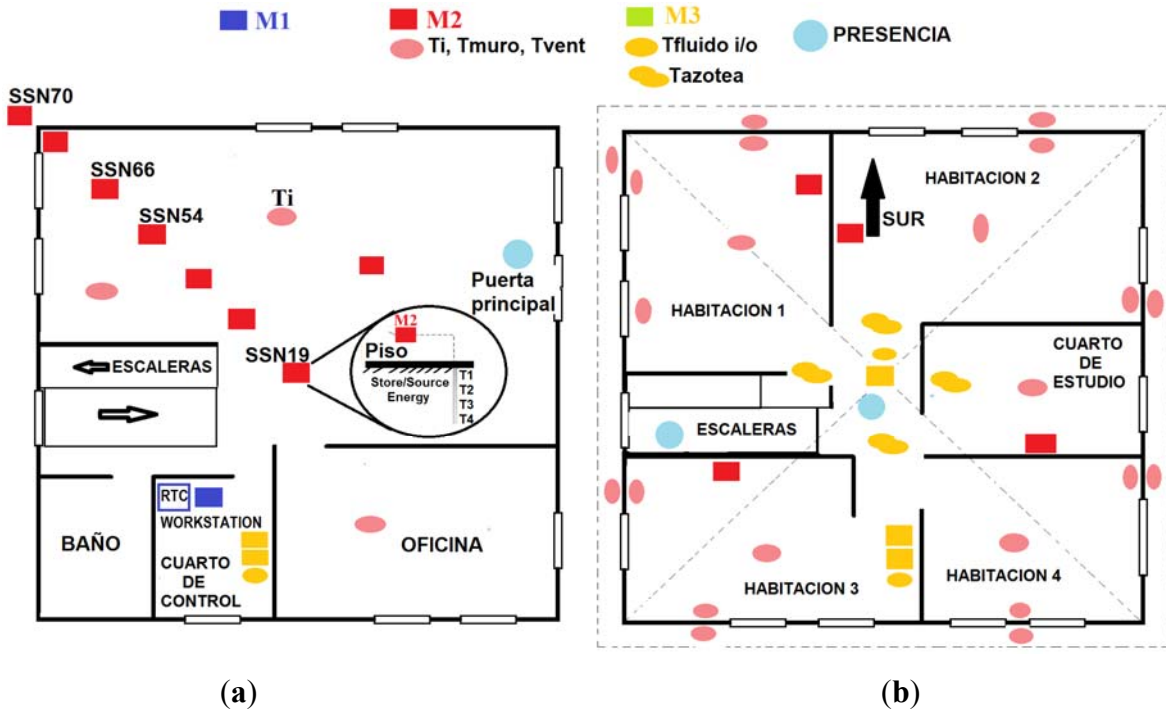
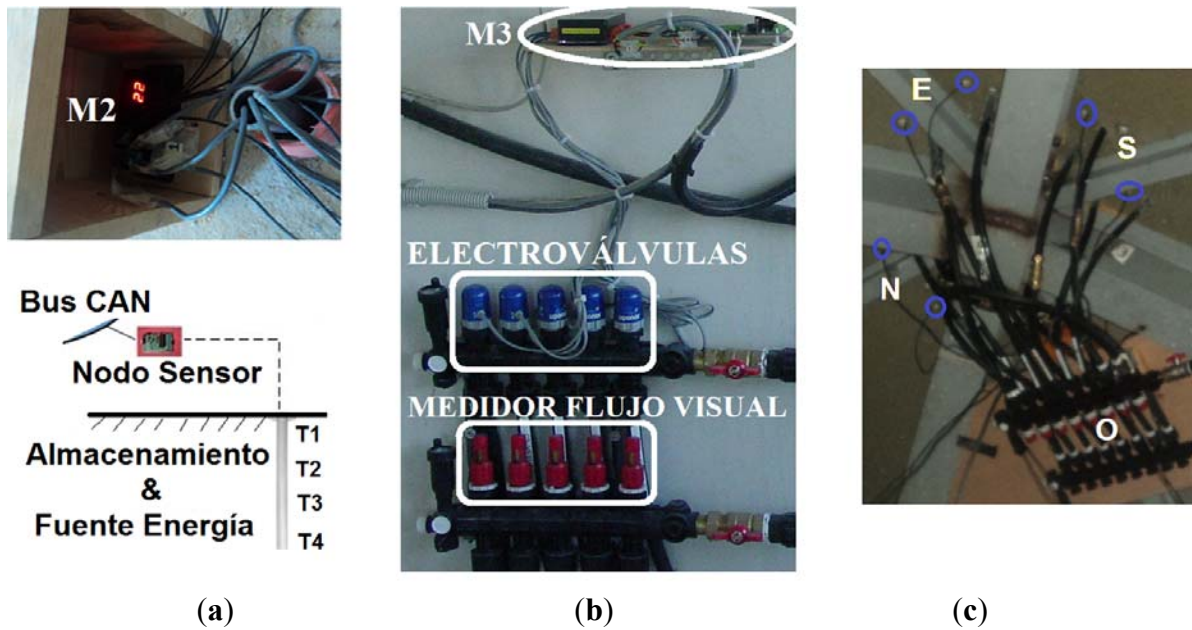


Figura 4. 5 Diferentes nodos sensores para la medición de temperaturas y control de electroválvulas.



La Figura 4.5 muestra el sensor M2 (PIC16) para adquirir la temperatura del intercambiador de energía térmica del subsuelo (a), el sensor M3 (PIC32) para la medición de temperaturas del fluido en circulación y manipulación de electroválvulas que interconecta los sistemas CS, GHX y BTD (b). Adicionalmente, un distribuidor de electroválvulas para controlar de forma independiente la circulación del fluido a cada una de las caras del CS, ubicado sobre una base de madera que también sostiene un sensor del tipo M3 para su operación (c). Todos ellos son modelos reales utilizados en el prototipo del edificio.

En el caso de los datos provenientes de la red de sensores bus CAN, se tiene programado el envío de datos por eventos, por tiempo específico, y por demanda. Por ejemplo, el primer caso se presenta cuando se abre o cierra alguna electroválvula del colector múltiple para controlar el fluido calo-portador a una zona específica del intercambiador de energía térmica del subsuelo. El segundo caso se presenta cuando han transcurrido 10 minutos en los cuales el nodo sensor no ha reportado alguna variación en sus datos dentro de una banda muerta configurada. Finalmente, en cualquier momento la aplicación principal o cualquier aplicación móvil pueden solicitar información a cualquier nodo de la red a través del servidor web del controlador en tiempo real, y de forma específica a aquellos nodos basados en el microcontrolador PIC32 con servidor web integrado.

Dentro de la red de sensores también se capturan variables meteorológicas tales como la temperatura y humedad exterior, radiación solar, etc. La Figura 4.6 muestra un ejemplo de los datos recolectados por la estación meteorológica. Inicialmente se capturaban cada cinco minutos, posteriormente se incrementó el tiempo de muestreo a quince minutos para disminuir el volumen de almacenamiento y procesamiento.

Estos sensores de medición han sido implementados en el edificio nZEB mediante sondas del tipo NTC. En el colector solar del tejado tienen una gran importancia, ya que estos toman la decisión de circular el fluido calo portador hacia el intercambiador de calor térmico en el subsuelo.

Un nodo sensor PIC32 es usado para el sistema híbrido FV/MCF (capítulo 3) para mejorar la eficiencia del panel. Independientemente del material, los paneles fotovoltaicos se calientan con facilidad al estar continuamente expuestos al sol. En nuestro prototipo, el panel FV está orientado con un ángulo de 45° al sur, con la intención de captar durante el mayor tiempo posible la energía solar. El calentamiento es uno de los factores que degrada más drásticamente su rendimiento. El objetivo del

sistema híbrido, como ya se comentó, es contrarrestar este efecto reduciendo este sobrecalentamiento y, al mismo tiempo, aprovechando toda la energía calorífica extraída para su uso en el edificio nZEB.

Figura 4. 6 Datos de la estación meteorológica.

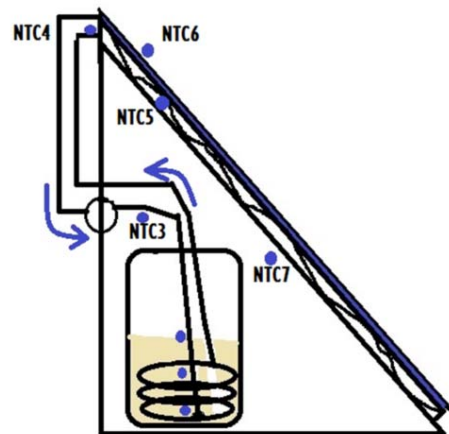
FechaHora	IndoorH(%)	IndoorT(°C)	OutdoorH(%)	OutdoorT(°C)	AbsPress(hPa)	Viento(m/s)	Rafaga(m/s)	Dirección	RelPress(hPa)	Rocio(°C)	TempSensación(°C)	LLuviaHoraria(mm)	TotalLluvia
01/01/2012 00:09	65	8.1	98	5.1	946.8	0	0	NW	1007	4.8	5.1	0	0.9
01/01/2012 00:24	65	8.1	98	5.2	946.7	0	0	W	1006.9	4.9	5.2	0	0.9
01/01/2012 00:39	65	8.1	97	5.4	946.8	0	1	NWW	1007	5	5.4	0	0.9
01/01/2012 00:54	65	8.1	96	5.3	946.6	0.3	1.4	SW	1006.8	4.7	5.3	0	0.9
01/01/2012 01:09	65	8.1	97	5.4	946.5	1	2.7	SW	1006.7	5	5.4	0	0.9
01/01/2012 01:24	65	8.1	97	5.3	946.4	0	0	S	1006.6	4.9	5.3	0	0.9
01/01/2012 01:39	65	8.1	96	5.2	946.3	4.4	7.1	NW	1006.5	4.6	-1.1	0.3	1.2
01/01/2012 01:54	66	8.1	96	5.1	946.1	2.7	5.1	S	1006.3	4.5	2	0.3	1.2
01/01/2012 02:09	66	8.1	96	5.3	945.8	2.7	5.1	W	1006	4.7	2.2	0.3	1.2
01/01/2012 02:24	66	8.1	96	5.1	945.5	3.4	4.4	W	1005.7	4.5	0.5	0.6	1.5
01/01/2012 02:39	66	8.1	96	5.1	945.4	3.4	5.1	SSW	1005.6	4.5	0.5	0.3	1.5
01/01/2012 02:54	67	8.1	97	5.3	945.4	2.4	5.1	W	1005.6	4.9	2.9	0.6	1.8
01/01/2012 03:09	67	8.1	97	5.3	945.3	2.7	4.8	W	1005.5	4.9	2.2	0.6	1.8
01/01/2012 03:24	67	8.1	96	5.2	945.2	4.4	8.8	SWW	1005.4	4.6	-1.1	0.6	2.1
01/01/2012 03:39	67	8.1	95	5.3	945.1	3.4	6.1	NWW	1005.3	4.6	0.7	0.6	2.1
01/01/2012 03:54	67	8.1	94	5.1	945.3	6.1	11.6	SW	1005.5	4.2	-3.4	0.6	2.4
01/01/2012 04:09	67	8.1	95	5	945.2	2.7	5.4	NW	1005.4	4.3	1.8	0.6	2.4
01/01/2012 04:24	67	8.1	95	4.9	945.2	4.8	9.2	NW	1005.4	4.2	-2	0.3	2.4
01/01/2012 04:39	67	8.1	94	4.8	945.4	4.1	6.5	SWW	1005.6	3.9	-1.1	0.3	2.4
01/01/2012 04:54	67	8.1	94	5.1	945.5	4.4	11.2	W	1005.7	4.2	-1.2	0.3	2.7
01/01/2012 05:09	67	8.1	92	5.2	945.7	5.8	9.2	NW	1005.9	4	-2.9	0.3	2.7
01/01/2012 05:24	67	8.1	92	5.2	946	6.1	10.5	SW	1006.2	4	-3.2	0.3	2.7
01/01/2012 05:39	67	8.1	92	5.1	946.3	4.1	9.5	SW	1006.5	3.9	-0.7	0.3	2.7
01/01/2012 05:54	67	8.1	93	5	946.7	3.4	6.8	NNW	1006.9	4	0.4	0	2.7
01/01/2012 06:09	67	8.1	94	4.9	946.8	5.1	8.2	SWW	1007	4	-2.4	0	2.7
01/01/2012 06:24	68	8	94	4.9	947	3.4	5.4	SSE	1007.2	4	0.3	0	2.7
01/01/2012 06:39	67	8	93	5	947.3	3.7	6.8	SW	1007.5	4	-0.2	0	2.7
01/01/2012 06:54	67	8	92	5.1	947.8	3.4	7.1	SW	1008	3.9	0.5	0	2.7
01/01/2012 07:09	68	8	92	5.1	948	4.1	8.2	W	1008.2	3.9	-0.7	0	2.7
01/01/2012 07:24	67	8	92	5.1	948.6	4.1	7.5	NW	1008.8	3.9	-0.7	0.3	3
01/01/2012 07:39	67	8	91	5.1	949.1	4.4	8.8	NW	1009.3	3.8	-1.2	0.6	3.3
01/01/2012 07:54	68	8	91	5.2	949.6	1.7	3.4	N	1009.8	3.9	5.2	0.6	3.3
01/01/2012 08:09	67	8	90	5.3	950	3.4	6.8	W	1010.2	3.8	0.7	0.6	3.3
01/01/2012 08:24	68	8	89	5.4	950.5	2.7	5.4	NNE	1010.7	3.7	2.3	0.3	3.3

Una vez identificados los parámetros básicos del MCF se acondicionó un sistema de pruebas de campo como se muestra en la Figura 4.7a. Los puntos azules (Figura 4.7b) indican la ubicación de las sondas NTCs y la dirección de las flechas marcan el sentido del flujo.

Figura 4. 7 (a) Sistema experimental real; (b) Distribución de las sondas en el sistema FV/MCF.



(a)



(b)

- NTC0-NTC2: se ubican dentro del MCF, siendo concéntricas al bidón, numeradas de arriba hacia abajo (entradas analógicas 0-2).
- NTC3; temperatura a la entrada del serpentín alojado dentro del MCF (entrada analógica 3).
- NTC4: temperatura a la entrada del serpentín alojado entre el panel FV y la estructura que lo soporta (entrada analógica 4).
- NTC5: temperatura interior entre el panel FV y la estructura que lo soporta (entrada analógica 5).
- NTC6: temperatura exterior de la parte superior izquierda del panel FV (entrada analógica 6).
- NTC7: temperatura ambiente entre la parte trasera del panel FV y el bidón, a una altura de medio metro (entrada analógica 7).

En esta parte sólo se utilizó un nodo sensor del tipo M3, suficiente para recolectar todas las señales de las NTCs y controlar el arranque y paro de un pequeño recirculador. Puesto que este sensor M3 cuenta con conexión WiFi, se interconecta a la red local del edificio nZEB.

4.2. Capa de Procesamiento y Fusión de Datos.

En este nivel se procesan los datos obtenidos por la capa sensorial. Cuenta con varias funcionalidades, entre otras, con un algoritmo de aprendizaje para predicción de eventos meteorológicos, y un controlador basado en una técnica de computación suave (lógica difusa) para seleccionar la zona del intercambiador térmico en el subsuelo de acuerdo a la temperatura interior y flujo de calor del edificio nZEB.

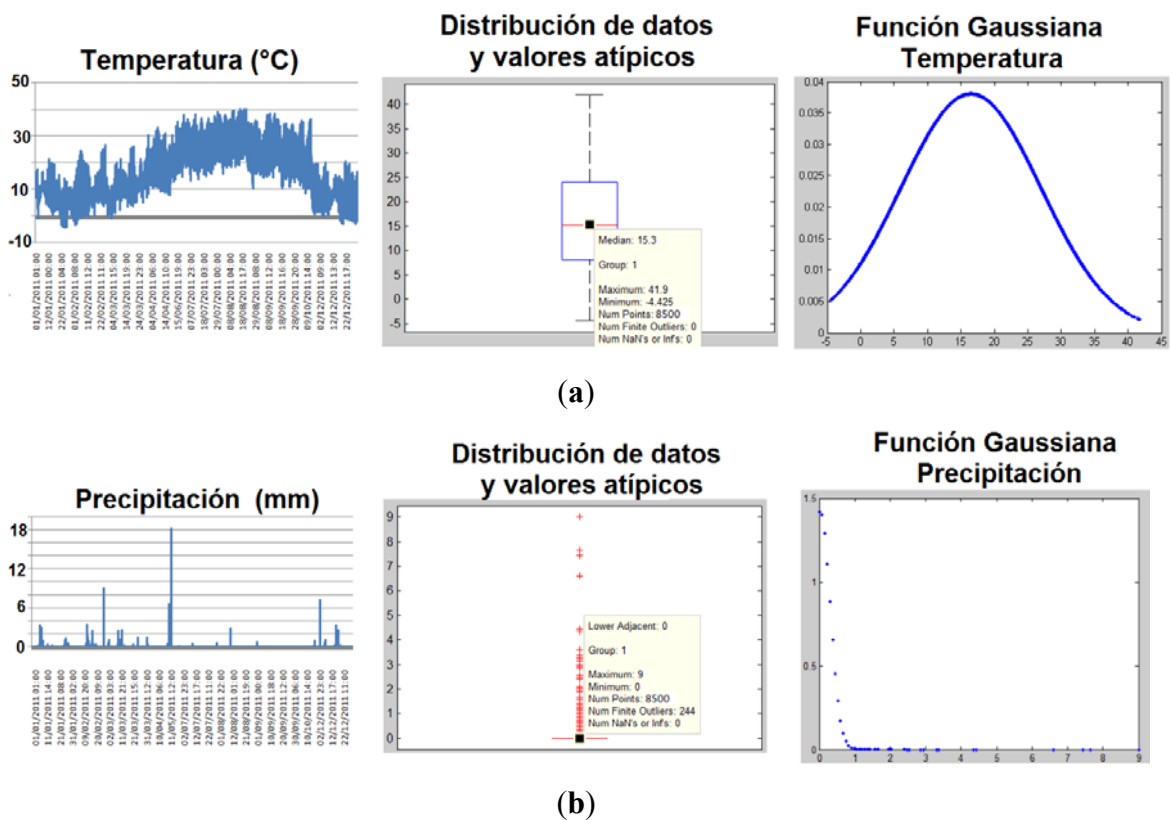
La información obtenida por los sensores se almacena en una BD relacional, donde se guarda el histórico de todo el sistema. Así, en cualquier momento se puede hacer una consulta sobre datos pasados, adicionalmente a los reportes por defecto (horario, diario y semanal) que se van mostrando en tiempo real en la capa de la interface con el usuario. Estos datos más recientes se pueden mostrar mediante interfaces móviles, ya sea que se conecten con el servidor web del CTR o, de forma puntual, con el servidor web de un nodo sensor PIC32. En el servidor web del CTR se encuentra una mayor cantidad de información, mientras que cuando se hace una conexión a través del nodo

sensor PIC32 la información se limita al nodo al que se ha conectado (parámetros de configuración, promedios, y sus entradas y salidas).

4.2.1 Tratamiento de los Datos.

Uno de los objetivos principales cuando se analizan los datos históricos es buscar los incompletos o los valores anómalos. Por ejemplo, con la estación meteorológica se obtuvieron, para el año 2011, los datos mostrados en la Figura 4.8. El tiempo de muestreo fue de 15 minutos, y se promediaron a cada hora. Se muestran las series de temperatura y lluvia así como la distribución por cuartiles y la función gaussiana de ajuste.

Figura 4. 8 Series temporales de temperatura y precipitación pluvial de la estación meteorológica CAR-UPM CSIC, año 2011.



La temperatura es una de las variables meteorológicas que mejor se aproximan a la distribución Gaussiana, y también la radiación solar puede ser modelada como tal. En general, la temperatura presenta una variabilidad normal sin “ningún dato anómalo”, solo algunos por encima de los 40°C en agosto, a diferencia de la lluvia o la radiación

solar, con muchos “valores atípicos”. Sin embargo la lluvia, incluso restringiendo a periodos húmedos, sigue una distribución no gaussiana (logarítmica negativa).

Aparte de llevar a cabo estas tareas para encontrar o determinar datos erróneo mediante mediciones estadísticas tales como promedios, varianza y desviación estándar, también se evita almacenar datos de más. Los datos adquiridos han presentado pocos errores, menos del 3%, los cuales han sido eliminados antes de que las series temporales horarias sean calculadas para ser usados como entrada en el algoritmo de regresión logística.

Dentro del procesamiento de datos se ha incorporado, como funcionalidad adicional al usuario, la predicción mediante una regresión logística de fenómenos meteorológicos como la lluvia. Se ha implementado el algoritmo de regresión logística (Agresti, 2012).

Usando los datos del año 2011, ya procesados, se encontraron los coeficientes mostrados en la Tabla 4.1 de algunas variables que permiten predecir la posibilidad de lluvia. Los predictores que tienen un impacto negativo en el evento de “lluvia” son la temperatura máxima y el promedio de radiación solar, lógicamente, ya que valores altos disminuyen la posibilidad de que llueva. Los demás tienen un impacto positivo. También se puede ver que la humedad de madrugada y al atardecer tienen un impacto positivo pero con diferentes pesos, siendo que la humedad de la mañana más relevante. Esta avala los resultados obtenidos al analizar los datos, donde se encontró que casi el 85% de los eventos de lluvia correspondían a valores de humedad por encima del 80%.

Tabla 4. 1 Resultados obtenidos por algoritmo de regresión logística.

PREDICTOR	Coficiente
Constante	-2.4093
Humedad Matutina	0.1303
Humedad Vespertina	1.0566
Temperatura Máxima	-1.4562
Temperatura Mínima	1.8321
Promedio de Radiación	-0.4315
Radiación Máxima	0.3019

Los resultados del algoritmo respecto a la predicción se muestran en la Tabla 4.2, con una eficiencia del 94%. Se tomaron para hacer el ajuste los valores que aseguraban el evento lluvia, descartando chubascos e incluso lluvia suave (caídas a una velocidad

de 0.20 mm/hora o menos), de ahí alto porcentaje en la precisión. De las 100 medidas, 19 de lluvia y 81 de no lluvia, el predictor acertó en 94 casos.

Tabla 4. 2 Predicción del evento lluvia.

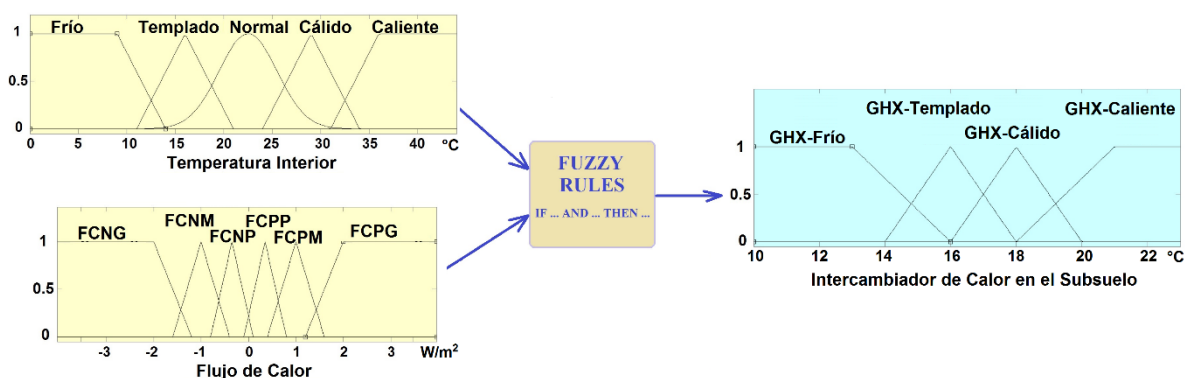
	LLUVIA	NO LLUVIA
Sensor	19	81
Aciertos	18	76
Fallas	5	1
Precisión	94 %	

4.2.2 Controlador de Lógica Difusa

Se ha diseñado un controlador de lógica difusa (FLC) para la selección de la zona del intercambiador de energía térmica del subsuelo (GHX) que va a suministrar la energía necesaria para alcanzar una temperatura deseada en la barrera térmica dinámica.

La configuración del FLC se muestra en la Figura 4.9. Las variables de entrada son la temperatura en el interior y el flujo de calor. El rango de la temperatura en el interior va de 0°C a 44°C, cubierto por cinco conjuntos difusos de formas trapezoidales y gaussianas, con etiquetas: Frío, Templado, Normal, Cálido y Caliente.

Figura 4. 9 Controlador de Lógica Difusa para la selección de la zona del intercambiador de energía térmica.



La segunda variable de entrada es el flujo de calor, con valores en el intervalo de $[-5, 5]$ W/m^2 . Las funciones de pertenencia triangulares y trapezoidales definen los conjuntos difusos: Flujo de Calor Negativo Grande (FCNG), Flujo de Calor Negativo Mediano (FCNM), Flujo de Calor Negativo Pequeño (FCNP), Flujo de Calor Positivo Pequeño (FCPP), Flujo de Calor Positivo Mediano (FCPM), y Flujo de Calor Positivo Grande (FCPG).

La variable de salida es la temperatura deseada en la barrera dinámica en intervalo [10°C, 23°C], la cual está mapeada a la zona del intercambiador de energía térmica del subsuelo. El rango de valores de este intercambiador es: {Caliente, Cálido, Templado, Frío}. La base de conocimiento difuso (reglas) se muestra en la Tabla 4.3.

Habitualmente el fluido calo-portador circula a través de los muros en periodos de entre 4-8 minutos. Las temperaturas a la entrada y salida de los distribuidores durante la transferencia de calor son monitoreadas cada 15 segundos. Este periodo de muestreo para la adquisición de datos es suficiente para confirmar que realmente hay una transferencia de energía, considerando un diferencial de al menos 2°C entre la entrada y la salida del distribuidor.

Tabla 4. 3 Base de Conocimiento del controlador difuso.

Temperatura/ Flujo Térmico	FCNG	FCNM	FCNP	FCPP	FCPM	FCPG
FRIO	GHX Caliente	GHX Cálido	GHX Templado	GHX Frío	GHX Templado	GHX Caliente
TEMPLADO	GHX Caliente	GHX Caliente	GHX Caliente	GHX Cálido	GHX Cálido	GHX Templado
NORMAL	GHX Templado	GHX Cálido	GHX Caliente	GHX Caliente	GHX Caliente	GHX Cálido
CALIDO	GHX Templado	GHX Cálido	GHX Caliente	GHX Caliente	GHX Caliente	GHX Caliente
CALIENTE	GHX Frío	GHX Frío	GHX Templado	GHX Cálido	GHX Templado	GHX Frío

En definitiva, con el FLC se ha seleccionado una ruta de circulación del fluido calo portador que va desde una zona específica del intercambiador de energía térmica del subsuelo hacia la barrera térmica dinámica.

El controlador difuso sólo selecciona el recurso térmico y su zona para suministrar la energía requerida por la barrera térmica dinámica, pero no la habilita. Esta información se almacena en un sensor virtual y, tras el resultado de un árbol de decisión (sección 4.3.3), se activa o no la barrera térmica dinámica.

4.2.3 Sensores virtuales: barrera térmica y contexto usuario/edificio.

Los sensores virtuales integran información múltiple y heterogénea, tales como conocimiento experto, datos históricos, perfiles del usuario, y datos físicos de sensores y actuadores. Estos pueden ser definidos como una tupla (ecuación 4.1)

$$VS_i = \{ \langle i_1, \dots, i_N \rangle, \langle d_1, \dots, d_N \rangle, \langle O_1, \dots, O_j \rangle, \langle c_1, \dots, c_k \rangle \} \quad (4.1)$$

Donde i_N denota el conjunto de entradas, d_N el conjunto de datos adquiridos por los sensores, O_j el conjunto de salidas, y c_k datos adicionales acerca de la configuración del sensor virtual. Esta estructura de sensor virtual permite procesar datos agregando información semántica, y por tanto, construir información de contexto.

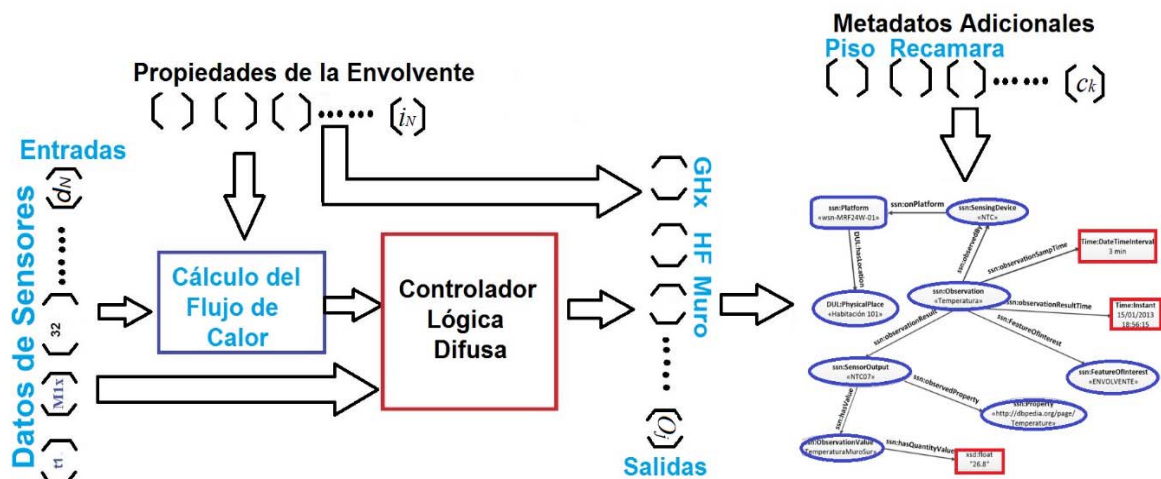
En esta parte se propone el uso de dos sensores virtuales que se presentan a continuación.

a) Sensor virtual barrera térmica.

El sensor virtual barrera térmica (SVBT) incluye dos elementos clave: el controlador de lógica difusa (sección 4.2.2) e información del edificio nZEB (temperaturas interior y en los muros, tanto para la planta baja como alta, y el flujo de calor a través de la envolvente). Como se ha comentado, el controlador de lógica difusa selecciona la zona del intercambiador de calor en el subsuelo según la temperatura interior y el flujo de energía térmica en los muros exteriores. Estos módulos son parte de la aplicación principal, ejecutándose en el controlador de tiempo real (CTR) visto en la Sección 4.1.

Además, información adicional como las propiedades del muro o características térmicas del fluido son estructuradas para formar parte de la ontología SSN, que permite denominar a este elemento dotado de información propiamente “sensor semántico”. La Figura 4.10 muestra el flujo de información de este sensor virtual, donde los datos provenientes de los sensores físicos y las propiedades de las paredes son usadas para calcular el flujo de calor.

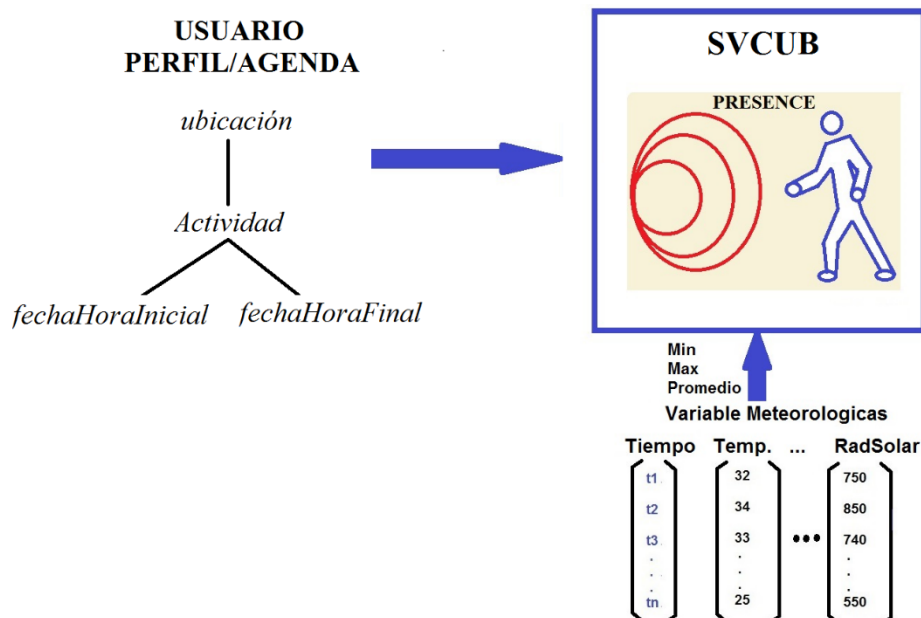
Figura 4. 10 Flujo de información del sensor virtual barrera térmica.



b) Sensor virtual contexto usuario/edificio.

El sensor virtual contexto usuario/edificio (SVCUB) procesa la información de tres fuentes diferentes (Figura 4.11). La primera de estas es la agenda de actividades del usuario y su perfil de comportamiento, con información relativa a su localización, e inicio y fin de sus actividades. Esta información permite planear con antelación el control del flujo térmico en la barrera térmica dinámica. La segunda fuente son los sensores de presencia. Como tercera fuente se tienen condiciones meteorológicas tales como la radiación solar y la temperatura exterior, útiles entre otras cosas para conocer si va o no a llover. De igual forma que el sensor virtual anterior, en la siguiente capa esta información se estructura para formar parte de la ontología SSN.

Figura 4. 11 Entradas de datos al sensor virtual contexto usuario/edificio.



4.3. Capa del Conocimiento.

Este nivel de la arquitectura cuenta con tres módulos principales: para la integración con otras fuentes de información, el “agente de contexto” y el manejador de procesos y eventos, y el tercer módulo que maneja peticiones SPARQL/SWRL en un servidor web. El segundo y tercer módulo se interrelacionan entre sí para crear un entorno consciente del contexto.

Recordando los diferentes sistemas térmicos que forman parte del edificio nZEB, así como la red de sensores para tomar datos y poder llevar acciones de control, se puede

deducir que la función principal de esta capa es conseguir la interconexión entre datos de los sensores físicos y su tratamiento computacional para la gestión de la energía térmica en el edificio. Esta representación computacional de la información abarca los siguientes aspectos, entre otros.

- 1) Propiedades del edificio nZEB y conceptos necesarios su descripción y la de su entorno físico. Por ejemplo,
 - a) Parámetros de la estructura arquitectónica del edificio tales como habitaciones, cocina, baño, etc., donde se incluya información de la obra civil; composición de los elementos de la envolvente, grosor de los muros, y otros.
 - b) Parámetros del entorno físico del edificio como temperatura exterior, humedad, presión, ruido, y otras variables meteorológicas.
- 2) Aspectos relacionados con el consumo de energía en el edificio como:
 - a) Electrodomésticos, incluyendo la descripción de estos y su consumo.
 - b) Sistemas de energía renovable y no renovable, así como las características principales de los subsistemas térmicos descritos en este trabajo.
 - c) Si se conecta el edificio nZEB a un sistema “ciudad inteligente”, un parámetro importante a incluir es el cálculo de CO₂ generado al día.
- 3) Perfiles del usuario, actividades previstas, etc. Es necesario contar con una ontología que permita consultar los perfiles de los usuarios y sus agendas. Por ejemplo, detectar cuando el usuario está de vacaciones o cuando el usuario regresará más temprano para mejorar la gestión térmica de la energía.

En esta estratificación de la información es importante que el conocimiento que se aporta sea de utilidad para el usuario. Por ejemplo:

- 1) Para el habitante del edificio nZEB es de interés conocer cuántos eventos por alta temperatura han ocurrido para recargar el intercambiador de energía térmica del subsuelo. Esto le permitirá saber si el intercambiador tiene calor almacenado para los días o noches fríos.
- 2) Si se piensa conectar el edificio nZEB a un sistema conocido como “ciudad inteligente”, puede haber información de interés para otras aplicaciones como conocer las emisiones diarias de CO₂, especificaciones del sistema, o la composición de sus elementos, tal como propiedades de los muros y configuración del intercambiador de energía térmica del subsuelo.

En definitiva, la información de los anteriores niveles permite en esta capa de gestión del conocimiento manejar el flujo térmico entre los tres sistemas térmicos definidos, CS-BTD-GHX. Además esta capa provee de una “envoltura” semántica que enriquece los valores de los sensores físicos u otras fuentes de información a bajo nivel y, como veremos, facilita la respuesta a preguntas de interés para diferentes tipos de usuario.

4.3.1. Sensores semánticos: SSN e integración con otras fuentes de información.

Este módulo (ver Figura 4.1) integra información de diversas fuentes, maneja la ontología de SSN y permite actualizar información en tiempo real a través de la interface de usuario. Por ejemplo, el usuario puede querer actualizar la localización de un sensor o su rango de operación.

Recordemos que la ontología SSN, al estar mapeada sobre un lenguaje de lógica descriptiva, cuenta con motores de inferencia y razonamiento, representando información a partir de afirmaciones creadas por conceptos y restringidas por los axiomas. También recordemos que el TBox se refiere a los conceptos o clases, y que el ABox son las instancias que se crean a partir de estas clases. Por ejemplo, en el capítulo 2 se presentó, en la Figura 2.10, un modelo semántico para la temperatura haciendo uso de la ontología SNN, como se detallará para éste y otros ejemplos de sensores semánticos a continuación.

En la parte de integración se hace las consultas a la base de datos para que esta información sea transformada en tripletas. Las solicitudes de datos son muy específicas y están manejadas en base a “*flags*”. Por ejemplo, la información del perfil del usuario no es necesaria actualizarla con frecuencia ya que se crea inicialmente, y sólo es necesario detectar cambios en el comportamiento del usuario o en su agenda. Cabe destacar que estos son casos muy específicos, por lo que en estas consultas a la BBDD relacional las tripletas a instanciar se hacen durante el tiempo de ejecución. Es decir, la ontología ya existe (TBox) y sólo se crea la instancia de la clase (ABox).

A modo de ejemplo, para cubrir los aspectos anteriores y encapsular información adicional de interés, se puede hacer uso de una lista de preguntas relevantes (*competency questions*). Estas dan pauta para conocer qué puede hacer falta definir en la ontología SSN y a qué preguntas podrá responder nuestro sistema. Así se crea una

adecuada representación de los aspectos claves que el sistema debe o no incluir, y se establece el nivel de detalle de cada uno de estos aspectos. Con esto se puede, mediante el modelo propuesto, responder de forma recíproca a esta lista de preguntas no sólo al usuario sino que automáticamente sean interpretadas también por un ordenador mediante reglas lógicas SWRL. Algunas de las preguntas a responder que serán usadas de forma automática por el ordenador para la gestión de la energía térmica son:

1. ¿Cuál es la temperatura máxima y mínima en la zona del intercambiador de energía térmica del subsuelo?
2. ¿Cuál es el valor de temperatura alcanzada en el colector solar, y bajo qué condiciones meteorológicas?
3. ¿Qué dimensiones tiene el edificio nZEB?
4. ¿De qué materiales están compuestos sus muros y cuáles son las propiedades observadas en ellos?
5. ¿Cuáles son los subsistemas térmicos del edificio nZEB?
6. ¿Cuál es el valor del flujo térmico?
7. ¿Cuáles son las propiedades claves del MCF?
8. ¿Cuál es la temperatura de cambio de fase del MCF?
9. ¿Qué sensores del sistema híbrido panel FV/MCF miden la temperatura de cambio de fase?
10. ¿Cuál es la temperatura a la entrada y salida del material de cambio de fase?
11. ¿Cuál es la temperatura a la entrada y salida del panel fotovoltaico?
12. ¿Cuántos eventos se han disparado para recircular el fluido del panel FV al MCF?

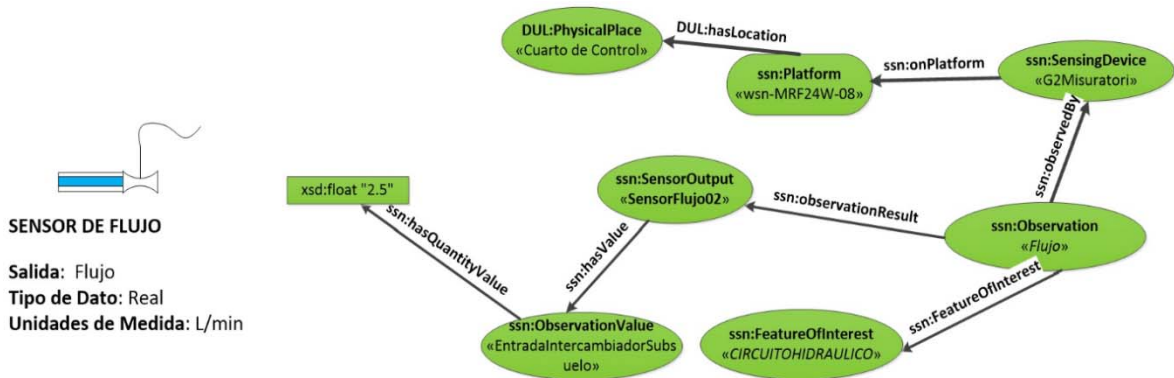
...

La respuesta a estas preguntas facilita crear el modelo semántico y almacenarlo en la base de conocimiento. Se muestran, como se ha comentado, algunos ejemplos de sensores semánticos del circuito hidráulico del edificio nZEB. Como se verá, se les ha dotado de información de contexto para convertir la información física en semántica.

a) Sensores semánticos del circuito hidráulico: flujo, temperatura, electroválvula

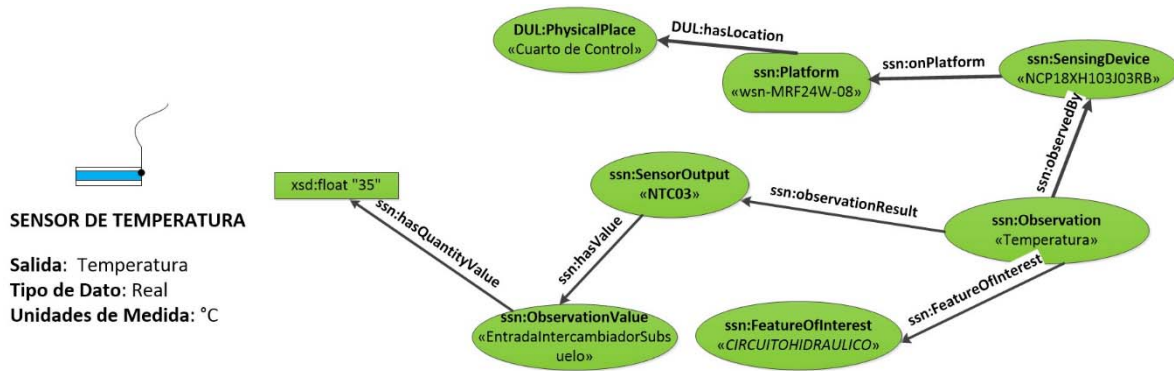
En la Figura 4.12 se muestra el modelo semántico del sensor físico de flujo. Algunas propiedades de este sistema, además del flujo que físicamente solo se mide a la entrada de los distribuidores son: el estado de las válvulas del colector solar, la temperatura a la entrada y salida del intercambiador de energía térmica del subsuelo, etc.

Figura 4. 12 Modelo semántico del sensor de flujo del circuito hidráulico.



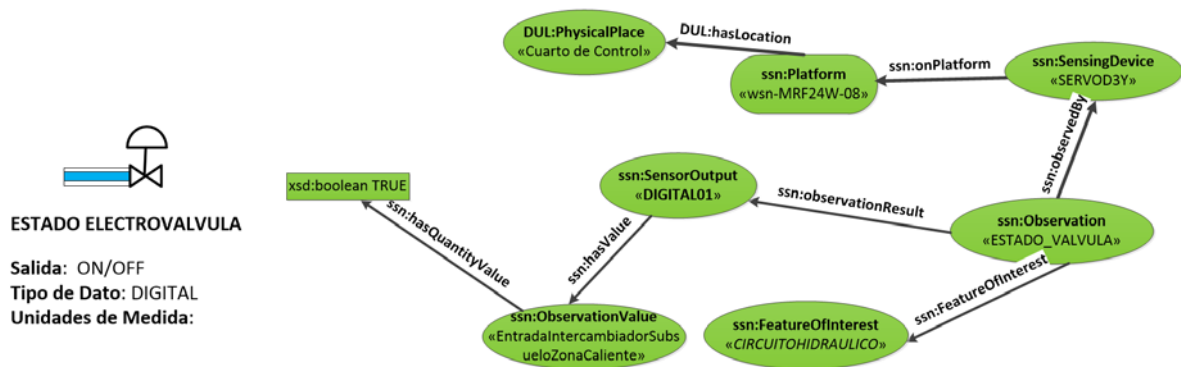
En la Figura 4.13 se muestra el modelo semántico creado para el sensor físico de temperatura del circuito hidráulico. Se hace uso de una entrada analógica a la que se conecta una sonda NTC para medir la temperatura a la entrada y a la salida.

Figura 4. 13 Modelo semántico del sensor de temperatura del circuito hidráulico.



En la Figura 4.14 se muestra el modelo semántico creado para el sensor físico de la electroválvula, que hace uso de una salida digital que va hacia un amplificador de potencia para abrir o cerrar la válvula.

Figura 4. 14 Modelo semántico del sensor electroválvula del circuito hidráulico.



Para el caso específico del estado de las válvulas se puede especificar más el valor a observar, indicando la zona en el intercambiador de energía térmica del subsuelo a la que se está recirculando el fluido calo portador.

Algunas de las preguntas a las que pueden responder los tres modelos vistos anteriormente son:

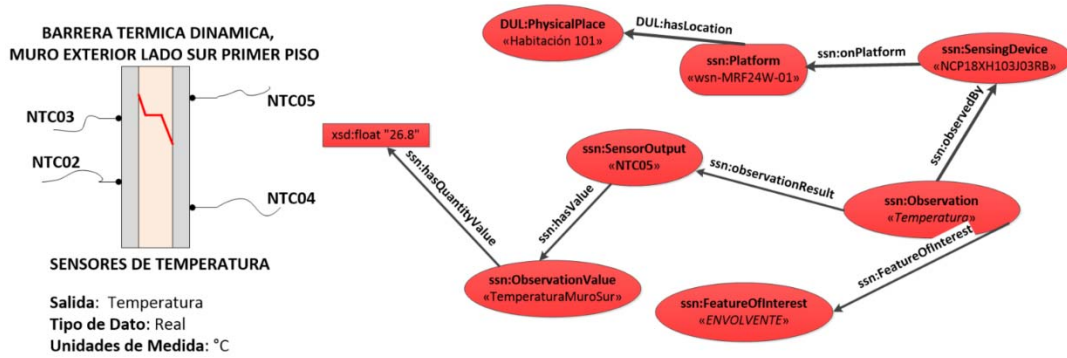
1. ¿Cuál es el valor del flujo a la entrada del intercambiador de energía térmica del subsuelo?
2. El dispositivo de monitoreo G2 Misuratori, ¿qué variable está midiendo y donde está localizado?
3. ¿Cuál es el valor de la temperatura a la entrada del intercambiador de energía térmica del subsuelo?
4. ¿Qué variables están siendo medidas en el circuito hidráulico?
5. ¿Qué variables están siendo medidas por la plataforma MRF24W-08?
6. ¿Cuál es el estado de la válvulas a la entrada del intercambiador de energía térmica del subsuelo zona caliente?
7. ¿Qué plataformas observan los estados de las válvulas?
8. ¿Cuántas válvulas controlan la entrada al intercambiador de energía térmica del subsuelo zona caliente?
9. ¿Cuántas válvulas están activadas en el circuito hidráulico?

b) Sensores semánticos de la envolvente

Continuando con el uso de modelos semánticos se puede llegar a una representación similar para la envolvente de los muros. En este caso la propiedad observada es la temperatura (Figura 4.15). La lectura de temperatura es llevada a cabo por otra plataforma que cuenta con entradas analógicas y en una de ellas se conecta la sonda NTC05.

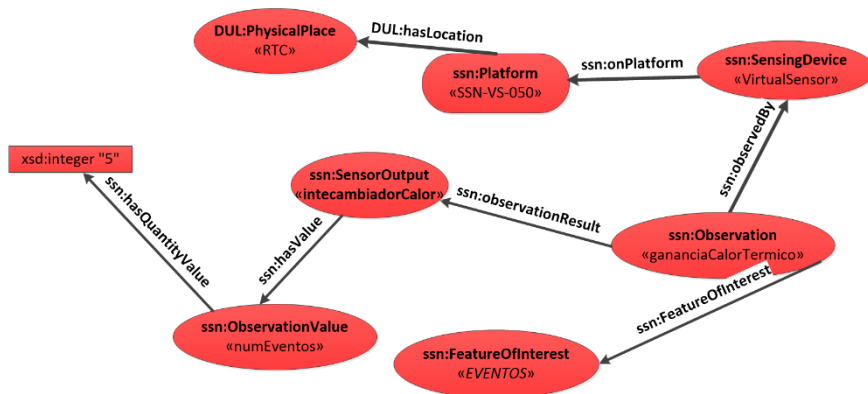
La envolvente presenta varias propiedades como las de sus elementos estructurales (conductividad térmica del muro, material, grosor, etc.), y de las ventanas (dimensiones, factor U ó R, etc.). Estas, a diferencia de los datos adquiridos por sensores físicos, no cambian, por lo que sólo se crean las instancias al inicio, una vez, para representar estos valores. De nuevo estos modelos semánticos responden a múltiples preguntas que son de interés y útiles no solo para el usuario, sino también para el gestor o proveedor de energía Además estos modelos pueden integrarse de manera muy intuitiva en un sistema mayor o compartir datos con otros sistemas.

Figura 4. 15 Modelo semántico del sensor de temperatura de la envolvente.



Por último, con la definición de sensor en la ontología SSN resulta fácil representar propiedades adicionales que no son medibles mediante un sensor físico. Por ejemplo, se puede representar semánticamente el contenido de un sensor virtual para identificar de forma diaria un evento que consideremos importante (Figura 4.16).

Figura 4. 16 Modelo semántico para un sensor virtual de eventos.



Este modelo responde al interés de un habitante del edificio nZEB por conocer cuántos eventos de alta temperatura han ocurrido, para por ejemplo recargar el intercambiador de energía térmica del subsuelo.

De forma similar es posible crear más sensores virtuales para cubrir las propiedades necesarias a representar. Por lo tanto, es importante hacer notar que el resultado de los modelos de transferencia de calor, del algoritmo de regresión logística, y el resultado del controlador difuso también se puede encapsular en este tipo de representación.

4.3.2. Módulo SPARQL/SWRL.

En esta capa de conocimiento también se encuentra el módulo SPARQL/SWRL, que permite al usuario hacer consultas de una forma sencilla mediante una interface. Estas

consultas están pre-configuradas para facilitar la información de retorno, por ejemplo, variables como la fecha o los sensores a consultar. Un ejemplo sencillo de este tipo de consultas para conocer el estado del edificio nZEB se muestra en la Figura 4.17, donde se pregunta por valores mayores de 20 en los nodos sensores.

En la Tabla 4.4 se muestran los resultados de esta consulta. Esta información es útil al usuario para descubrir dónde hay energía térmica del subsuelo que pueda ser transportada a la barrera térmica dinámica.

Figura 4. 17 Consulta SPARQL para detectar sensores con un valor mayor de 20.

```

PREFIX rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#>
PREFIX owl: <http://www.w3.org/2002/07/owl#>
PREFIX xsd: <http://www.w3.org/2001/XMLSchema#>
PREFIX rdfs: <http://www.w3.org/2000/01/rdf-schema#>
PREFIX smartBuilding: <http://localhost/smartBuildingv14.owl#>

SELECT ?nodo ?sensor ?FoI ?value
WHERE {
    ?nodo smartBuilding:hasSubSystem ?sensor .
    ?sensor smartBuilding:madeObservation ?obsv .
    ?obsv smartBuilding:featureOfInterest ?FoI .
    ?obsv smartBuilding:observationResult ?result .
    ?result smartBuilding:hasValue ?val .
    ?val smartBuilding:hasQuantityValue ?value .
    FILTER (?value > "20"^^xsd:decimal)
}

```

Tabla 4.4 Resultado de la consulta SPARQL.

node	sensor	FoI	value
MRF24W_01	NTC_Ch01	soilTemperature	20.6
MRF24W_01	NTC_Ch02	soilTemperature	21.7

Las reglas SWRL se han usado, principalmente, para ejecutar una acción o disparar una alarma. Por ejemplo, una acción importante es la de hacer fluir el líquido calo portador del colector solar a la zona correspondiente en el intercambiador de energía térmica del subsuelo. Para esto una de las reglas que se aplica es la siguiente:

hasFoI(?w1, "solarColector") \square *observationResult(?w1, ?x1)* \square *hasValue(?x1, ?y1)* \square *hasQuantVal(?y1, ?z1)* \square *swrlb:greaterThan(?z1, 21)* \rightarrow *hastransferEnergy(?y1, "GHX_hotZone")*

La primera sentencia selecciona todas aquellas instancias en donde la característica de interés (FoI) sea "solarColector". El resto de las sentencias selecciona de entre todas las instancias sólo aquellas con valores mayores a 21°C. El consecuente expresa que se va a transferir la energía de los valores observados "y1" hacia la zona caliente del

intercambiador de energía térmica del subsuelo, donde “y1” contiene como instancias los nombres de cada una de las cuatro caras del colector solar. Por ejemplo, si “caraNorte” y “caraSur” son seleccionadas, se estaría actualizando su relación “caraNorte” a *transferEnergy* “GHX_hotZone”. Al ser actualizada, esta orden se pasa a la fila de instrucciones a ejecutar, por lo que las válvulas correspondientes se abrirán para hacer circular el fluido calo portador de la cara norte y sur hacia la zona caliente del subsuelo.

En la siguiente regla se observa que si las temperaturas de la envolvente y del interior son altas, el muro necesita que circule un fluido frío. De igual forma comprobando los valores de temperatura por debajo de 15°C se pueden hacer recomendaciones al usuario del estado de los muros y cuáles requieren que circule fluido caliente.

hasFoI(?w1, “envolvente”) □ observationResult(?w1, ?x1) □ hasValue(?x1, ?y1) □ hasQuantVal(?y1, ?z1) □ swrlb:greaterThan(?z1, 55) □ hasFoI(?w2, “envolvente”) □ observationResult(?w2, ?x2) □ hasValue(?x2, ?y2) □ hasQuantVal(?y2, ?z2) □ swrlb: greaterThan (?z2, 30) → requiereFluidoEnfriamiento(?y1)

Por último, en la siguiente regla se verifica si la temperatura del colector solar es mayor a 25°C, si la temperatura interior se encuentre en el rango de la banda de confort, y que el flujo de calor es mayor que 3 W/m². En el caso de cumplirse estas tres condiciones, el flujo va del interior al exterior, lo que en poco tiempo hará que la temperatura interior disminuya, por lo que se recomienda circular el calor directamente del colector solar a la envolvente.

hasFoI(?w1, “solarColector”) □ observationResult(?w1, ?x1) □ hasValue(?x1,?y1) □ hasQuantVal(?y1, ?z1) □ swrlb:greaterThan(?z1, 25) □ hasFoI(?w2, “envolvente”) □ observationResult(?w2, ?x2) □ hasValue(?x2, ?y2) □ hasQuantVal(?y2, ?z2) □ swrlb:lessThan(?z2, 20) □ hasFoI(?w3, “temperaturaInterior”) □ observationResult(?w3, ?x3) □ hasValue(?x3,?y3) □ hasQuantVal(?y3, ?z3) □ swrlb:greaterThan(?z3, 20) □ swrlb:lessThan(?z3, 25) □ computedHeatFlux(?heatFlux) □ swrlb: greaterThan (?heatFlux, 3) → circularFluidoEntre(?y1,y2)

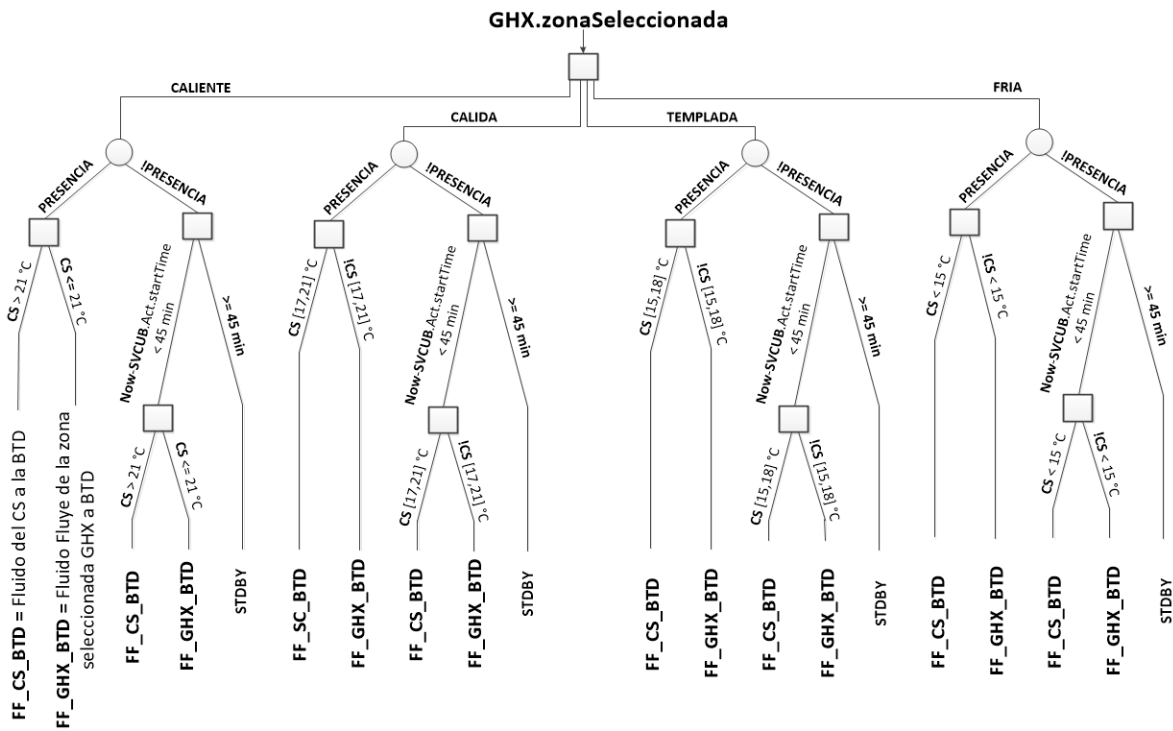
4.3.3. Módulo Agente de Contexto/Manejador de Procesos y Eventos.

El último módulo de esta capa de la arquitectura es el agente de contexto, encargado de seguir e interpretar las reglas SWRL. Este agente de contexto traduce y genera los comandos adecuados, e incluso envía mensajes al usuario a través de la capa de interface. Por ejemplo, supongamos que alguna de las reglas que se ejecutan para

gestionar el flujo térmico da como resultado que se transfiera la energía del colector solar hacia el intercambiador de energía térmica en el subsuelo, lo que implica que se deben abrir determinadas válvulas. El agente procesa esta información y genera el comando requerido para ejecutar esta acción. Además enriquece la información semánticamente para mostrarla al usuario. Así, en lugar de representar los estados de las válvulas o mnemónicos como GroundHeatExHotZoneValves muestra un mensaje del tipo: “Abriendo válvulas del intercambiador de energía térmica del subsuelo zona caliente e iniciando recirculación a barrera térmica zona norte”.

La otra tarea del agente de contexto es asegurar la ejecución del árbol de decisión (Figura 4.18) que se encarga de tomar una decisión respecto a habilitar o no la barrera térmica. La zona seleccionada del intercambiador de energía del subsuelo por el controlador difuso (Sección 4.2.2), y el valor del sensor de presencia hacen que se active o no la circulación del fluido hacia la envolvente dinámica.

Figura 4. 18 Árbol de decisión para activar la barrera térmica.



A modo de ejemplo se va a analizar la rama del extremo izquierdo del árbol de decisión de la Figura 4.18. La zona caliente del GHX ha sido seleccionada. A continuación se verifica si el sensor de presencia está activado. En caso positivo, se busca si alguna cara del colector solar presenta temperaturas superiores a 21°C. En caso afirmativo se ejecutara la instrucción de hacer circular el fluido de la cara del colector

solar a la BTM (**FF_CS_BTD**). En caso contrario, si el CS no alcanza una temperatura de 21°C, el fluido fluye de la zona del GHX seleccionada hacia la BTM (**FF_GHX_BTD**). En esta misma rama del árbol, en el caso de no encontrarse un sensor de presencia activado, se comprueba si en la agenda del usuario existe alguna actividad prevista en menos de 45 minutos. Si es el caso, se verifica si el CS cuenta con una temperatura mayor de 21°C, y se ejecuta **FF_CS_BTD**, o de lo contrario, **FF_GHX_BTD**. Finalmente, si no está activo el sensor de presencia y tampoco existe una actividad en la agenda del usuario en menos de 45 minutos, no circula fluido y se manda a espera (STDBY) la activación de la BTM. Un contador de cuántas veces se manda a espera la BTM permite garantizar que al menos cada tres “stdby” se produzca una circulación del fluido calo portador a la BTM.

También a este nivel de la arquitectura se encuentra el módulo manejador de procesos y eventos, que detecta cambios hechos desde la interface del usuario tales como la programación de una actividad en la agenda, o cambios en actividades ya programadas, así como cambios en los valores de algunos sensores (presencia, temperatura fuera de los límites configurados, etc.) Como respuesta a este tipo de eventos se generan una o más acciones que llevan a un cambio de estado. Por ejemplo, el evento del sensor de presencia dispara el proceso “usarEnergíaTérmica”, que es manejado por el agente de contexto para solicitar la respuesta del controlador de lógica difusa y proceder a evaluar el árbol de decisión.

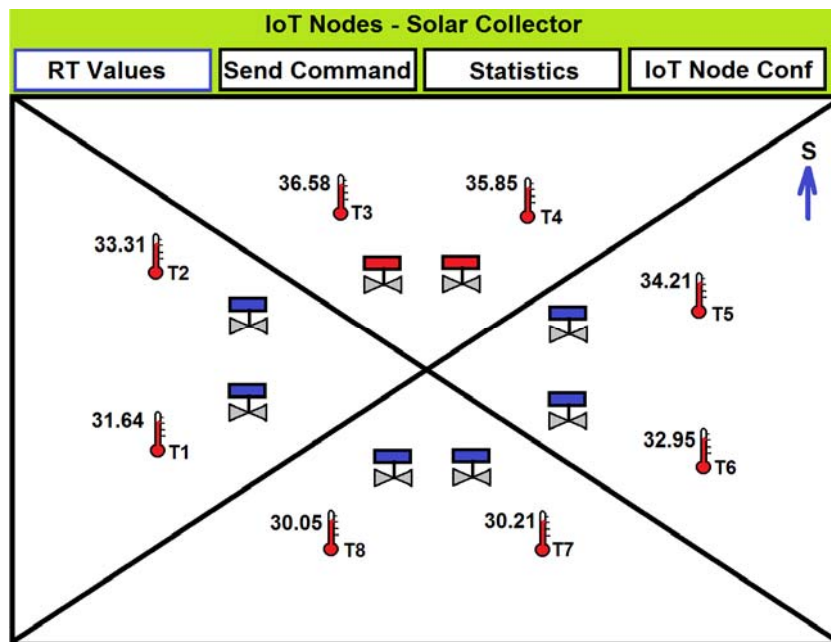
El manejador de eventos está conectado directamente a los datos generados en la segunda capa, en donde verifica de manera directa si se dispara algún evento. El más claro es la detección del sensor de presencia, como acabamos de ver, pero también hay eventos como una variación significativa de la temperatura o la radiación solar, o detectar si va a llover o no. También se consideran los cambios en el perfil del usuario o su agenda como eventos, por lo que este módulo se conecta con la interface de usuario directamente (siguiente sección).

4.3.4. Capa de Interface.

La capa de interface de usuario/gestor (Figura 4.1) ya ha sido mencionada en varias ocasiones. Sus principales tareas son:

En la Figura 4.20 se ha hecho una conexión directa mediante un teléfono móvil para acceder al servidor web incorporado en un nodo sensor. Este tipo de conexiones se suelen hacer con intención para reconfigurar el nodo sensor y también para ver los últimos valores horarios.

Figura 4. 20 Ventana del colector solar vista a través de un nodo sensor con servidor web incorporado.



Para finalizar se muestra en la Figura 4.21 la ontología usada mediante Protégé (un editor libre de código abierto y un sistema de adquisición de conocimiento, desarrollado por la Universidad de Stanford, en colaboración con la Universidad de Mánchester). Protégé permite visualizar las clases, propiedades, instancias y relaciones entre éstas de una ontología. En el lado izquierdo de la figura se muestra la taxonomía de las clases, y al seleccionar alguna se muestra su información detallada en el lado derecho. En el ejemplo de la imagen se ha seleccionado la clase “nZEBGroundHeatExchanger”; en la parte superior del lado derecho se aprecian las definiciones de esta clase y en la parte inferior las instancias de la misma.

Figura 4. 21 Vista de la ontología usada haciendo uso de Protégé.

The screenshot displays the Protégé ontology editor interface. The top menu bar includes: Active Ontology, Entities, Classes, Object Properties, Data Properties, Annotation Properties, Individuals, OVL/Viz, DL Query, OntoGraf, and Ont.

The main window is divided into several panes:

- Class hierarchy (inferred):** Shows a tree structure of classes. The selected class is **nZEBGroundHeatExchanger**, which is a subclass of **nZEB_Property**. Other visible classes include Sensing Device, Humidity, Precipitation, Radiation, Temperature, Thermistor, Wind, Process, Deployment-related Process, Deployment, PropertyKind, Quality, Property, Condition, Measurement Property, Measurement Capability, Operating Property, Operating Range, MRF24_OperatingRange, Survival Property, Survival Range, and Weather_Property.
- Annotations Usage:** Shows 14 uses of **nZEBGroundHeatExchanger**. The first use is as a subclass of **nZEB_Property**. Other uses include **soilTempUnderColdZ** and **soilTempUnderColdZ01**, both of which are types of **nZEBGroundHeatExchanger**.
- Description:** Shows that **nZEBGroundHeatExchanger** is a subclass of **nZEB_Property** and is a property of some **Feature of Interest**.
- Members:** Lists instances of **nZEBGroundHeatExchanger**, including **soilTempUnderColdZ**, **soilTempUnderColdZ01**, **soilTempUnderCoolZ**, and **soilTempUnderCoolZ01**.

Capítulo 5

Pruebas y Resultados en el Edificio nZEB

CAPITULO 5. PRUEBAS Y RESULTADOS EN EL EDIFICIO nZEB.

Los resultados obtenidos en las pruebas reales realizadas en el edificio nZEB con los sistemas colector solar (CS), intercambiador de calor del subsuelo (GHX), y barrera térmica dinámica (BTD) muestran como su operación se optimiza con el modelo o arquitectura de percepción y control propuesta en el Capítulo 4.

5.1. Resultados experimentales del sistema colector solar.

El colector solar (CS) que constituye la cubierta en chapa de acero lacada en color negro mate presenta una elevada absorción térmica a la radiación solar, llegando a alcanzar valores máximos, próximos a 90°C, durante los días de en verano y de 55°C en invierno. A lo largo de las estaciones del año y en el transcurso del ciclo día y la noche, al circular el fluido calo-portador, alcanza temperaturas de 0°C a 65°C. Consecuentemente, al circular el fluido térmico agua-glicol durante el día, en periodos controlados, hacia el Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) o a la envolvente dinámica, BTD, se produce una transferencia de calor que reduce la temperatura en el Colector Solar.

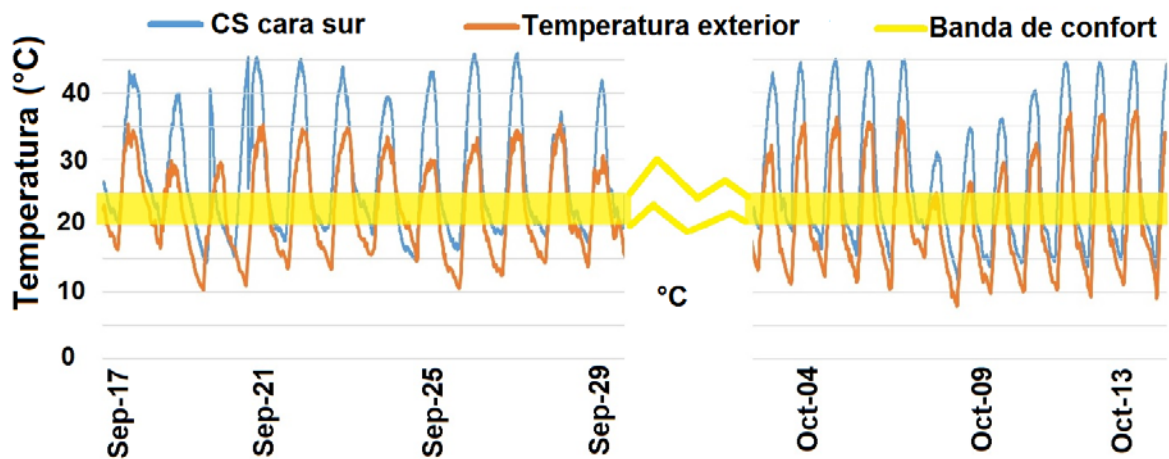
El tiempo de circulación del fluido para transferir la energía térmica es variable y su programación controla la temperatura en el intercambiador de cubierta dependiendo de la estación de año. Los intervalos de transporte suele ser de 4-8 minutos, después se detiene la circulación para que aumente la temperatura del fluido en el Colector Solar. Este periodo se controla de forma automática y varía dependiendo de la estación del año y hora del día. Cuando el objetivo es almacenar calor en el Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) durante el verano, este intervalo es de 60-90 minutos, y en invierno supera en muchas ocasiones los 120 minutos. Pasado este tiempo sin recirculación, se procede a re-circular de nuevo el fluido calo-portador para ceder la energía térmica al Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) o a la envolvente dinámica (BTD).

Los valores de temperatura capturados en la capa intermedia del Colector Solar durante el otoño, donde el promedio de la temperatura exterior disminuye al aproximarse el invierno, se muestran en la Figura 5.1. La banda de confort se representa por el intervalo amarillo, y se observa que se alcanzan temperaturas muy superiores a las de la banda de confort, tal y como se mostraba en la simulación (Capítulo 3). Al

final de septiembre las temperaturas alcanzan valores por encima de los 40°C y, como resultado, hay dos posibilidades de transferir la energía térmica:

- Enviarla al Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) para almacenarla,
- Usarla directamente en la Envoltura Dinámica (BTD) para crear una semi-superficie en la cara interior del muro al variar el gradiente térmico entre el interior y exterior, para estabilizar la temperatura interior.

Figura 5. 1 Temperaturas en la cara interior de la fachada Sur del Colector Solar (azotea) y temperatura exterior (septiembre y octubre).



5.2. Resultados experimentales en el intercambiador de calor del subsuelo.

El registro de temperaturas en el intercambio de calor geotérmico (GHX), medidas por el sensor NTC en los cabezales a la entrada y salida de su distribuidor de electroválvulas, se muestra en la Figura 5.2. Los resultados corresponden al caso en el que el Colector Solar y el Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) se habilitan para que circule el fluido calo-portador a la zona caliente. El propósito es asegurar valores más altos de temperatura para la zona caliente, donde el fluido recircula más de cinco minutos. El control se realiza mediante reglas lógicas o eventos condicionado por una diferencia de temperaturas inferior a 2°C entre la entrada y la salida en el cabezal del distribuidor para el Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX).

Los valores de temperatura en el Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) para la zona caliente (SSN19_T4), zona templada (SSN54_T4 y SSN66_T4), y zona fría (SSN70_T4), se muestran en la Figura 5.3, con la ubicación de los sensores en un recuadro que se corresponde con el perímetro del edificio nZEB. El gráfico muestra la

atenuación de la influencia de las condiciones externas en la temperatura del subsuelo debido a su inercia térmica, siendo por tanto menos influenciadas aquellas zonas más cercanas al centro del edificio. Cada una de las zonas del subsuelo se encuentra aislada y se observa que la zona más afectada por las condiciones meteorológicas es la zona fría y la menos afectada la zona caliente.

Figura 5. 2 Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX): temperaturas del fluido de entrada a la zona caliente del subsuelo proveniente del colector solar (azul), y temperatura de salida de la zona caliente del subsuelo (rojo).

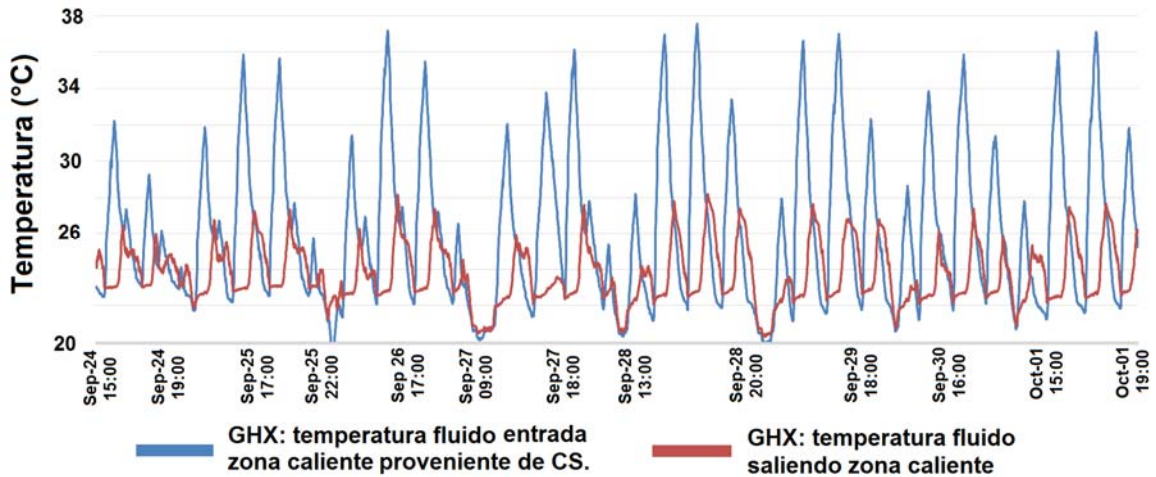
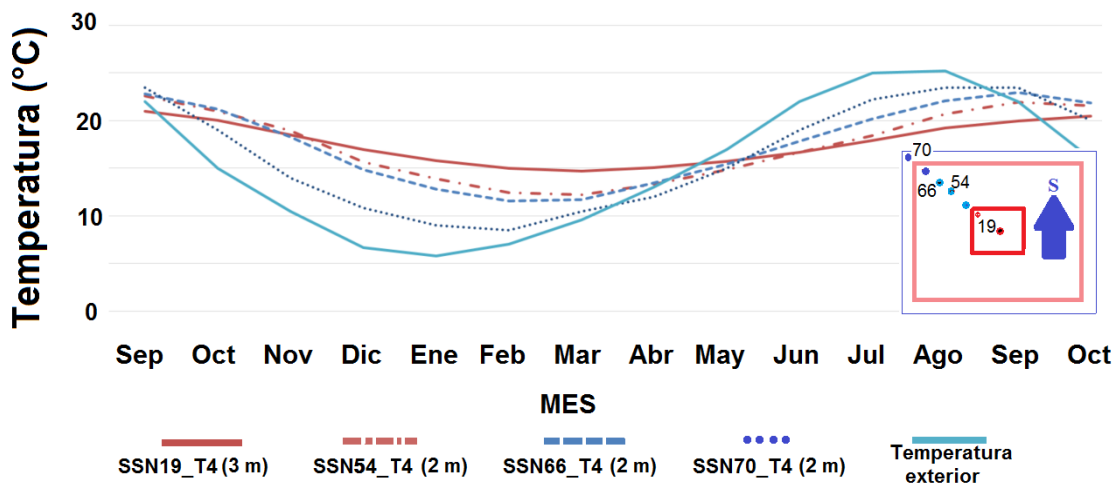


Figura 5. 3 Variaciones de temperatura a lo largo de un año en el intercambiador de calor del subsuelo.



Las variaciones de temperatura, en diferentes zonas del subsuelo, muestran la capacidad potencial de la modulación térmica producida por la tierra a lo largo de los años, es decir, su inercia térmica. En base a esta propiedad se almacena energía térmica en el subsuelo, reduciendo las pérdidas térmicas en la envolvente del edificio nZEB y, en consecuencia, la demanda térmica en calefacción y refrigeración. Al mismo tiempo estos resultados apuntan a la posibilidad de controlar la temperatura subterránea por

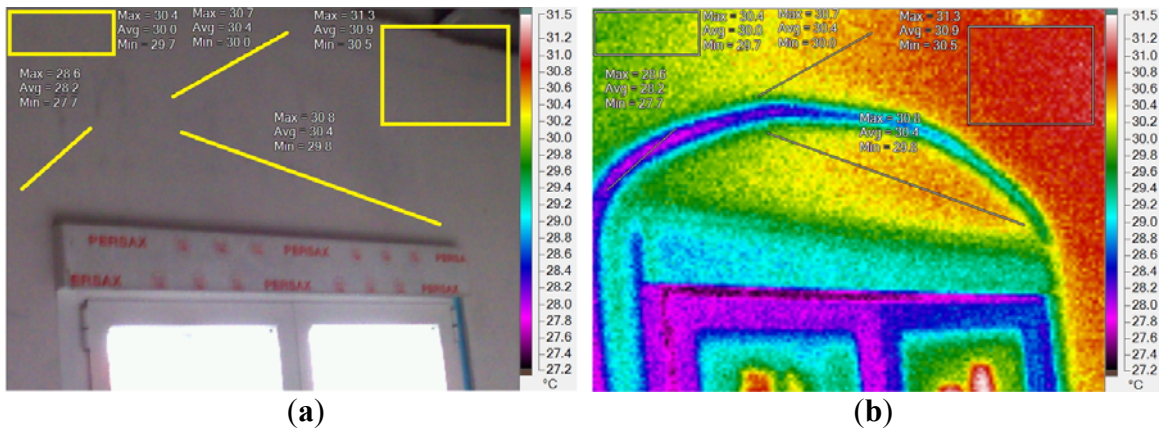
zonas, independientemente de las condiciones externas. Este proceso está siempre limitado por la capacidad de captura de energía térmica (calor/frío) del ambiente o por radiación solar sobre la envolvente.

5.3. Resultados experimentales de la barrera térmica dinámica.

Se ha utilizado una cámara termográfica para analizar la distribución de temperaturas en los muros del edificio nZEB, cuando se activa la barrera térmica dinámica, BTD.

En la Figura 5.4a y 5.4b se muestran la imagen visual de la cara sur con una ventana en escala de grises y la térmica. . Corresponde a las 10h de un día de agosto, Tras 2 minutos de operación de la Barrera Térmica Dinámica BTD, circulando el fluido directamente desde Colector Solar (CS). En ese momento la temperatura del el fluido en el CS proporcionó una temperatura de entrada a la Barrera Térmica Dinámica (BTD) de 27.5°C. Cabe señalar que antes de circular el fluido calo-portador, la temperatura en la cara interior del muro fluctuaba por encima de los 30°C.

Figura 5. 4 (a) Imagen visual de un muro y la ventana en escala de grises. (b) Imagen térmica que muestra la ruta que sigue el fluido calo-portador a través del muro o, lo que conocemos como la barrera térmica dinámica.



La imagen térmica muestra una amplia gama de temperaturas. Alrededor de del tubo aparecen valores de temperatura próximos a la temperatura del fluido calo-portador. Esto es más notable en la línea de la izquierda, por encima de la ventana, que sigue de forma más aproximada la ruta del tubo de PP. Se muestra claramente cómo los efectos de la circulación de un fluido a una temperatura inferior a la que se encuentra el muro,

repercute en la temperatura del muro en proporción directa a la distancia de la ruta que va marcando el tubo de PP incrustado.

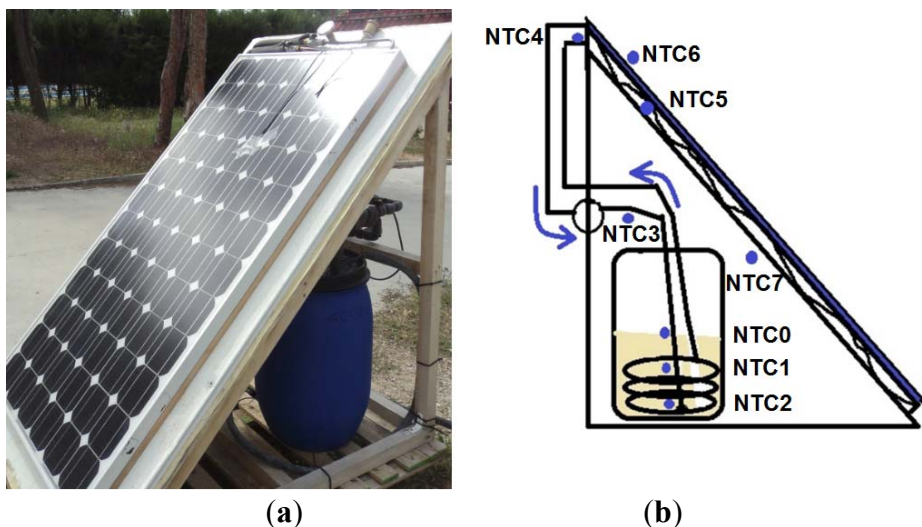
Los resultados muestran el efecto de la Barrera Térmica Dinámica (BTD) para suavizar la temperatura en la cara interior del muro, con un alto potencial en la reducción de costes y demanda de energía en refrigeración y calefacción.

Finalmente, es posible transferir el flujo de energía térmica del Colector Solar ya sea hacia la Barrera Térmica Dinámica (BTD) para reducir el gradiente de temperatura entre el entorno interior y exterior, o hacia alguna de las zonas del Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX) para almacenar esta energía térmica, que posteriormente se utilizará en la Barrera Térmica Dinámica (BTD). La temperatura a la salida de la Barrera Térmica Dinámica (BTD) era de 27°C, por lo que se envía a la zona caliente del Intercambiador de Calor del Subsuelo (GHX).

5.4. Respuesta del sistema híbrido Termo-Fotovoltaico con Material de Cambio de Fase (FV/Térmico con MCF).

Las pruebas realizadas con el sistema híbrido Termo-FV/MCF se han realizado en modo semiautomático para comprobar el almacenamiento de energía térmica de calor latente. Se reproduce la figura que muestra la ubicación de las sondas NTC para este sistema FV/MCF, Figura 5.5.

Figura 5. 5 (a) Sistema experimental FV/MCF; (b) Distribución de las sondas en el sistema FV/MCF..



En la Figura 5.6 se muestra la evolución temporal de la temperatura en una prueba en el mes de mayo. En ella se hace circular el fluido en cuatro ocasiones 11:36, 12:08, 12:46 y 13:10 h, con una duración de 16, 30, 18 y 5 minutos, respectivamente. Durante la primera circulación se observa que la sonda NTC0 (azul) mide a 27°C y aumenta hasta alcanzar la temperatura de fusión a las a las 13 h, en el intervalo de temperaturas 32°- 34°C, ya que posteriormente se aprecia un incremento súbito en la temperatura indicando que donde está ubicada la sonda NTC0 el MCF se encuentra fundido. La sonda NTC1 (roja) mide temperaturas crecientes desde 20°C al inicio hasta 24°C. La sonda NTC2, que corresponde a la temperatura de fondo pasa de 19.5° a 20.8°C. La sonda NTC3 (verde) mide la temperatura a la entrada sobre el tramo del serpentín que se dirige al interior del bidón, esta también nos permite detectar cuando se presenta una circulación del fluido ya que inmediatamente detecta un cambio en su temperatura.

Figura 5. 6 Variación de temperatura en diversas sondas del sistema FV/ térmico con MCF

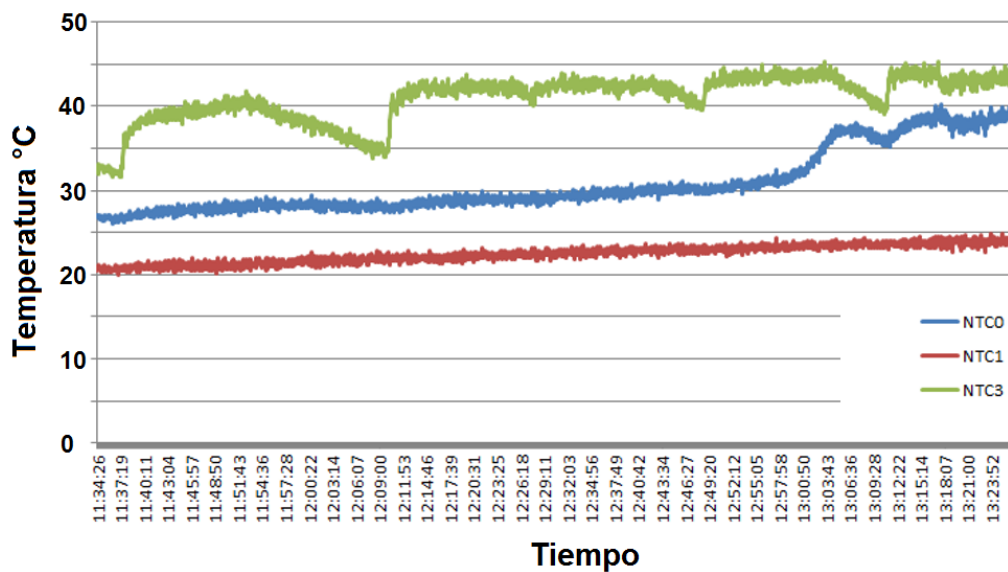
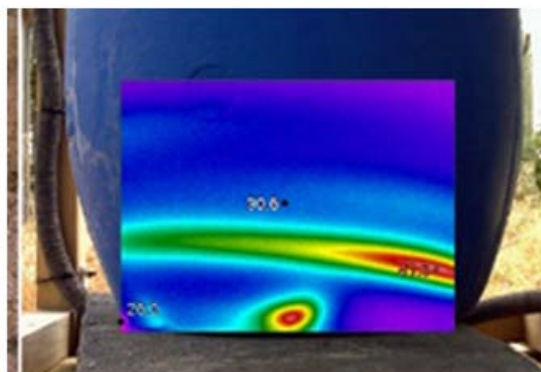
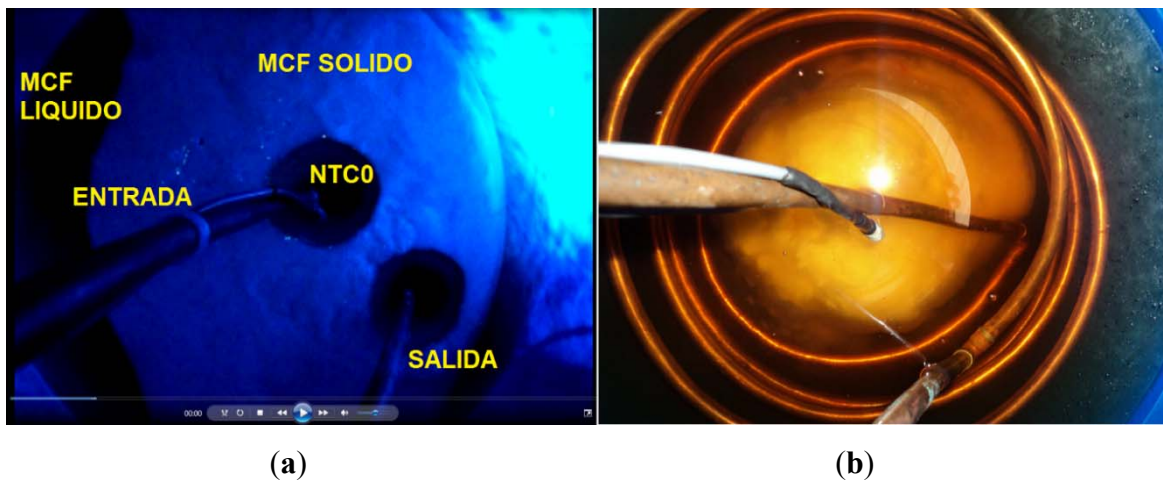


Figura 5. 7 Imagen térmica del bidón con MCF, con serpentín para la recirculación del fluido proveniente del panel FV.



La imagen térmica del bidón indicaba un perfil de cambio de fase en la zona inferior del Material de Cambio de Fase (MCF), Figura 5.7, sin embargo, el sensor situado en la zona superior del bidón, indicaba que el material se encontraba fundido. Esto se debe a que las temperaturas más altas se alcanzan inicialmente en la parte superior, por donde la tubería se encuentra en contacto con el Material de Cambio de Fase (MCF), por lo que la sonda NTC0 que se encuentra en esta zona es la primera en detectar el cambio, Figura 5.8a.

Figura 5. 8 (a) Imagen de un vídeo donde se observa el cambio de fase del MCF, siendo NTC0 la primera sonda que lo detecta: (b) Fotografía del MCF aún en estado sólido, con la sonda NTC2 al fondo del depósito.



Lo contrario sucede con la sonda NTC2, que es la que marca la temperatura en la zona baja del MCF, Figura 5.8b. También se observa que el serpentín tiene un amplio diámetro, y el calor en el centro se detecta con posterioridad. De hecho, en la Figura 5.7 la cámara térmica capta una vuelta del serpentín. En ambos casos se aprecia que el MCF próximo al serpentín sobre el que circula el fluido calo-portador cambia más rápido de estado.

Al día siguiente se observa que el MCF presenta un aspecto de sólido, con un reducido porcentaje en la zona superior en estado líquido, Figura 5.9, pues el día anterior el MCF se había fundido, y por la noche no recirculó el fluido, por lo que no se solidificó totalmente. En estas condiciones, con pequeños incrementos de energía, el MCF pasa inmediatamente a un estado líquido ya que no tiene capacidad para continuar almacenando calor latente. En este tipo situaciones el sistema no es útil para enfriar al panel FV a lo largo de un día caluroso de verano.

Figura 5. 9 MCF con un porcentaje aún en estado líquido (zona superior), y el resto no completamente solidificado.

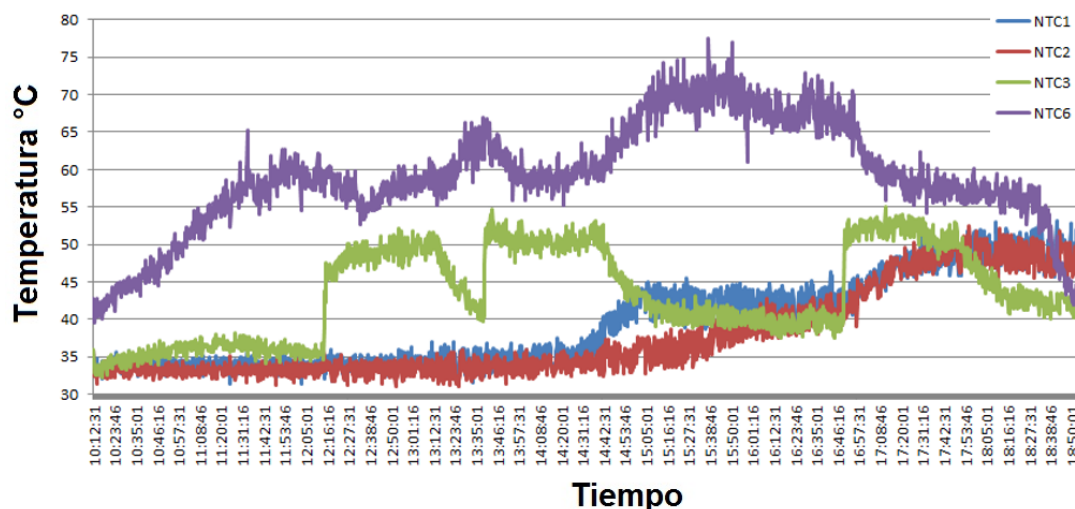


En la Figura 5.10, se muestra la evolución temporal de las temperaturas medidas por las distintas sondas. Se observa que se han realizado tres circulaciones, donde la temperatura medida por la sonda NTC3 (verde) de entrada del fluido al MCF llega a alcanzar valores entre los 45°C a los 52°C. La sonda NTC1 (azul claro) muestra como durante la primera circulación el MCF aún tiene capacidad de almacenar calor latente, e incluso durante una parte de la segunda circulación, ya que es al final de esta donde sobrepasa la temperatura de cambio de fase, provocando un incremento abrupto en la temperatura medida, que pasa de 35°C a 45°C (14:30 a 15:00 h). Esta temperatura se alcanza a pesar de que el fluido calo-portador deja de circular a las 14:30 h, sonda NTC3. Esto sucede por calor residual ya que después de una circulación del fluido calo-portador, el fluido contenido en el serpentín y el propio serpentín, mantienen durante un período de tiempo una temperatura por encima de la temperatura de cambio de fase. Este comportamiento también se aprecia en la sonda NTC2, pues aunque muestra aun almacenamiento de calor latente por un periodo de tiempo mayor, se aprecia que al no circular el fluido calo-portador, presenta su cambio de fase a las 15:30 h, con una pendiente mayor en la temperatura. Finalmente, se observa que durante la tercera circulación (16:45 h.) del fluido calo-portador, ya no existe capacidad de almacenar calor latente pues el MCF se encuentra fundido en su totalidad, por lo que las sondas NTC1 y NTC2 muestran una pendiente pronunciada en el incremento de su temperatura.

En la Figura 5.10 también se muestran los valores de temperatura medidos por la sonda NTC6 (morado). Se aprecia un incremento de temperatura considerable durante

las primeras horas de la mañana y antes de iniciar la primera circulación del fluido, entre las 10:00-12:00 h, de 40°C a 60°C. Durante la primera circulación se reduce la velocidad en el incremento de la temperatura en el panel FV, que baja hasta 55°C. Inmediatamente después de dejar circular el fluido calo-portador (13:10 h), nuevamente se aprecia una pendiente pronunciada en la temperatura del panel FV, que decrece al activar la segunda circulación del fluido calo-portador (13:45 h). Al finalizar esta segunda circulación (14:30 h), nuevamente se presenta el patrón de un incremento de temperatura abrupto en el panel FV. Finalmente, a las 16:00 h, desciende la temperatura del panel FV, y durante la tercera circulación del fluido calo-portador nuevamente se lleva un intercambio de energía térmica por lo que se aprecia una disminución en la pendiente de la sonda NTC6 que mide la temperatura en la cara frontal del panel FV. Recordemos que el MCF está fundido por lo que cuenta con temperatura por encima de los 35°C. Esta disminución se aprecia que es alrededor de las 18:30 h., al final del día vuelve a descender mucho (18:30 h).

Figura 5. 10 Evolución de la temperatura en el MCF: Cambios de fase detectados NTC1 y NTC2. NTC6 muestra el enfriamiento del panel fotovoltaico.



5.5. Edificio nZEB: de un entorno inteligente hacia un modelo de ciudad inteligente.

Un entorno inteligente tiene que ir más allá de un edificio de dos plantas. Los conceptos y la idea principal se pueden extender fácilmente para ser aplicados a varios edificios, trabajar con un mayor volumen de datos, y ser interconectados mediante

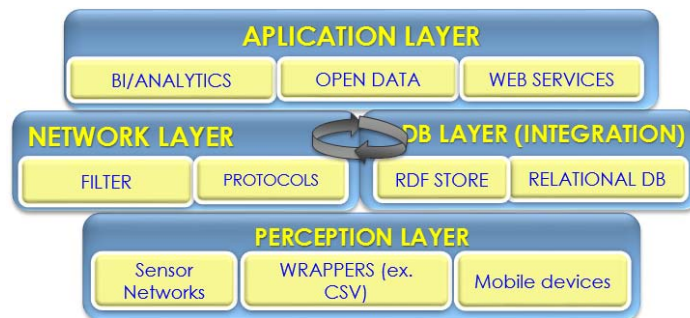
tripletas como un sistema completo. Este apartado está basado en resultados obtenidos en el artículo (Hernández, Guinea, & Santos, 2014), el cual uso elementos de esta arquitectura de percepción y control para pasar del edificio inteligente a la ciudad inteligente.

La arquitectura de Percepción y Control propuesta en esta Tesis Doctoral, también se puede utilizar para modelar una Ciudad Inteligente, compuesta de edificios tipo nZEB entre otros.

La Figura 5.11 muestra la propuesta de aplicación de esta arquitectura para una ciudad inteligente. En ella se resaltan cuatro capas: percepción, red, base de datos y aplicación.

La capa de percepción se hace cargo de la adquisición de datos de sensores o archivos, donde dispositivos móviles redefinen las posibilidades para conectar gente, procesos y objetos relacionados. En este caso los datos del edificio inteligente (nZEB) provienen de diferentes subsistemas (CS, GHX, la BTM, sistema híbrido FV/MCF, etc). Los dispositivos móviles no sólo pueden acceder a esta información y ver el comportamiento del usuario, sino también llevar a cabo otras acciones tales como habilitar o deshabilitar la Barrera Térmica Dinámica (BTD).

Figura 5. 11 Modelo para una ciudad inteligente.



Las capas de la red y de la Base de Datos se encargan de la transmisión y procesamiento de la información capturada en la capa de percepción, pasando la información a la capa de aplicación bidireccionalmente.

La capa de aplicación permite a los usuarios interactuar entre ellos y hacer consultas para disponer de un panorama global del estado de la ciudad. Tareas de visualización y minería de datos se ejecutan aquí, es decir, es común el uso de consultas complejas mediante nuevas tecnologías (ej. inteligencia de negocios, datos abiertos,

geolocalización, servicios web, aplicaciones conscientes del contexto, realidad virtual y aumentada, etc.).

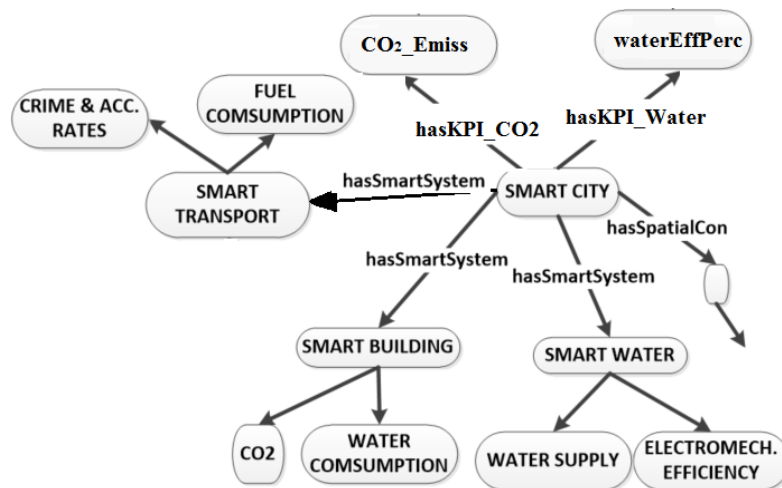
Finalmente, la principal contribución a la Ciudad Inteligente consiste en el desarrollo de la primera y segunda capa, a partir de las herramientas e interfaces desarrolladas y presentadas en los capítulos anteriores.

5.5.1. Primera aproximación a la ciudad inteligente

Para generalizar y ampliar la utilidad de la investigación y desarrollo realizado en el edificio inteligente, se registró información durante dos años, temperatura y humedad interior y exterior, radiación solar, presencia, etc. Algunos datos del SCADA, como la eficiencia electromecánica de los sistemas de bombeo, fueron de gran utilidad para ver la versatilidad del modelo. Cada nodo sensor simula una aplicación inteligente. Los datos pueden venir de edificios, los servicios de transporte, energía y agua. Se diseñó una ontología para acoplar conceptos claves de ontologías que ya existían en otras aplicaciones inteligentes.

Una gran cantidad de estaciones meteorológicas están disponibles para recolectar datos a los que aplicar el algoritmo de aprendizaje propuesto en este trabajo de investigación para predecir las ubicaciones con alta probabilidad de lluvia. Con esta información, las aplicaciones de gestión inteligente del agua pueden cerrar algunas válvulas para reducir el envío de agua potable –ya que con lluvia el consumo de agua tiende a disminuir-. De forma similar, el transporte inteligente puede reorganizar autobuses para evitar congestionamientos de tráfico debido a una inundación localizada en rutas específicas a lo largo de la ciudad. La Figura 5.12 muestra la idea principal de esta propuesta, así como los conceptos y relaciones utilizados para conectar con aplicaciones la ciudad inteligente.

Figura 5. 12 Conceptos y relaciones para enlazar aplicaciones en un modelo de ciudad inteligente.



Se ha utilizado la herramienta comercial, TopBraid Composer³⁰, para extraer información y visualizar un mapa de Santiago de Querétaro con algunos Indicadores Clave de Eficiencia (KPIs). La intención de estos es tener parámetros para comparar que tan eficiente es realmente una ciudad con respecto a otra. Hay un enorme interés en donde han surgido ya estándares que hablan exactamente sobre cuáles son los parámetros y el método a seguir para medirlos, en donde las ontologías son claves para llevar a cabo esto (Fox & Pettit, 2015) (Hunter J. , 2015).

Las emisiones de CO₂ son un KPI importante en un edificio inteligente pero es necesario conocer cuánta energía se usa diariamente para poder calcular este valor y transformarlo al final del día a una tripleta. De forma similar, la eficiencia electromecánica es un KPI relevante para la gestión del agua por lo que, incluso los niveles de valor estático y dinámico, deben mostrarse para cada pozo de agua potable. Finalmente la arquitectura de percepción y control, y los trabajos referenciados han permitido aportar por un lado parte de las capas usadas y por el otro encontrar que parámetros son claves para considerarlos en el modelo y poder llevar a cabo un estudio comparativo entre ciudades inteligentes.

³⁰ <http://www.topquadrant.com/tools/ide-topbraid-composer-maestro-edition/>

Capítulo 6

Conclusiones y Trabajos Futuros

CAPITULO 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

En este capítulo se presenta las principales contribuciones de este trabajo de investigación en el ámbito de los edificios inteligentes respecto a la gestión energética, así como los principales logros y conclusiones del mismo, las limitaciones encontradas y trabajos futuros.

6.1. Contribuciones y conclusiones.

En este trabajo de investigación se ha diseñado y desarrollado una red de sensores distribuidos para el modelo de arquitectura de percepción y control propuesto, que tiene como objetivo la gestión del flujo térmico en un edificio nZEB, haciendo uso de redes de sensores, tecnologías de la web semántica y ontologías.

Esta arquitectura se implementó en un prototipo real de edificio de consumo de energía casi nulo (nZEB), que cuenta con sistemas de almacenamiento de calor sensible y calor latente. Tres sistemas térmicos, Colector Solar (CS), sistema geotérmico de almacenamiento en el subsuelo e intercambiador de calor (GHX), y una barrera o envolvente dinámica en los muros (BTD) se han usado para estabilizar la temperatura interior del edificio nZEB, variando el gradiente térmico de los muros exteriores haciendo circular un fluido calo-portador, y reduciendo así el gasto de energía de calefacción y refrigeración. Además se ha construido un sistema híbrido panel FV/Térmico con MCF para controlar la temperatura en la superficie exterior del panel fotovoltaico y almacenar el calor latente de fusión haciendo uso de Materiales de Cambio de Fase (MCF), con posibilidad de suministrar esta energía almacenada mediante un circuito secundario como agua caliente sanitaria (ACS) para el edificio.

Se ha implementado una red distribuida de sensores en el edificio, tanto en su interior (dos plantas) como en los muros exteriores, incluyendo puntos estratégicos de medida de datos del sistema de transferencia térmico Colector Solar-Intercambiador Térmico en Subsuelo-Barrera Térmica Dinámica (CS-GHX-BTD). Esta información queda registrada en una Base de Datos y ha sido muy útil para tener una mejor comprensión de la dinámica de este sistema complejo. En el segundo sistema térmico, el sistema híbrido panel fotovoltaico/Material de Cambio de Fase (FV/Térmico MCF),

también se instalaron varios conjuntos de sondas NTC para la toma de datos de temperatura y el estudio de su dinámica.

En ambos sistemas el uso de la imagen térmica fue clave para visualizar los procesos de almacenamiento de energía y enfriamiento/calentamiento de las superficies del edificio. En el sistema de transferencia CS-GHX-BTD se utilizó la imagen térmica para observar la envolvente durante las diferentes estaciones y en diferentes franjas horarias, así como en puntos clave del interior del edificio para observar y entender su comportamiento. En el sistema híbrido FV/Térmico con MCF las imágenes térmicas permitieron comprender mejor el fenómeno del cambio de fase que sucedía en el depósito con Material de Cambio de Fase (MCF) y detectar las necesidades de aislamiento. También se analizó la distribución de temperaturas en la cara exterior del panel, donde se alcanzan temperaturas por encima de los 80°C en verano.

En resumen, el colector solar juega un papel fundamental en el balance de la energía del edificio nZEB como fuente disponible de energía renovable, el intercambiador de calor térmico del subsuelo como zona de almacenamiento y fuente, y la barrera térmica dinámica como zona de uso de esta energía térmica para estabilizar la temperatura interior del edificio nZEB.

Los principales logros de esta investigación se pueden resumir en:

- Presentación en la Expo Zaragoza 2008 de “OIKOS: LA CASA POSIBLE”, como primer paso para mostrar la importancia de la gestión eficiente de energías renovables y la manipulación de la envolvente de un edificio para reducir el consumo de energía hasta la autosuficiencia.
- Diseño propio de un nodo “sensor” para el procesamiento de datos con apoyo de algoritmos de aprendizaje automático, patentado para uso en la gestión energética de edificios. Al contar este sensor con un servidor web incorporado y el hacer uso en esta propuesta de la ontología SSN, facilitó la presentación de información de contexto al usuario y su denominación de “sensor semántico”.
- Creación de un entorno inteligente para percibir el estado del edificio a través de una red de sensores distribuidos estratégicamente y, asimismo, modificar su entorno a través de actuadores, teniendo como meta la gestión eficiente de la energía, garantizando el confort de los usuarios.
- Pruebas reales en un prototipo de edificio del tipo nZEB de la arquitectura propuesta, con una red de sensores basados en tecnologías de la Web Semántica

que permiten captar, transportar, acumular y transformar la energía recibida en la envolvente del edificio, adaptándola a la demanda.

- Experimentación con un sistema híbrido panel fotovoltaico / térmico con material cambio de fase (FV/MCF) para analizar la evolución temporal de las variaciones de temperatura del mismo y las posibilidades de cubrir la demanda de ACS.
- Este trabajo de investigación constituye una primera aportación para una propuesta de modelo de arquitectura de percepción y control aplicada a lo que se conoce como “ciudad inteligente”, haciendo uso nuevamente de tecnologías de la web semántica para integrar datos globales tales como la eficiencia electromecánica en los sistemas de bombeo usados en las plantas potabilizadoras para el suministro de agua potable a una ciudad.

Como conclusiones de este trabajo se pueden enunciar:

1. Se ha demostrado que es posible la captura de energía para propósitos de calefacción y refrigeración en climas templados como el de España siempre y cuando la superficie exterior cuente con unas propiedades adecuadas. Esto quedó asentado en la simulación del colector solar haciendo uso de datos reales de radiación solar y temperatura exterior, y posteriormente con los datos experimentales medidos en el colector solar durante la etapa de pruebas. Adicionalmente en la simulación se encontró que la elección del color de la superficie exterior del colector solar mejora la captura de energía térmica para propósitos de calefacción, sin tener un gran impacto en la energía capturada para propósitos de refrigeración.
2. El almacenamiento de la energía térmica en el subsuelo se demostró factible mediante pruebas experimentales, probando la atenuación de la influencia de las condiciones externas en la temperatura del subsuelo, en donde la zona central es la menos afectada. Las diferentes variaciones en cada una de las zonas muestran la capacidad potencial de modulación térmica producida por la tierra a lo largo de los años.
3. La barrera térmica dinámica propuesta ha demostrado, haciendo uso de modelos, que contribuye a estabilizar dentro de la banda de confort la temperatura interior del edificio nZEB. Esto ha sido cotejado en las pruebas experimentales, con

datos reales adquiridos y el apoyo de imagen térmica, al hacer fluir el líquido calo-portador por los tubos PP en la capa de hormigón que se encuentra aislada por capas de poliestireno.

4. El uso de la ontología SSN, junto con el diseño y desarrollo de una red de sensores distribuida, como propuesta para el modelo de percepción y control de la gestión del flujo de energía térmica, permite la integración gradual de sensores e información de contexto.
5. El uso de estas herramientas de modelado y simulación, y el despliegue de una red de sensores, en donde el flujo de energía térmica se formula para trabajar en las estrategias de control, se han utilizado para reducir el consumo de energía secundaria usada en tareas de calefacción y refrigeración.
6. Para el sistema panel FV/MCF, se incrementó la eficiencia del panel FV al mantener un sistema de control de temperatura en su cara exterior. Almacenar esta energía térmica en un Material de Cambio de Fase permite su uso en un circuito secundario ACS en el edificio nZEB.

Por último, se ha mostrado los beneficios del diseño de ciudades inteligentes usando ontologías y tecnologías de la web semántica, donde el aumento de dispositivos embebidos auguran oportunidades para analizar gran cantidad de datos en tiempo real mediante una inteligencia distribuida.

En resumen sistema de barrera térmica controlada por la acumulación en el subsuelo del calor captado en la envolvente se muestra de especial aplicación en climas fríos, que no precisas refrigeración y donde la temperatura de la reserva subterránea no alcanza la banda de confort y, por tanto, no puede utilizarse directamente como calefacción en el interior del edificio.

6.2. Trabajos futuros.

Sin embargo en regiones templadas como España o cálidas como México, la temperatura de acumulación en el terreno alcanza fácilmente la banda de confort entre 20 y 26°C e incluso la de ACS a unos 40°C. Ello implica que la aportación de calor entre dos capas aislantes en la barrera térmica es menos eficaz que la entrada directa de calor acumulado al interior del edificio. El diseño y control de este tipo de edificios es

uno de los trabajos en curso al término de esta memoria y se plasma en diseño como el del prototipo OIKOS en el que ha colaborado el autor de esta memoria.

Por otro lado la necesidad de refrigeración ha de evitar los intercambiadores superficiales en muros, suelo o techo por los problemas de condensación, en especial en climas o habitaciones húmedas del edificio como son los baños o cocinas. Por ello se han de rediseñar los intercambiadores de calor interiores para que permitan la recogida del agua condensada y sea posible su retirada o reutilización.

Cabe mencionar que la red local de gestión de energía integrada en la vivienda es susceptible de múltiples aplicaciones con mínimas modificaciones entre las que se pueden citar:

- a. Gestión de energía eléctrica además de térmica
- b. Gestión de accesos y huecos (puertas y ventanas)
- c. Seguridad: intrusos, incendios, inundación
- d. Atención a: niños, enfermos, ancianos,...
- e. Otras

Finalmente, el aprendizaje obtenido durante este periodo nos obliga a continuar trabajando sobre un modelo de ciudad inteligente para llegar a su implementación real.

Bibliografía

- Abanda, F., Tah, J., & Keivani, R. (2013). Trends in built environment semantic Web applications: Where are we today? *Expert Systems with Applications*, 40, 5563–5577.
- Aberer, K., Hauswirth, M., & Salehi, A. (2007). Zero-programming Sensor Network Deployment. *International Symposium on Applications and the Internet Workshops* (pág. 1). Hiroshima: IEEE.
- Abinger, T., Kastner, W., Lubert, G., & Neugshwandtner, G. (2008). Enhancing residential automation systems with artificial intelligence. *KNX Scientific Conference 2008*. St. Katelijne-Waver.
- ACEEE. (2011). *How Does Energy Efficiency Create Jobs?* American Council for an Energy Efficient Economy, Washington, D.C.
- Agresti, A. (2012). *Categorical Data Analysis* (3er ed.). Wiley.
- Albreshne, A., Lahcen, A. A., & Pasquier, J. (2014). Using a Residential Environment Domain Ontology for Discovering and Integrating Smart Objects in Complex Scenarios. *Procedia Computer Science*, 32, 997-1002. doi:10.1016/j.procs.2014.05.524
- Allemang, D., & Hendler, J. (2008). *Semantic Web for the working ontologist*. Morgan Kaufmann.
- Antoniou, G., & Harmelen, F. v. (2009). Web Ontology Language: OWL. En S. Staab, & R. Studer, *Handbook on Ontologies* (2nd ed., págs. 91-110). Springer.
- Arcuri, N., Reda, F., & De Simone, M. (2014). Energy and Thermo-Fluid-Dynamics Evaluations of Photovoltaic Panels Cooled by Water and Air. *Solar Energy*, 105, 147-156. doi:10.1016/j.solener.2014.03.034
- Atanasiu, Bogdan. (2011). *Principles for Nearly Zero Energy Building*. Building Performance Institute Europe. BPIE.
- Augusto, J. (2007). Ambient Intelligence: The Confluence of Pervasive Computing and Artificial Intelligence. En Schuster (Ed.), *Intelligent Computing Everywhere* (págs. 213-234). Springer Verlag.
- Axelsson, G. (2012). The Physics of Geothermal Energy. En A. Sayigh (Ed.), *Comprehensive Renewable Energy* (Vol. 7, pág. 3). Elsevier.
- Baader, F., Calvanese, D., McGuinness, D., Nardi, D., & Patel-S., P. F. (2010). *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation and Applications*. Cambridge. doi:978-0521150118
- Balfour, J., Shaw, M., & Bremer Nash, N. (2013). *Advanced Photovoltaic System Design*. Jones & Bartlett.
- Becchio, C., Dabbene, P., Fabrizio, E., Monetti, V., & Filippi, M. (2015). Cost Optimality Assessment of a Single Family House: Building and Technical Systems Solutions for the nZEB Target. *Energy and Buildings*, 90, 173-187. doi:10.1016/j.enbuild.2014.12.050
- Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (May de 2001). The Semantic Web. *Scientific American*, 284(5), 28-37.

- Boermans, T., Hermelink, A., Schimschar, S., Grözinger, J., & Offermann, M. (2011). *Principles for Nearly Zero Energy Buildings - Paving the way for effective implementation of policy requirements*. Executive Summary, BPIE.
- Bonino, D., Castellina, E., & Corno, F. (2008). DOG: An Ontology-Powered OSGi Domotic Gateway. *Tools with Artificial Intelligence*. 1, págs. 157-160. IEEE.
- Bonino, D., Corno, F., & Razzak, F. (2011). Enabling machine understandable exchange of energy consumption information in intelligent domotic environments. *Energy & Buildings*(43), 1392-1402.
- Borgo, S., & Masolo, C. (2009). Foundational Choices in DOLCE. En S. Staab, & R. Studer, *Handbook on Ontologies* (2nd ed., págs. 361-382). Springer. doi:10.1007/978-3-540-92673-3_16
- Borst, W. (1997). Construction of engineering Ontologies. *Centre for Telematica and Information Technology, Universtiy of Tweenty*.
- Botts, M., Percival, G., Reed, C., & Davidson, J. (2007). *Sensor Web Enablement: Overview and High Level Architecture*. Open Geospatial Consortium Inc.
- Broring, A., Maue, P., Maleski, C., & Janowicz, K. (2012). Semantic Mediation on the Sensor Web. *Geoscience and Remote Sensing Simposium* (págs. 2910-2913). Munich: IEEE.
- Cabral, L., Compton, M., & Müller, H. (2014). A Use Case in Semantic Modelling and Ranking for the Sensor Web. En P. Mika, T. Tudorache, & A. Bernstein (Ed.), *13th International Semantic Web Conference*. 8797 , págs. 276-291. Riva del Garda: Springer. doi:10.1007/978-3-319-11915-1_18
- Calvanese, D., & Guarino, N. (2006). Ontologies and Description Logics. *Intelligenza Artificiale*, 3(1-2), 21-27.
- Calvanese, D., De Giacomo, G., Lembo, D., Lenzerini, M., Poggi, A., Rodriguez-Muro, M., & Rosati, R. (2009). Ontologies and Databases: The DL-Lite Approach. *Reasoning Web. Semantic Technologies for Information Systems*. 5689, págs. 255-356. Brixen-Bressanone: Springer. doi:10.1007/978-3-642-03754-2_7
- Cauret, O. (2008). Analysis of Ground Heat Exchangers for Geothermal Heat Pumps in Old Individual Houses. *International Refrigeration and Air Conditioning* (págs. 2304.1-2304.8). West Lafayette: Purdue University.
- Ceravolo, P., & Damiani, E. (2008). Introduction to Ontology Engineering. En A. Zilli, E. Damiani, P. Ceravolo, A. Corallo, & G. Elia, *Semantic Knowledge Management: An Ontology based Framework*. Idea Group Inc (IGI).
- Chee Tahir, A., & Bañares Alcantara, R. (2012). A knowledge representation model for the optimisation of electricity geration mixes. *Applied Energy*, 77-83.
- Compton, M., Barnaghi, P., Bermudez, L., Garcia-Castro, R., Corcho, O., Cox, S., . . . Janowicz, K. (2012). The SSN ontology of the W3C semantic sensor network incubator group. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 17, 25-32. doi:10.1016/j.websem.2012.05.003

- Compton, M., Henson, C., Lefort, L., Neuhaus, H., & Sheth, A. (2009). A Survey of the Semantic Specification of Sensors. En K. Taylor, A. Ayyagari, & D. De Roure (Ed.), *Semantic Sensor Networks*, (págs. 17-32). Washington DC.
- Cook, D. J., & Das, S. K. (2005). Overview. En *Smart Environments: Technology, Protocols, and Applications*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Corcho, O., & García Castro, R. (2010). Five challenges for the Semantic Sensor Web. En K. Janowicz, & P. Hitzler (Ed.), *Semantic Web Interoperability, Usability, Applicability*, (págs. 121-125).
- Corral, M. G. (13 de ABRIL de 2012). Madrid EcoCity / Nuevos modelos urbanísticos. *EL MUNDO*, pág. 52.
- Crandall, A. S., & Cook, D. J. (2013). Behaviometrics for Identifying Smart Home Residents. En *Human Aspects in Ambient Intelligence* (págs. 55-71). Springer.
- Cuenca Grau, B., Horrocks, I., Motik, B., Parsia, B., Patel-Schneider, P., & Salttler, U. (2008). OWL2: The next step for OWL. *Web Semantics: Science, Services and Agents on the World Wide Web*, 6(4), 309-322. doi:10.1016/j.websem.2008.05.001
- D'Agostino, D. (2015). Assessment of the progress towards the establishment of definitions of Nearly Zero Energy Buildings (nZEBs) in European Member States. *Building Engineering*, 1, 20-32. doi:doi:10.1016/j.job.2015.01.002
- Davies, J., Grobelnik, M., & Mladenic, D. (2009). Introduction to Semantic Knowledge Management. En J. Davies, M. Grobelnik, & D. Mladenic, *Semantic Knowledge Management: Integrating Ontology Management, Knowledge Discovery and Human Language Technologies* (978-3-540-88844-4 ed., págs. 1-2). Springer.
- Delin, K. A. (2002). The Sensor Web: A Macro-Instrument for Coordinated Sensing. *Sensors*, 270-285.
- Delin, K. A., & Jackson, S. P. (2001). The sensor web: A new instrument concept. *Functional Integration of Opto-Electro-Mechanical Devices and Systems*. 4284, págs. 1-9. SPIE.
- Department for Business Innovation & Skills. (2013). *The Smart City Market: Opportunities for the UK*. London: arup.
- Dibley, M., Li, H., Rezgui, Y., & Miles, J. (2012). An ontology framework for intelligent sensor based building monitoring. *Automation in Construction*(28), 1-14.
- Dong, B., & Poh Lam, K. (2014). A real-time model predictive control for building heating and cooling systems based on the occupancy behavior pattern detection and local weather forecasting. *Building and Simulation*, 7(1), 89-106.
- Donohoe, M., Jennings, B., & Balasubramaniam, S. (2015). Context-awareness and the Smart Grid: Requirements and Challenges. *Computer Networks*, 79, 263-282. doi:10.1016/j.comnet.2015.01.007
- ECEEE. (2011). *Nearly Zero Energy Buildings: achieving the EU 2020 target*. European Council for Energy Efficiency Economy, Stockholm.

- Eicker, U., Demir, E., & Gürlich, D. (2015). Strategies for cost efficient refurbishment and solar energy integration in European Case Study buildings. *Energy and Buildings*, 102, 237-249. doi:10.1016/j.enbuild.2015.05.032
- EUROPEAN COMMISSION. (2011). *Energy Efficiency Plan 2011*. Brussels: EU.
- Feigenbaum, L., Heman, I., Hongsermeier, T., Neumann, E., & Stephens, S. (December de 2007). The Semantic Web in Action. *Scientific American*, 64-71.
- Fernández-Montes, A., Ortega, J., Sánchez-Venzalá, J., & González-Abril, L. (2014). Software Reference Architecture for Smart Environments: Perception. *Computer Standards & Interfaces*, 36, 928-940. doi:10.1016/j.csi.2014.02.004
- Ferrara, C., & Phillip, D. (2011). Why Do PV Modules Fail? *Energy Procedia*, 15, 379-387. doi:10.1016/j.egypro.2012.02.046
- Foster, P. (12 de 12 de 2010). *The green IT report*. Recuperado el 09 de 03 de 2012, de GE enters the home energy management market: <http://www.thegreenitreview.com/2010/12/ge-enters-home-energy-management-market.html>
- Fox, M. S., & Pettit, C. J. (2015). On the completeness of open city data for measuring city indicators. *First IEEE Smart Cities Conference*. Guadalajara: IEEE.
- Franco, A., & Fantozzi, F. (2016). Experimental analysis of a self consumption strategy for residential building: The integration of PV system and geothermal heat pump. *Renewable Energy*, 86, 1075-1085. doi:10.1016/j.renene.2015.09.030
- Friesen, M., & McLeod, R. (2015). Bluetooth in Intelligent Transportation Systems: A Survey. *Intelligent Transportation Systems Research*, 13(3), 143-153. doi:10.1007/s13177-014-0092-1
- Frigerio, A., Giordani, A., & Mari, L. (2010). Outline of a general model of measurement. 123-149.
- Gangemi, A., & Presutti, V. (2009). Ontology Design Patterns. En S. Staab, & R. Studer, *Handbook on Ontologies* (2nd ed., págs. 221-244). Springer.
- Gangemi, A., Guarino, N., Masolo, C., Oltramari, A., & Schneider, L. (2002). Sweetening Ontologies with DOLCE. En A. Gómez-Pérez, & V. R. Benjamins (Ed.), *13th International Conference on Knowledge Engineering and Knowledge Management* (págs. 166-181). Springer Verlag.
- Giancarlo, G., & Wagner, G. (2008). What's in a Relationship: An Ontological Analysis. *27th International Conference on Conceptual Modeling* (págs. 83-97). Barcelona: Springer.
- Gordon, V. (2009). Sustaining Our Future By Rebuilding Our Past. *ASHRAE*, 16-21.
- Gray, A. G., Sadler, J., Kit, O., Kyzirakos, K., Karpathiotakis, M., Calbimonte, J. P., . . . Galpin, I. (2011). A Semantic Sensor Web for Environmental Decision Support Applications. *Sensors*(10.3390/s110908855), 8855-8887.
- Grobelnik, M., & Mladenic, D. (2006). Knowledge Discovery for Ontology Construction. En J. Davis, R. Studer, & P. Warren, *Semantic Web Technologies: Trends and Research in Ontology Based Systems*. John Wiley & Sons.

- Gu, Y. (2011). *The Impacts of Real-time Knowledge Based Personal Lighting Control on Energy Consumption, User Satisfaction and Task Performance in Offices*. Carnegie Mellon University.
- Guarino, N., & Welty, C. A. (2009). An overview of OntoClean. En S. Staab, & R. Studer, *Handbook on Ontologies* (2nd ed., págs. 201-220). Springer.
- Guarino, N., Oberle, D., & Staab, S. (2009). What is an Ontology? En S. Staab, & R. Studer (Edits.), *HandBook on Ontologies* (2nd ed., págs. 1-17). Springer.
- Guínea Díaz, D., Villanueva Martinez, E., García-Alegre, M. C., Guinea G., D. M., Martín Gómez, D., Rodríguez, D., & Hernandez U., O. (2013). *Spain Patente nº ES 2 380 029 B1*.
- Guinea, D., Hernández, O., Guinea, D., Peña, P., Martín, D., Izco, L., . . . García-Alegre, M. (2010). Gestión Integral de Energía en la Acumulación Geotérmica: Datos, Comunicaciones, Decisiones. *II Congreso de Energía Geotérmica en la Edificación y la Industria* (págs. 213-221). Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Guinea, D., Peña, P., & Hernández, O. (2009). Autosuficiencia Energética en la vivienda. *Congreso de generacion distribuida*. Madrid.
- Guinea, D., Peña, P., Guinea, D., & Hernández, O. (2010). Energía solar en el subsuelo. *II Congreso de Energía Geotérmica en la edificación y la Industria* (págs. 231-239). Madrid: Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.
- Guinea, D., Villanueva, E., García-Alegre, M., Peña, P., Izco, L., Gilarranz, S., . . . Guinea, D. (2009). OIKOS: Una vivienda de consumo energético cero. *1er Congreso de arquitectura sostenible*. Valladolid.
- Guizzardi, G. (2005). *PhD Thesis Ontological Foundations for Structural Conceptual Models*. Telematica Instituut Fundamental Research Series.
- Guizzardi, G., Lopes, M., Baiao, F., & Falbo, R. (2009). On the importance of Truly Ontological Distinctions for Ontology Representation Languages: An industrial case study in the domain of Oil and Gas. *CAiSE 2009: Amsterdam, The Netherlands - BPMDS / EMMSAD*. 29, págs. 224-236. Amsterdam: Springer.
- Guru, S., Taylor, P., Neuhaus, H., & Yanfeng, S. (2008). Hydrological Sensor Web for the South Esk Catchment in the Tasmania State of Australia. *Fourth International Conference on eScience* (págs. 432-433). Indianapolis, IN: Springer. doi:10.1109/eScience.2008.89
- Hendler, J. A. (2009). Tonight's Dessert: Semantic Web Layer Cakes. En L. Arroyo, P. Traverso, F. Ciravegna, & P. Cimiano, *The Semantic Web: Research and Applications* (pág. 1). Springer. doi:10.1007/978-3-642-02121-3_1
- Henson, C. A., Pschorr, J. K., Sheth, A. P., & Thirunarayan, K. (2009). SemSOS: Semantic Sensor Observation Service. *International Symposium on Collaborative Technologies and Systems* (págs. 44-53). Baltimore: IEEE.
- Hernández, O., Gilarranz, S., Guinea, D., Villanueva, E., Martín, D., García-Alegre, M., . . . Guinea, D. (2009). Gestión Integral de Energía en la Edificación. *Congreso de arquitectura sostenible* (págs. 175-178). Valladolid: Colegio Oficial de Arquitectos de Castilla y León.

- Hernández, O., Guinea, D., & Garcia-Alegre, M. (2014). Desarrollo de un sensor de bajo costo para el monitoreo y control de una vivienda con uso de energía geotérmica de baja entalpía. *Congreso internacional de investigación* (págs. 2246-2252). Celaya, Gto. Mexico: Academia Journals.
- Hernández, O., Guinea, D., & San Martín, J. (2014). Sistema de almacenamiento de energía térmica usando material de cambio de fase con aplicación al uso residencial. *XI Congreso Iberoamericano de energía solar y XXXVIII semana nacional de energía solar* (págs. 1026-1035). Santiago de Querétaro: ANES.
- Hernández, O., Guinea, D., & San Martín, J. (2015). Aplicación al uso residencial: almacenamiento de energía térmica con cambio de fase. *ERA SOLAR*, 186, 24-33.
- Hernández, O., Guinea, D., & Santos, M. (2014). Semantic sensors: a proposal from smart building to smart city model. *2nd. Workshop on semantic web and linked open data*, (pág. paper50). Oaxaca.
- Hernández, O., Santos, M., García-Alegre, M., & Guinea, D. (2015). A context-awareness architecture for managing thermal energy in an nZEB. *First IEEE Smart Cities Conference*. IEEE.
- Hofweber, T. (2012). Logic and Ontology. (E. N. Zalta, Ed.) The Stanford Encyclopedia of Philosophy. Obtenido de <http://plato.stanford.edu/archives/sum2012/entries/logic-ontology/>
- Huang, Y. (2015). Optimal Building Envelope Design Based on Simulated Performance: History, Current Status and New Potentials. *Energy and Buildings*. doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.025
- Hunter, G. W., Stetter, J. R., Hesketh, P. J., & Liu, C.-C. (2010). Smart Sensor Systems. *INTERFACE*, 19(4), 29-34.
- Hunter, J. (2015). An Ontological framework to support evidence-based policy making using global city indicators. *First IEEE Smart Cities Conference*. Guadalajara: IEEE.
- IEA. (2012). *Technology Roadmap. Solar Heating and Cooling*.
- Jakkula, V. R., Crandall, A. S., & Cook, D. J. (2009). Enhancing Anomaly Detection Using Temporal Pattern Discovery. En A. D. Kameas, V. Callagan, H. Hagraas, M. Weber, & W. Minker, *Advanced Intelligent Environments* (págs. 175-194). Springer.
- Jalaei, F., & Jade, A. (2015). Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings. *Sustainable Cities and Society*, 18, 95-107. doi:10.1016/j.scs.2015.06.007
- Janowicz, K., & Compton, M. (2010). The Stimulus-Sensor-Observation Ontology Design Pattern and its Integration into the Semantic Sensor Network Ontology. *Workshop on Semantic Sensor Network Ontology*. 668. Shanghai: CEUR-WS. doi:urn:nbn:de:0074-668-8
- Keet, C. M. (2012). *Ontologies and Knowledge Bases*. University of KwaZulu-Natal.

- Kofler, M. J., Reinisch, C., & Kastner, W. (2011). An Intelligent Knowledge Representation of Smart Home Energy. *World Renewable Energy Congress* (págs. 921-928). Linköping: Linköping University Electronic Press.
- Krecke, E., & Les Floralties, M. (2012). *Patente nº US 2,012,026,109,1A1*.
- Krzaczek, M., & Kowalczyk, Z. (2011). Thermal barrier as a technique of indirect heating and cooling for residential buildings. *Energy and Building*, 43(4), 823-837. doi:10.1016/j.enbuild.2010.12.002
- Krzaczek, M., & Kowalczyk, Z. (2012). Gain scheduling control applied to thermal barrier systems of indirect passive heating and cooling of buildings. *Control Engineering Practice*, 20(2), 1325-1336. doi:10.1016/j.conengprac.2012.07.007
- Kuhn, W. (2009). A Functional Ontology of Observation and Measurement. *Third International Conference, GeoS 2009*. 5892, págs. 26-43. México: Springer.
- Kunkel, S., & Kontonasiou, E. (2015). Indoor air quality, thermal comfort and daylight policies on the way to nZEB -Status of selected MS and future policy recommendations. *Summer Study - First Fuel Now* (págs. 1261-1270). Belambra Les Criques: ECEEE.
- Leggieri, M., Passant, A., & Hauswirth, M. (2010). A Contextualised Cognitive Perspective for Linked Sensor Data. *Semantic Sensor Networks 2010*. 668. Shanghai: CEUR-WS.
- López, G., Custodio, V., Moreno, J. I., Sikora, M., Moura, P., & Fernández, N. (2015). Modeling Smart Grid Neighborhoods with the ENERip Ontology. *Computers in Industry*, 70, 168-182. doi:10.1016/j.compind.2015.01.008
- Lstiburek, J. W. (May de 2007). The Perfect Wall. *ASHRAE Journal*, 74-78.
- Lymberopoulos, D., Bamis, A., & Savvides, A. (2011). Extracting Spatiotemporal Human Activity Patterns in Assisted Living using a Home Sensor Network. *Universal Access in the Information Society*, 10(2), 125-138.
- Mari, L. (2003). Epistemology of measurement. *Measurement*, 17-30.
- Mari, L. (2011). Measurement science and its evolution. *Physical Methods, Instruments and Measurements*.
- Masolo, C. (2010). Founding properties on measurement. *Formal Ontology in Information Systems* (págs. 89-102). ACM.
- McEwen, A., & Cassimally, H. (2013). *Designing the Internet of Things* (1 ed.). Wiley.
- Meier, A., Aragon, C., Hurwitz, B., & Mujumdar, D. (2010). How People Actually Use Thermostats. *ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, (págs. 193-206).
- Mohamed, A., Hasan, A., & Sirén, K. (2014). Fulfillment of Net-Zero Energy Building (NZEB) with Four Metrics in a Single Family House with Different Heating Alternatives. *Applied Energy*, 114, 385-399. doi:10.1016/j.apenergy.2013.09.065
- Moriarty, P., & Jia Wang, S. (2015). Assessing global renewable energy forecasts. *Energy Procedia*, 75, 2523-2528. doi:10.1016/j.egypro.2015.07.256

- Nair, N., Ramakrishnan, G., & Krishnaswamy, S. (2011). Enhancing Activity Recognition in Smart Homes Using Feature Induction. *13th International Conference on Data Warehousing and Knowledge Discovery* (págs. 406-418). Tolouse: Springer.
- Nakashima, H., Aghajan, H., & Augusto, J. (Edits.). (2010). *Handbook of Ambient Intelligence and Smart Environments*. Springer.
- Parundekar, R., Knoblock, C. A., & Ambite, J. L. (2010). Linking and Building Ontologies of Linked Data. *9th International Semantic Web Conference* (págs. 598-614). Shangai: Springer-Verlag.
- Penza, M., & Consortium, E. (2014). COST Action TD1105: New Sensing Technologies for Environmental Sustainability in Smart Cities. *Sensors 2014* (págs. 1-7). Valencia: IEEE. doi:10.1109/ICSENS.2014.6984918
- Perttunen, M., Kostakos, V., Riekkí, J., & Ojala, T. (2015). Urban Traffic Analysis Through Multi-Modal Sensing. *Pervasive u*, 19(3-4), 709-721. doi:10.1007/s00779-015-0833-4
- Ploennigs, J., Schumann, A., & Lécué, F. (2014). Adapting Semantic Sensor Networks for Smart Building Diagnosis. En P. Mika, T. Tudorache, & A. Bernstein (Ed.), *International Semantic Web Conference*. 8797, págs. 308-323. Riva de Garda: Springer. doi:10.1007/978-3-319-11915-1_20
- Poli, R., & Obrst, L. (2010). The Interplay Between Ontology as Categorical Analysis and Ontology as Technology. En R. Poli, M. Healy, & A. Kameas, *Theory and Applications of Ontology* (págs. 1-26). Springer.
- Raciti, M., & Nadjm-Tehrani, S. (2013). Embedded Cyber-Physical Anomaly Detection in Smart Meters. *7th International Workshop on Critical Information Infrastructures Security* (págs. 34-45). Lillehammer: Springer.
- Raisul Alam, M., Bin Ibne Reaz, M., & Alauddin Mohd Ali, M. (2012). A Review of Smart Homes—Past, Present, and Future. *IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS*, 42(6), 1190-1203.
- Ramakrishnan, S., & Vijayan, A. (2014). A study on development of cognitive support features in recent ontology visualization tools. *Artificial Intelligence Review*, 41(4), 595-623. doi:10.1007/s10462-012-9326-2
- Rekioua, D., & Matagne, E. (2012). *Optimization of Photovoltaic Power Systems - Modelization, Simulation and Control*. Springer.
- Rijgersberg, H., van Assen, M., & Top, J. (2011). Ontology of Units of Measure and Related Concepts. *Semantic Web*.
- Rogers, W. A., & Fisk, A. D. (2010). Toward a Psychological Science of Advanced Technology Design for Older Adults. *Journal of Gerontology: Psychological Sciences*, 645-653.
- Rohjans, S., Fensel, D., & Fensel, A. (2011). OPC UA goes semantics: Integrated communications in smart grids. *16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation* (págs. 1-4). Toulouse: IEEE.
- Salsbury, T. (2009). The Smart Building. En S. Y. Nof, *Handbook of automation* (págs. 1079-1093). Springer.

- Sánchez, L., Elicegui, I., Cuesta, J., Muñoz, L., & Lanza, J. (2013). Integration of Utilities Infrastructures in a Future Internet Enabled Smart City Framework. *Sensors*, *13*, 14438-14465.
- Schevers, H. A., Mitchell, J., Akhurst, P., Marchant, D., Bull, S., McDonald, K., . . . Linning, C. (2007). Towards Digital Facility Modelling for Sydney Opera House using IFC and Semantic Web Technology. *Information Technology in Construction*, *12*, 347-362.
- Sesana, M. M., & Salvalai, G. (2013). Overview on Life Cycle Methodologies and Economic Feasibility for nZEBs. *Building and Environment*, *67*, 211-216. doi:10.1016/j.apenergy.2013.09.065
- Shadbolt, N., & O'Hara, K. (2013). Linked Data in Government. *Internet Computing*, *7*(4), 72-77. doi:10.1109/MIC.2013.72
- Sharafi, M., ElMekkawy, T. Y., & Bibeau, E. L. (2015). Optimal design of hybrid renewable energy systems in buildings with low to high renewable energy ratio. *Renewable Energy*, *83*, 1026-1042. doi:10.1016/j.renene.2015.05.022
- Sharma, A., Tyagi, V., Chen, C., & Buddhi, D. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 318-345.
- Sommaruga, L., Formilli, T., & Rizzo, N. (2011). DomoML: an integrating devices framework for ambient intelligence solutions. *6th International Workshop on Enhanced Web Service Technologies* (págs. 9-15). Lugano: ACM.
- Song, E., & Lee, K. (2009). Integration of IEEE 1451 smart transducers and OGC-SWE using STWS. *Sensor Applications Symposium* (págs. 298-303). New Orleans: IEEE.
- Studer, R., Benjamins, V. R., & Fensel, D. (1998). Knowledge Engineering: Principles and Methods. *Data & Knowledge Engineering*.
- Suárez-Figueroa, M., Gómez-Pérez, A., & Fernández-López, M. (2012). The NeOn Methodology for Ontology Engineering. En M. Suárez-Figueroa, A. Gómez-Pérez, E. Motta, & A. Gangemi, *Ontology Engineering in a Networked World* (págs. 9-34). Springer. doi:10.1007/978-3-642-24794-1_2
- Sydenham, P. (1994). Discipline design of sensor systems - Part 2. KBSs in sensor and sensor systems design. *Measurement*(14), 81-87.
- Teske, S., Sawyer, S., Schäfer, O., Pregger, T., Simon, S., & Naegler, T. (2015). *Energy [r]evolution, a sustainable world energy outlook*. Greenpeace International, GWEC, SolarPower Europe .
- Thiele, A. M., Sant, G., & Pilon, L. (2015). Diurnal thermal analysis of microencapsulated PCM-concrete composite walls. *Energy Conversion and Management*, *93*, 215-227. doi:10.1016/j.enconman.2014.12.078
- Treiber, M., & Kesting, A. (2008). Impact of traffic congestion on fuel consumption and emissions. *Networks for mobility*, (págs. 69.1-69.17). Stuttgart.

- Uckelmann, D., Harrison, M., & Michahelles, F. (2011). An Architectural Approach Towards the Future Internet of Things. En D. Uckelmann, M. Harrison, & F. Michahelles, *Architecting The IoTs* (págs. 1-24). Springer.
- Uribe, O., Martín, J., García-Alegre, M., Santos, M., & Guinea, D. (2015). Smart Building decision making architecture for thermal energy management. *Sensors*, *15*, 27543-27568.
- Valiente-Rocha, P. A., & Lozano Tello, A. (2010). Ontology Based Expert System for Home Automation Controlling. *23rd Int. Conf. on Industrial Engineering and Other Apps. of Applied Intelligent Systems*. *1*, págs. 661-670. Cordoba: Springer.
- Van Rennen, D. (2011). *Modelling the Performance of Underground Heat Exchangers and Storage Systems*. MsC. Thesis, Chalmers University of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering, Göteborg.
- Vanhoof, K., & Lauth, I. (2010). Application Challenges for Ubiquitous Knowledge Discovery. En R. Goebel, J. Siekmann, & W. Wahlster, *Ubiquitous Knowledge Discovery* (págs. 108-124). Springer.
- Varzi, A. C. (2007). Spatial Reasoning and Ontology: Parts, Wholes, and Locations. En M. Aiello, I. Pratt-Hartmann, & J. v. Benthem, *Handbook of Spatial Logics* (págs. 945-1038). Springer.
- Vega, Sergio. (2011). *SOLAR DECATHLON EUROPE 2010, Towards Energy Efficient Buildings*. UPM.
- Vinagre Díaz, J., Wilby, M. R., & Rodriguez González, B. (2013). EEOnt: An ontological model for a unified representation of energy efficiency in buildings. *Energy & Buildings*, *60*, 20-27.
- Weidlich, A., Karnouskos, S., Ringelstein, J., & et al. (2010). *Smart Houses Interating with Smart Grids to achieve next generation energy efficiency and sustainability*. EU.
- Wood, D., Zaidman, M., Ruth, L., & Hausenblas, M. (2013). *Linked Data Structured data on the Web*. Manning Publications.
- Yin, C. T., Xiong, Z., Chen, H., Wang, J. Y., Cooper, D., & David, B. (2015). A Literature Survey on Smart Cities. *Science China Information Sciences*, *58*, 100102:1–100102:18. doi:10.1007/s11432-015-5397-4

ANEXO A. OWL – CONSTRUCTORES Y AXIOMAS.

En este anexo presentamos algunos constructores OWL y la sintaxis en lógica descriptiva. Recordando que el mayor beneficio de OWL ha sido un incremento enorme en el rango y sofisticación de herramientas e infraestructura. Sin esto, sería prácticamente imposible el haber llevado este trabajo de investigación, ya que herramientas comunes que se usaron fueron NeonToolkit, Protege y TopBraid Composer. Estos incorporan razonadores tan conocidos como Hermit, FaCT++, Pellet, CEL, KAON2 y Racer.

CONSTRUCTOR OWL	SINTAXIS LD	EJEMPLO
intersectionOf	$C_1 \sqcap \dots \sqcap C_n$	<i>Nodo</i> \sqcap <i>sensor</i>
unionOf	$C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$	<i>NTC</i> \sqcup <i>RTD</i>
complementOf	$\neg C$	\neg <i>transductor</i>
oneOf	$\{x_1\} \sqcup \dots \sqcup \{x_n\}$	$\{NTCbarebeads\} \sqcup \{NTCrops\}$
allValuesFrom	$\forall P. C$	\forall <i>tieneTransductor</i> . <i>NTC</i>
someValuesFrom	$\exists P. C$	\exists <i>tieneTransductor</i> . <i>RTD</i>
maxCardinality	$\leq nP$	≤ 1 <i>tieneTransductor</i>
minCardinality	$\geq nP$	≥ 2 <i>hasTransducer</i>

AXIOMAS	SINTAXIS LD	EJEMPLO
subClassOf	$C_1 \sqsubseteq C_2$	$RTD \sqsubseteq transductor$
equivalentClass	$C_1 \equiv C_2$	$nodoSensor \equiv dispMed$ $\sqcap transductor$
subPropertyOf	$P_1 \sqsubseteq P_2$	$tieneNTC \sqsubseteq tieneTransductor$
equivalentProperty	$P_1 \equiv P_2$	$costo \equiv precio$
transitiveProperty	$P^+ \sqsubseteq P$	$compiteCon^+ \sqsubseteq compiteCon$

ANEXO B. SIMULACIÓN BARRERA TÉRMICA DINÁMICA.

En este anexo presentamos simulaciones adicionales de la barrera térmica que apoyaron en la definición del controlador lógico difuso.

Recordando que el flujo de calor puede ser expresado por la ley de Fourier de conducción de calor como:

$$q = -k \frac{\Delta T}{x} \quad (\text{B1})$$

En donde el flujo de calor es positivo en la dirección opuesta al gradiente de temperatura positivo. Es decir:

$$\Delta T = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \quad (\text{B2})$$

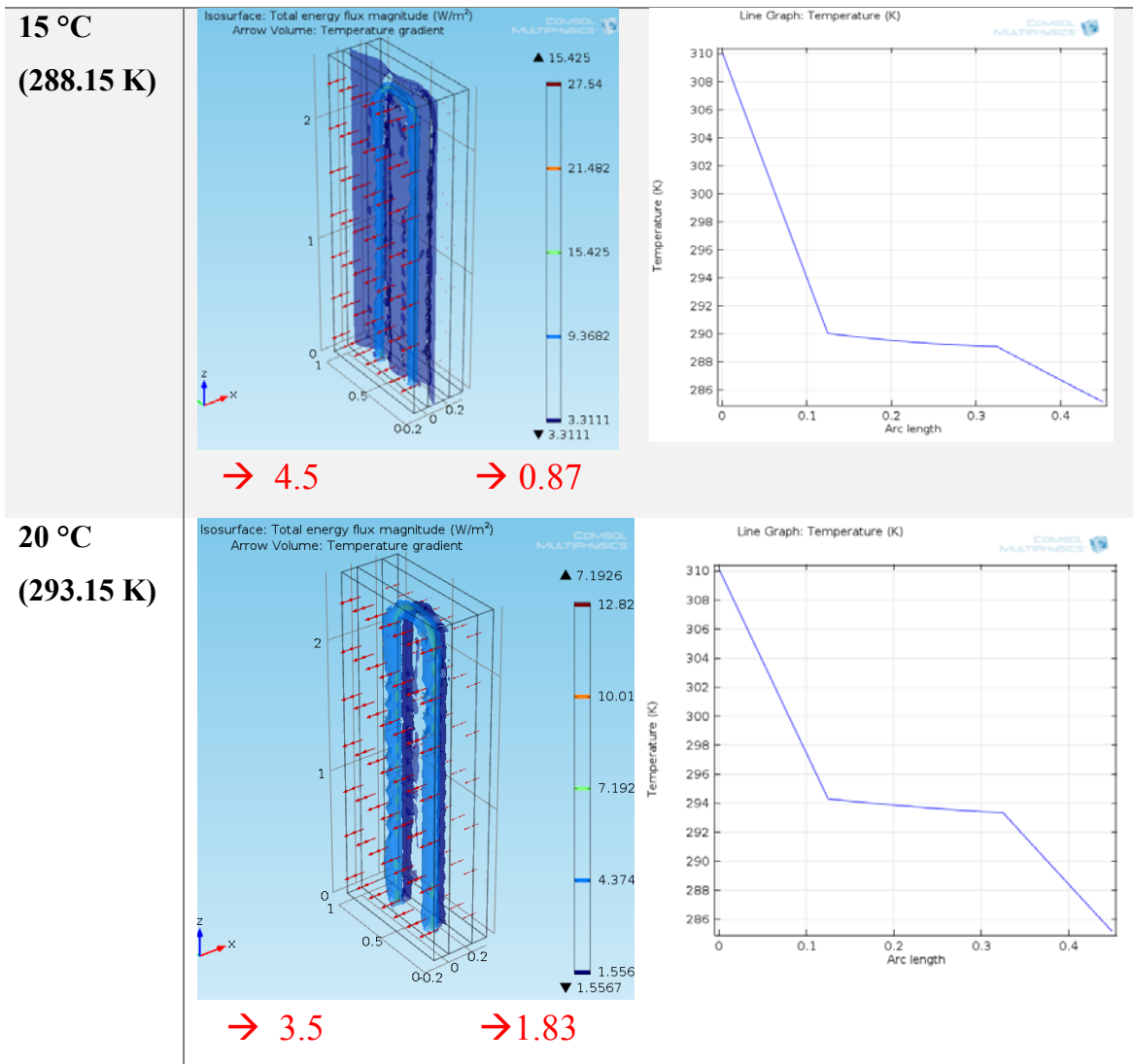
Es un gradiente de temperatura positivo asumiendo que $T_2 > T_1$.

B.1 Pruebas con temperatura interior igual a 37 °C (310.15 K).

1. CASO FRIO.

Temperatura exterior igual a 12 °C (285.15 K)

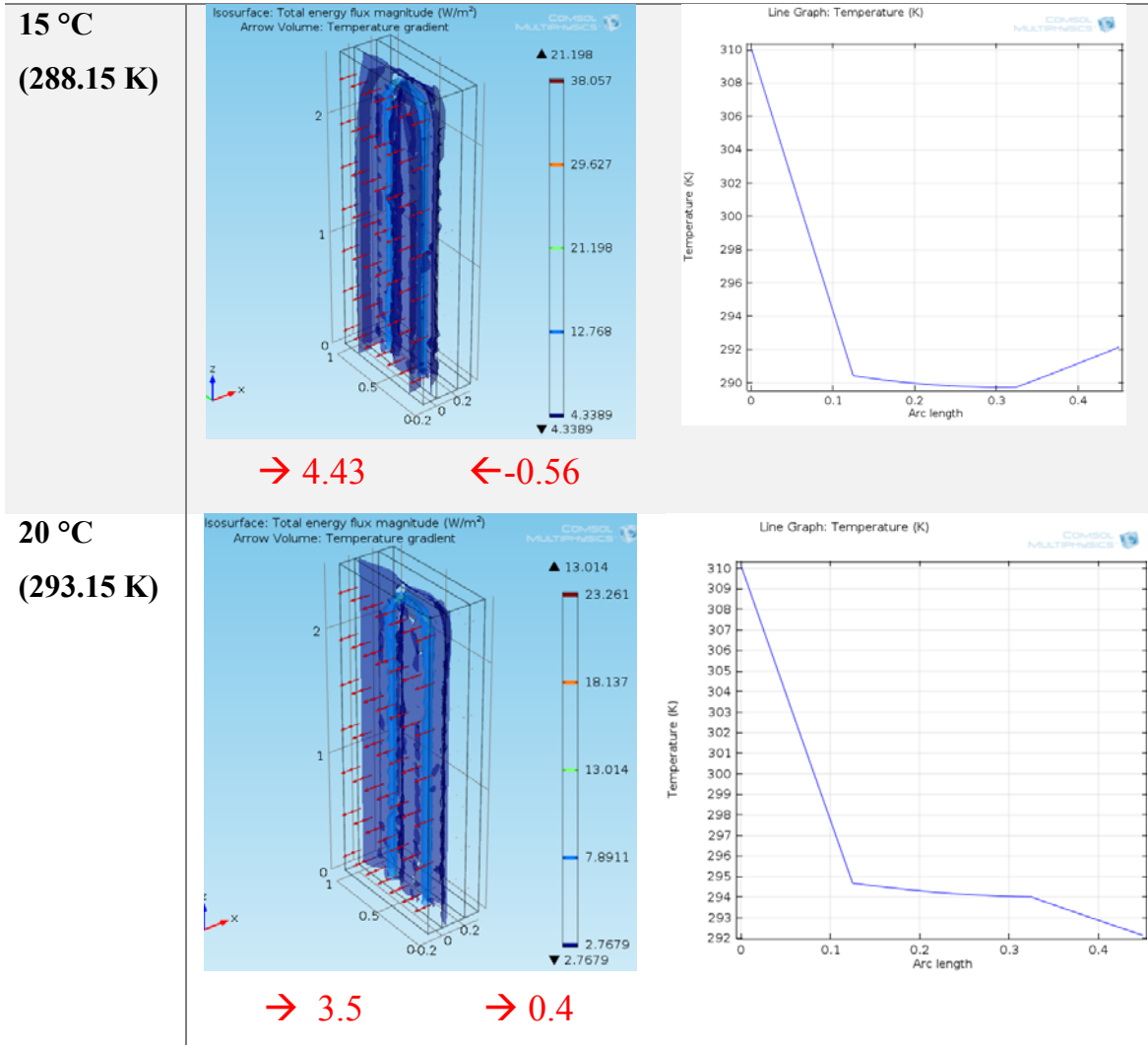
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA



2. CASO TEMPLADO.

Temperatura exterior igual a 19 °C (292.15 K)

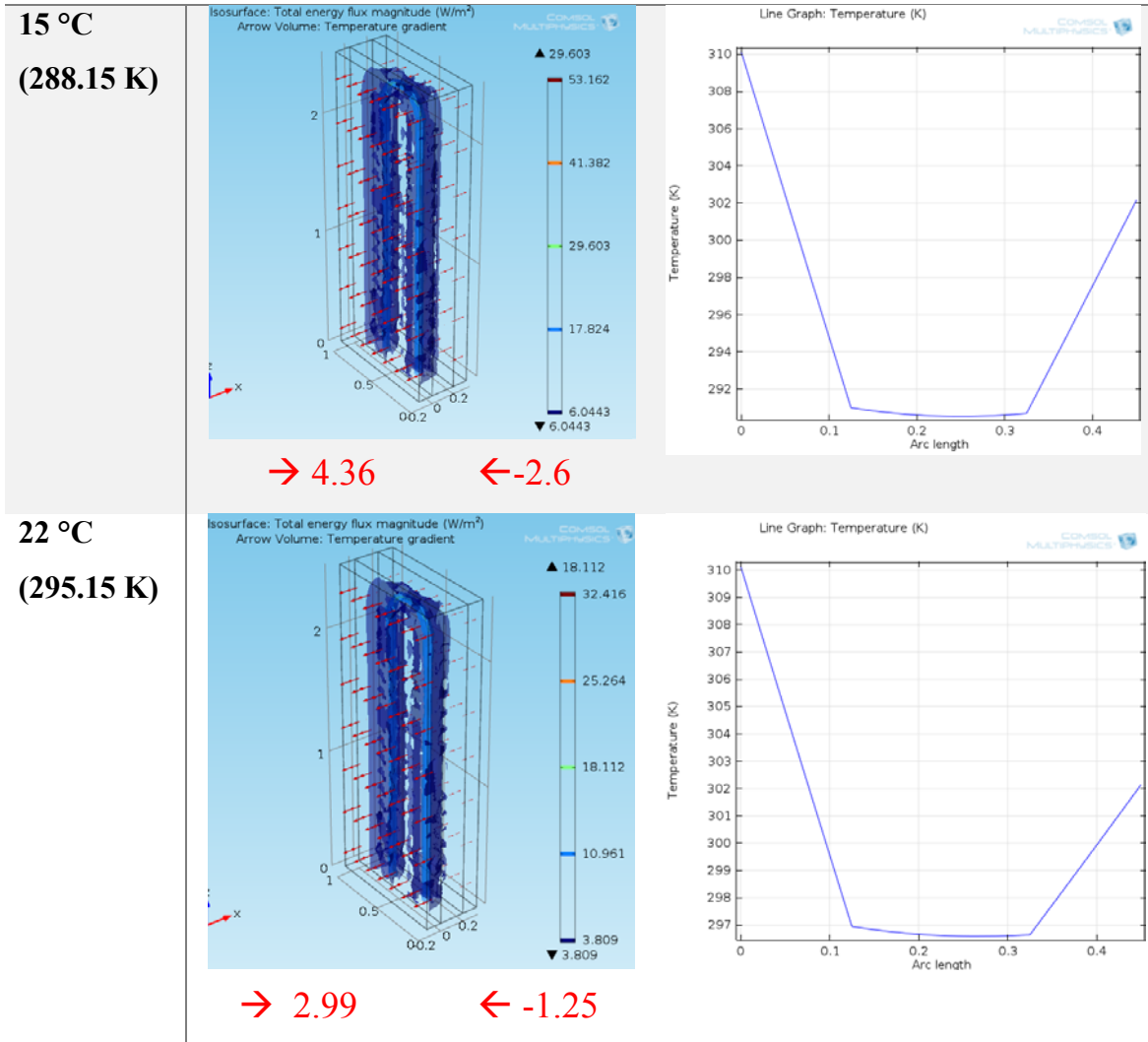
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA



3. CASO CALOR.

Temperatura exterior igual a 29 °C (302.15 K)

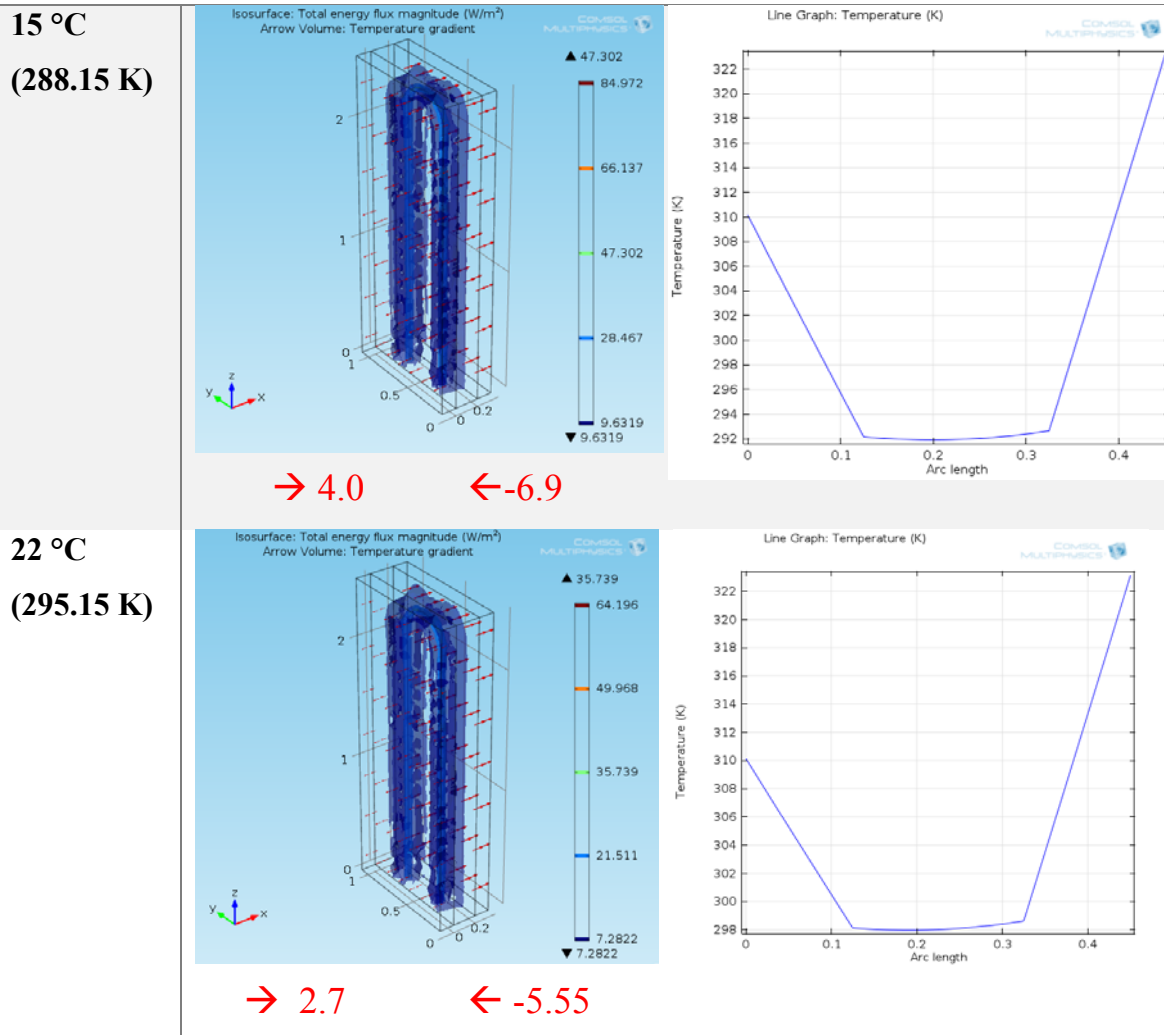
FLUJO DE CALOR (W/m^2) GRADIENTE DE TEMPERATURA



4. CASO CALOR EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 50 °C (323.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

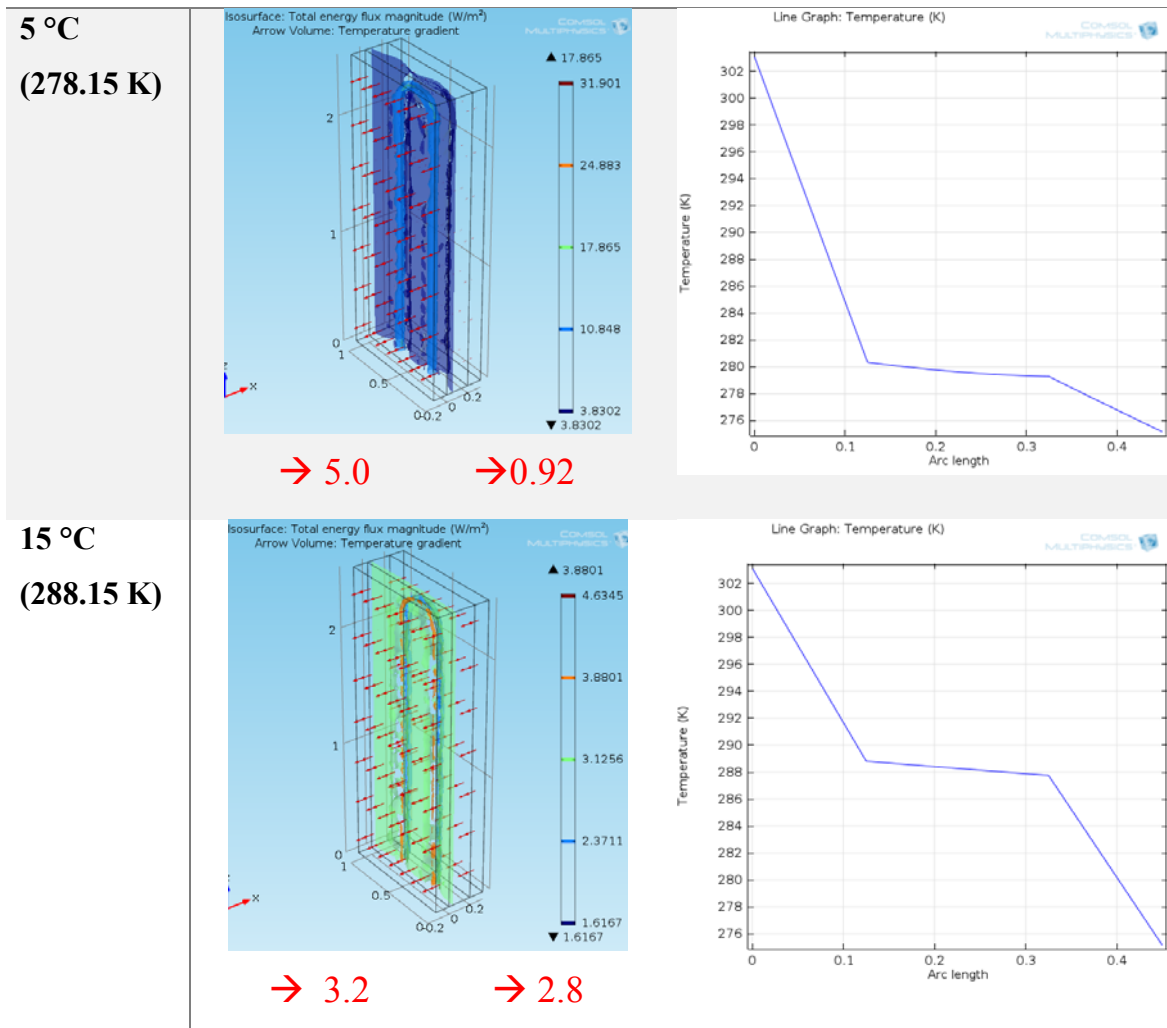


B.2 Pruebas con temperatura interior igual a 30 °C (303.15 K).

1. CASO FRIO EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 2 °C (275.15 K)

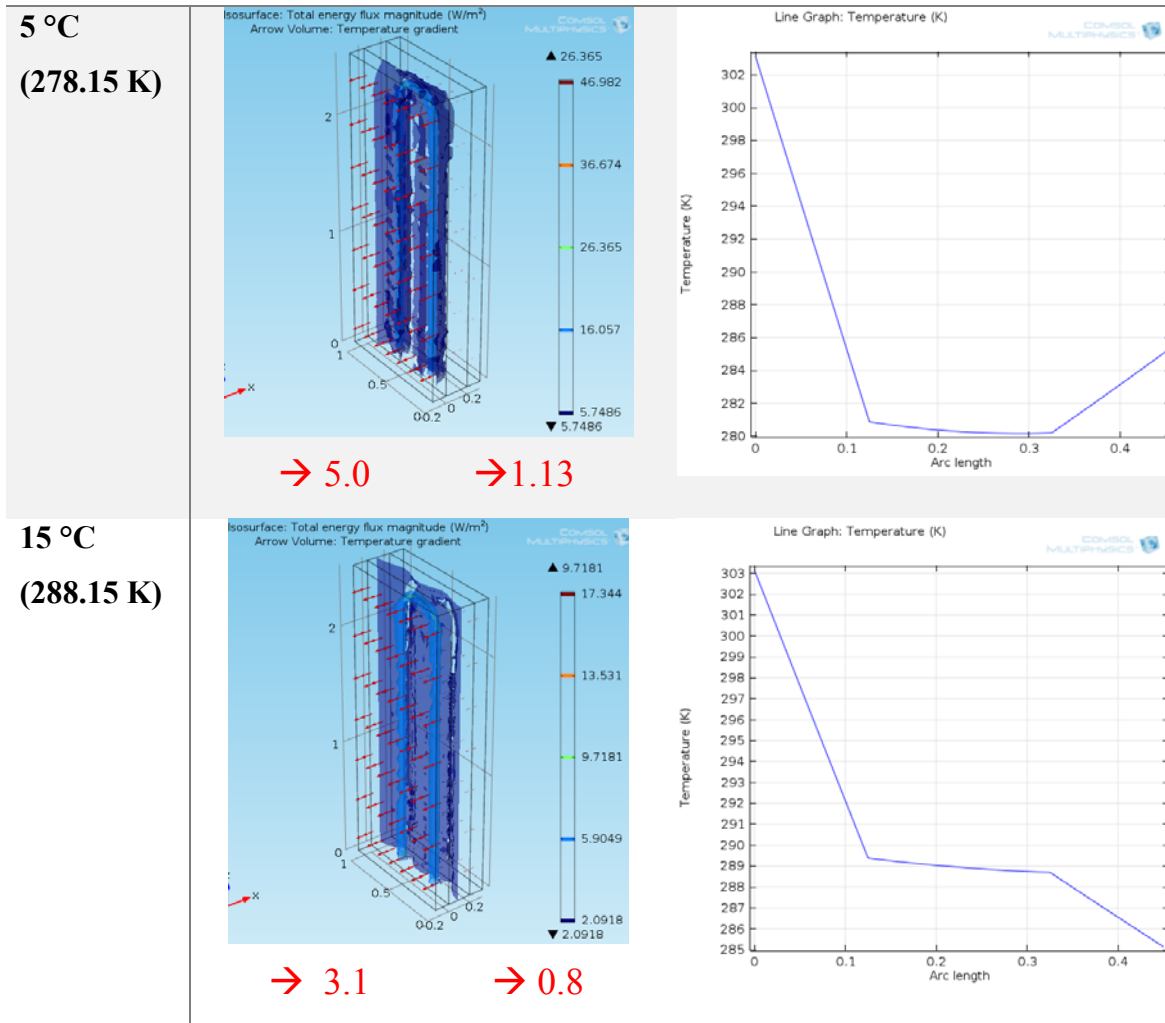
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA



2. CASO FRIO.

Temperatura exterior igual a 12 °C (285.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

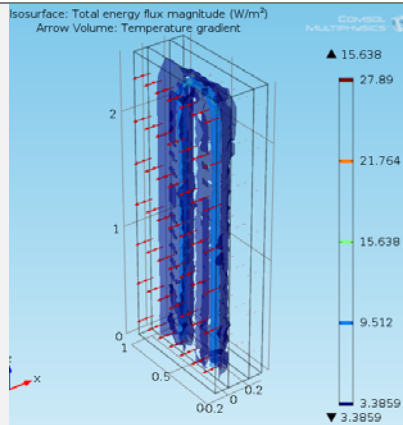


2. CASO TEMPLADO.

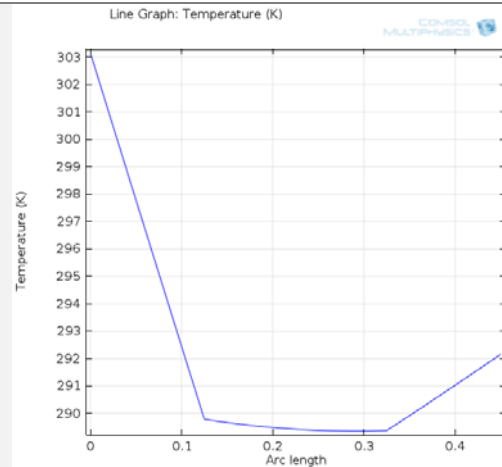
Temperatura exterior igual a 19 °C (292.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

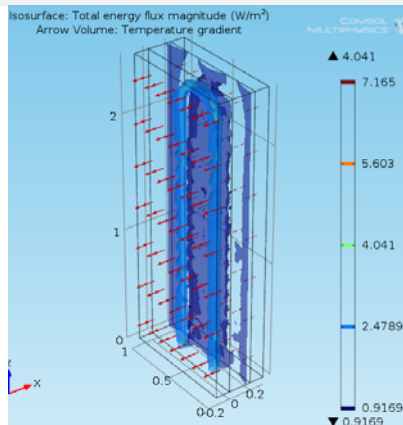
**15 °C
(278.15 K)**



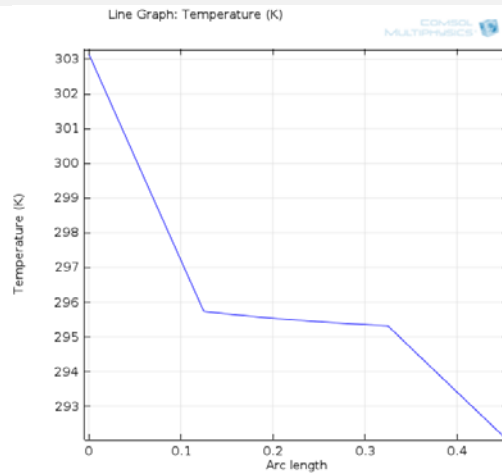
→ 3.0 ← -0.64



**22 °C
(295.15 K)**



→ 1.67 → 0.7

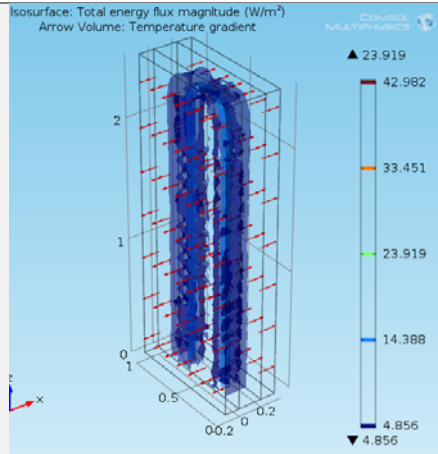


3. CASO CALOR.

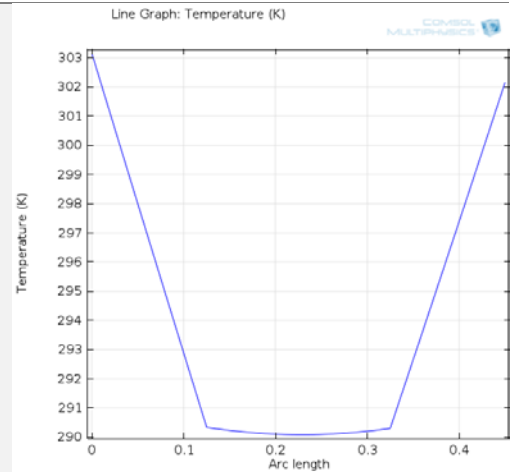
Temperatura exterior igual a 29 °C (302.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

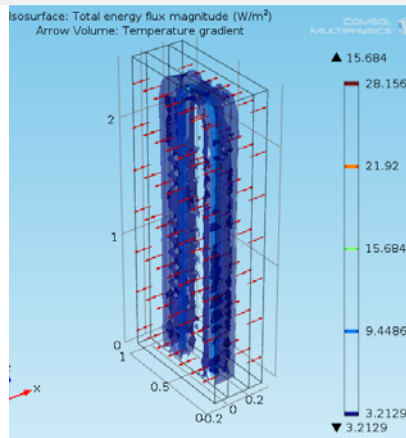
**15 °C
(278.15 K)**



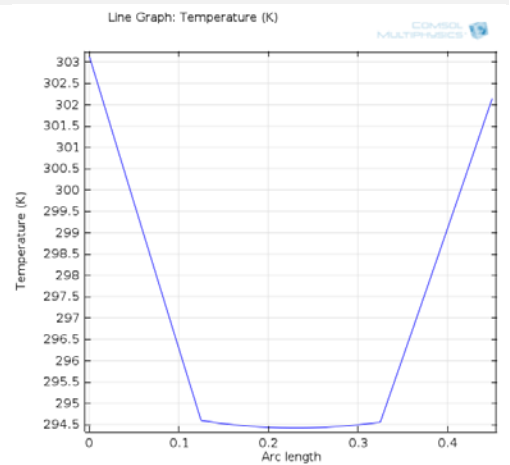
→ 2.89 ← -2.7



**22 °C
(295.15 K)**



→ 1.95 ← -1.72

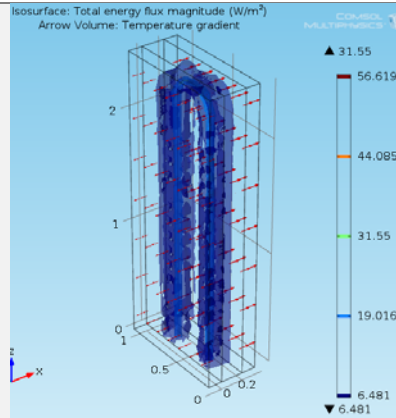


4. CASO CALOR EXTREMO.

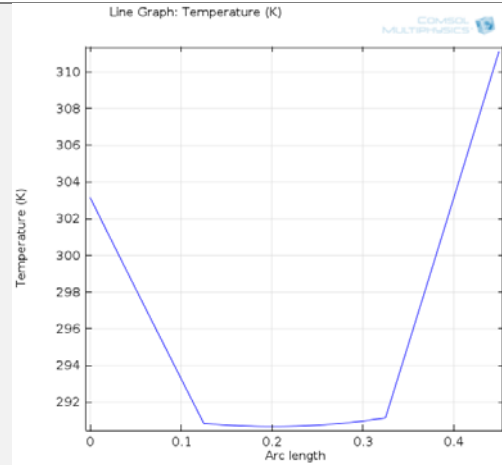
Temperatura exterior igual a 38 °C (311.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

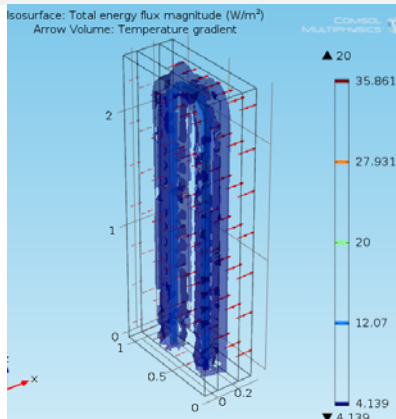
**15 °C
(278.15 K)**



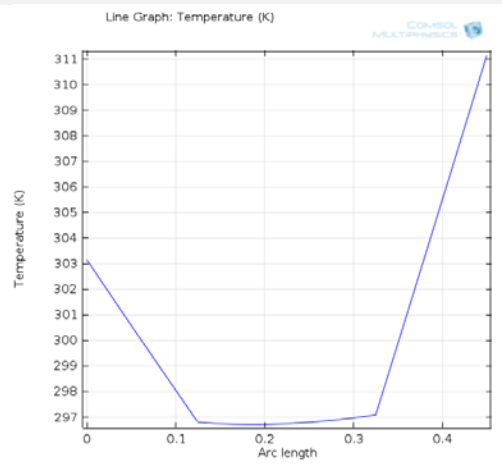
→ 2.8 ← -4.5



**22 °C
(295.15 K)**



→ 1.46 ← -3.2

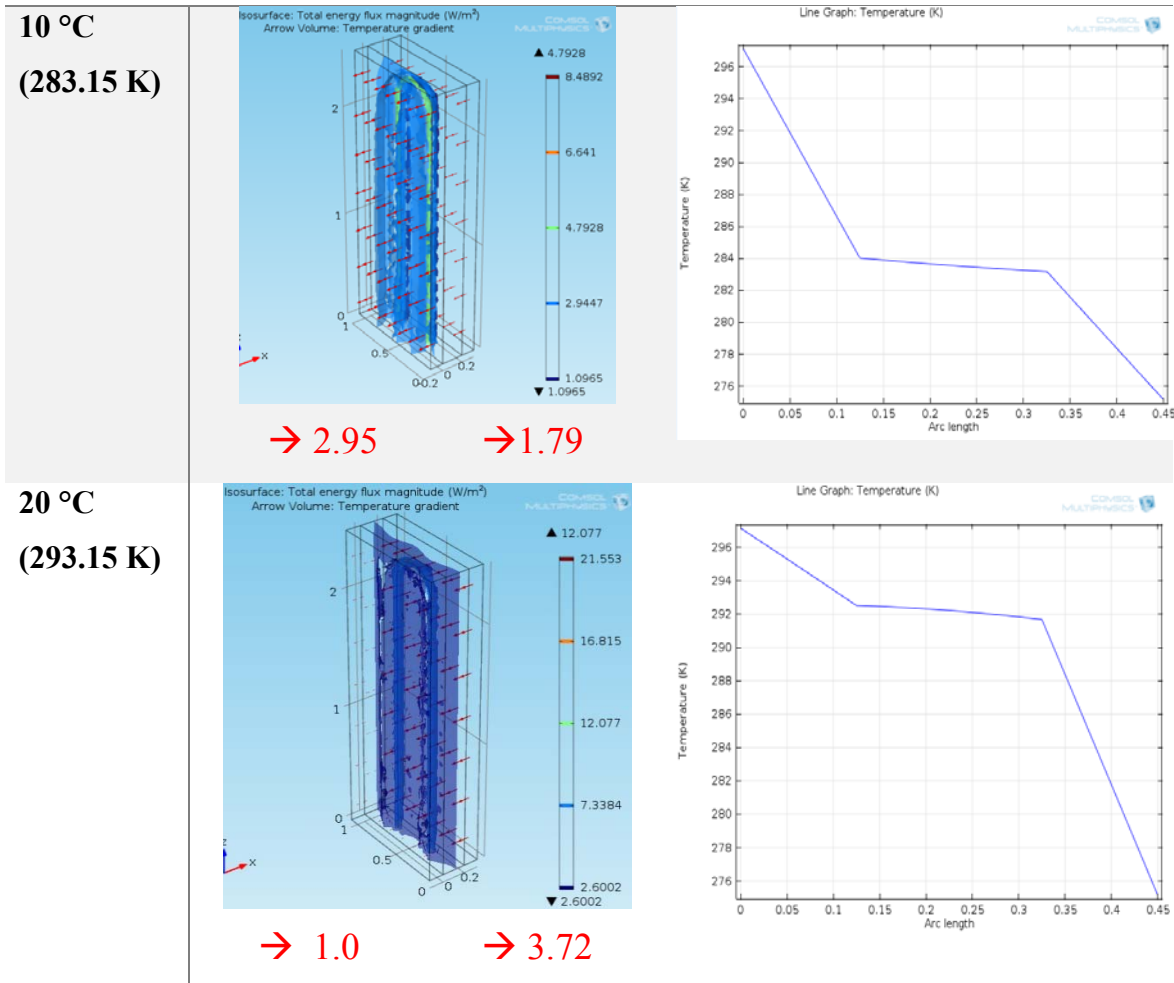


B.3 Pruebas con temperatura interior igual a 24 °C (297.15 K).

1. CASO FRIO EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 2 °C (275.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

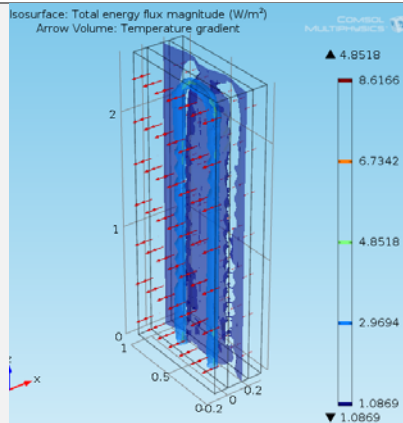


2. CASO FRIO.

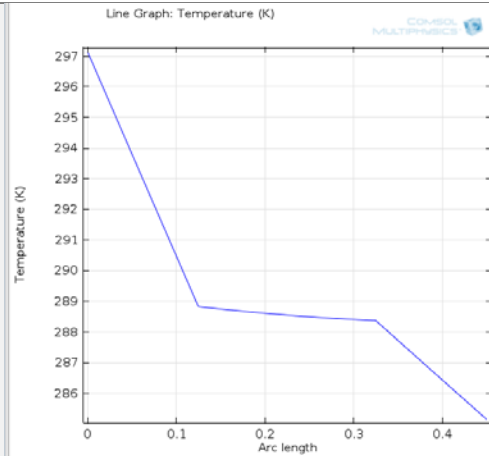
Temperatura exterior igual a 12 °C (285.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

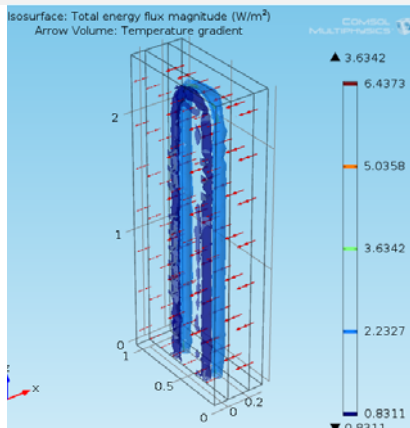
**15 °C
(288.15 K)**



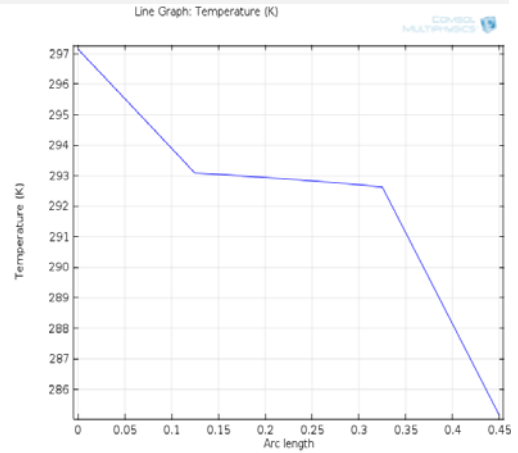
→ 1.87 → 0.72



**20 °C
(293.15 K)**



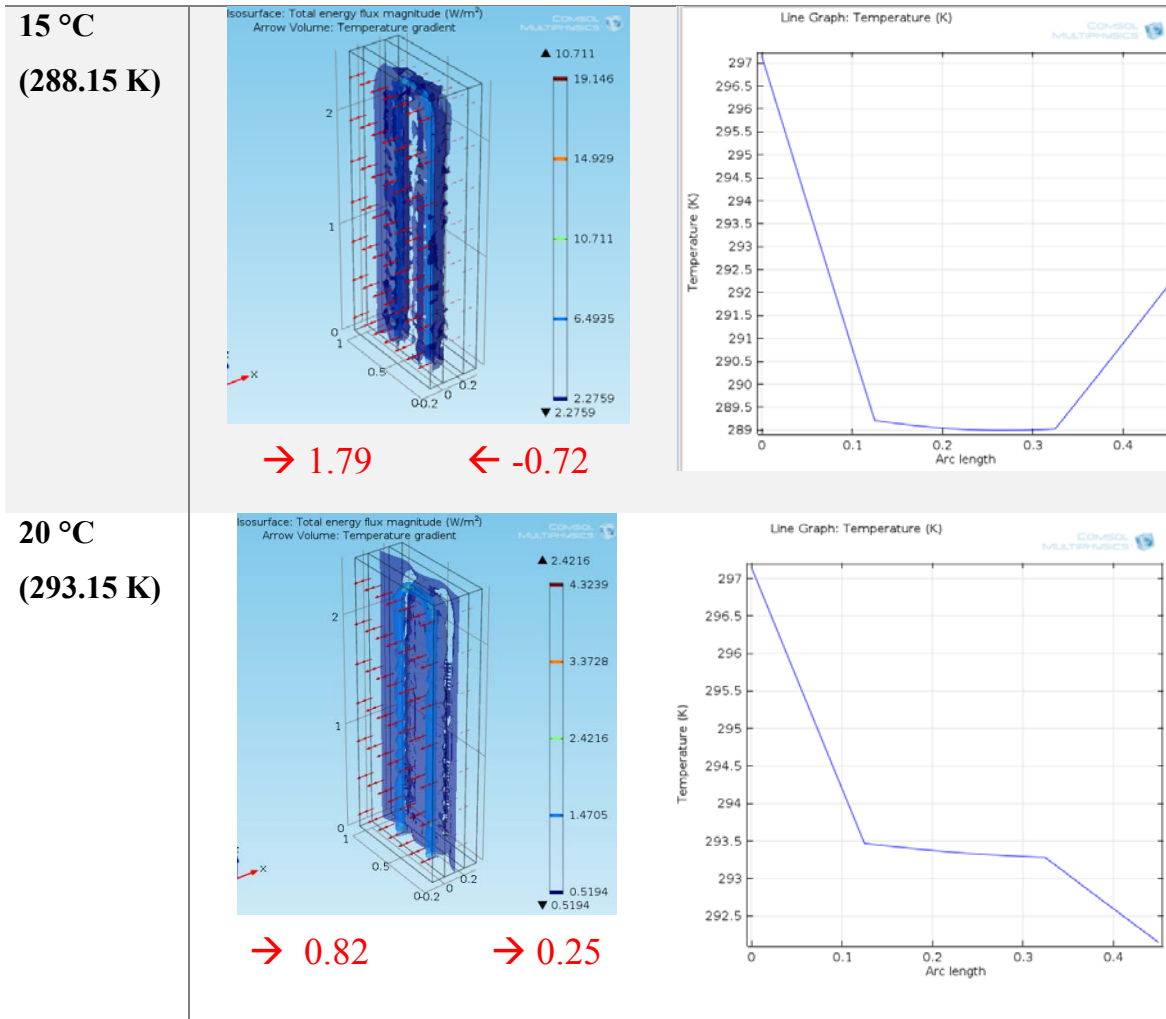
→ 0.9 → 1.68



3. CASO TEMPLADO.

Temperatura exterior igual a 19 °C (292.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

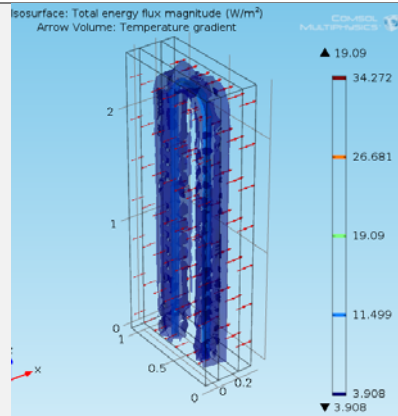


4. CASO CALOR.

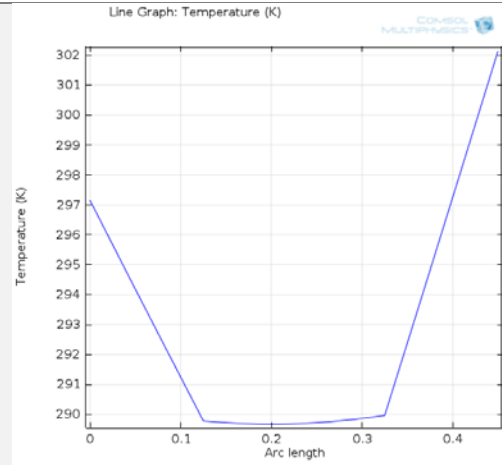
Temperatura exterior igual a 29 °C (302.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

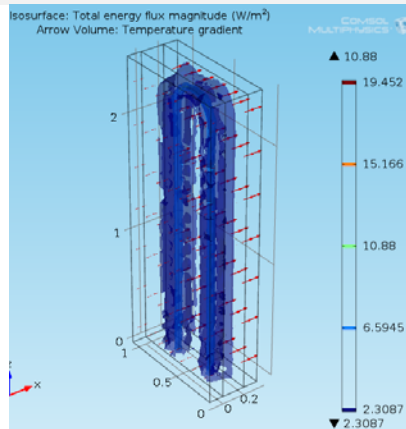
**15 °C
(288.15 K)**



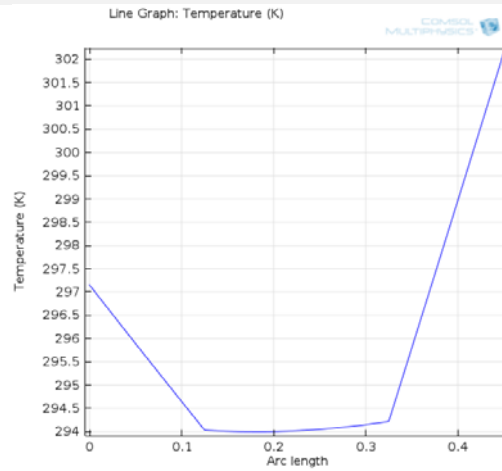
→ 1.6 ← -2.7



**20 °C
(293.15 K)**



→ 0.71 ← -1.8

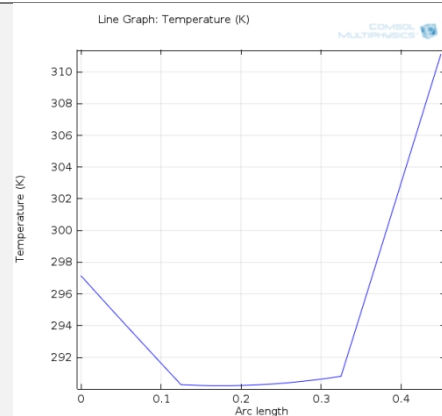
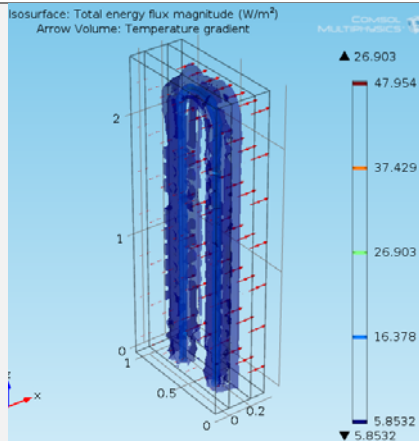


5. CASO CALOR EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 38 °C (311.15 K)

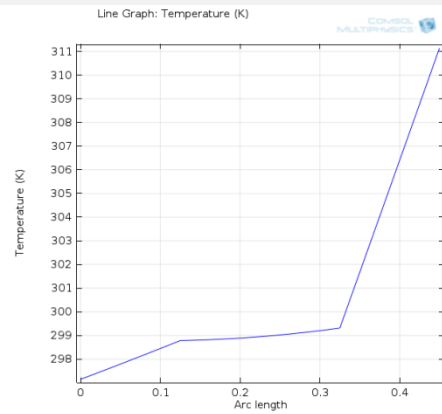
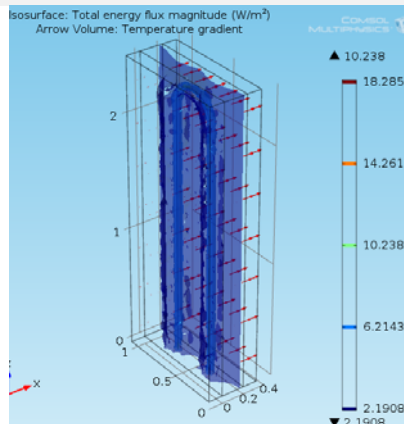
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

**15 °C
(288.15 K)**



→ 1.5 ← -4.5

**25 °C
(298.15 K)**



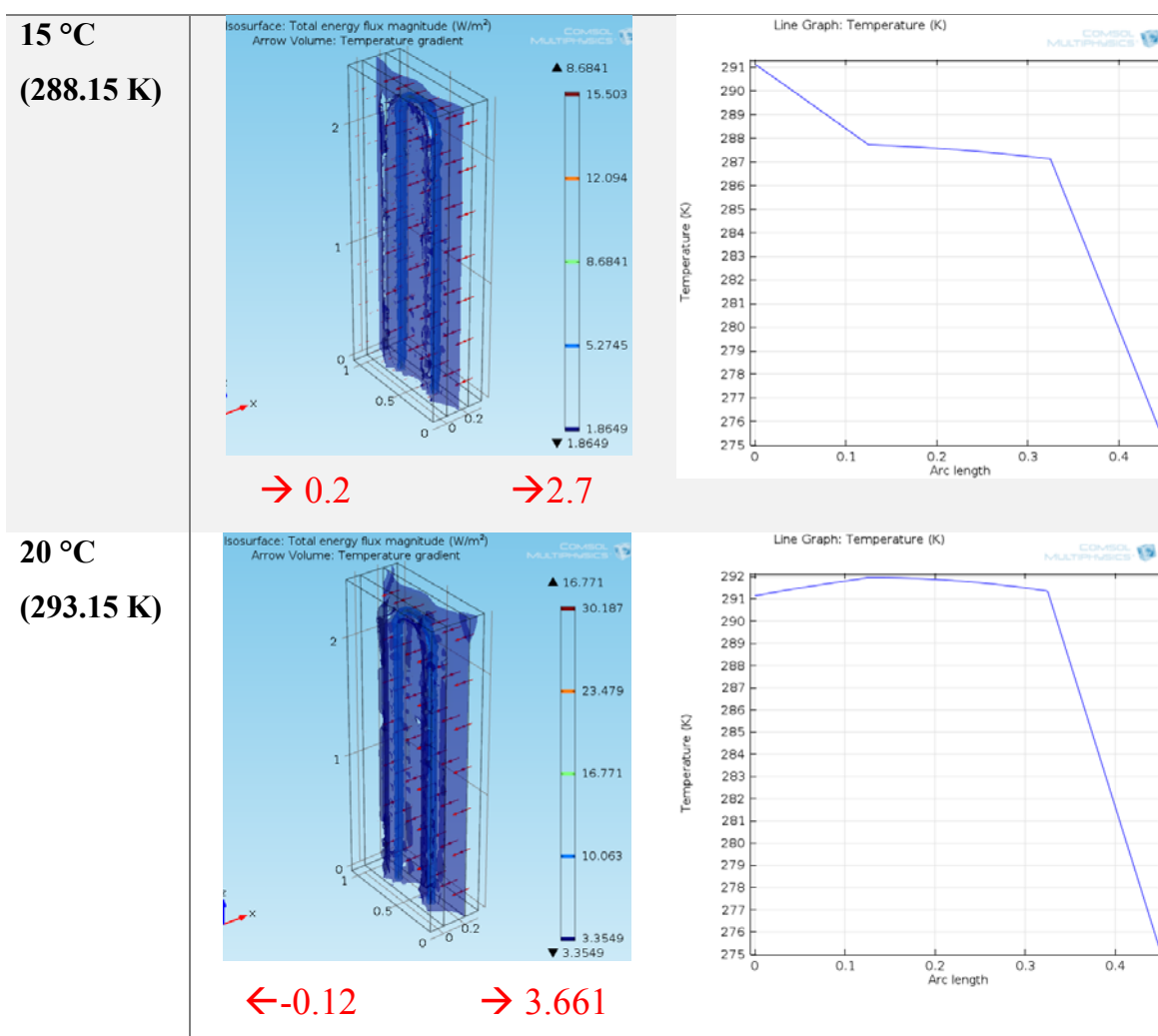
← -0.34 ← -2.7

B.4 Pruebas con temperatura interior igual a 18 °C (291.15 K).

1. CASO FRIO EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 2 °C (275.15 K)

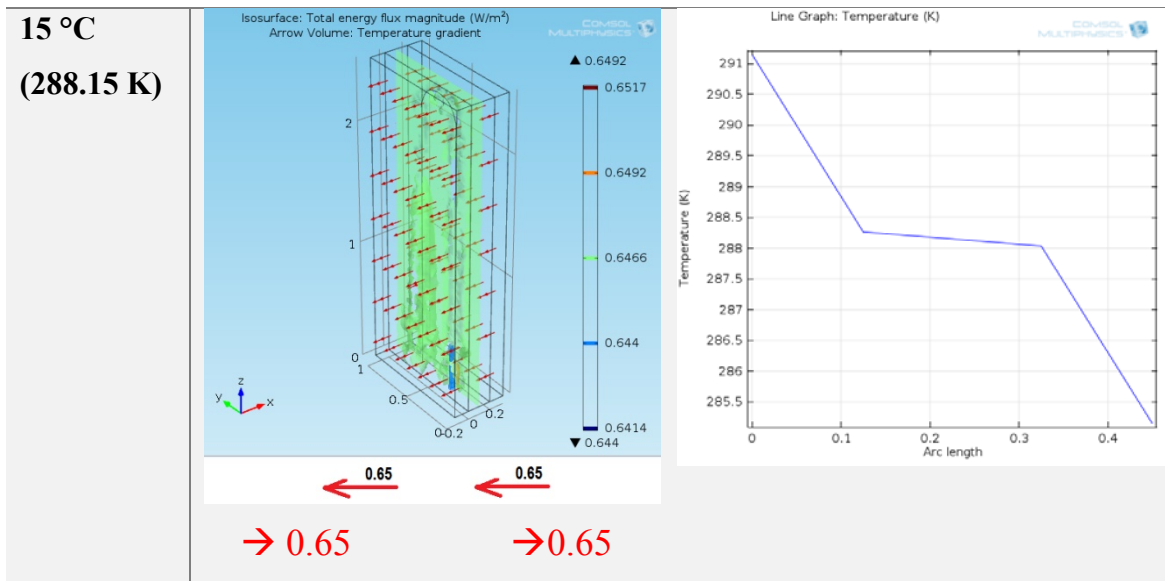
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA



2. CASO FRIO.

Temperatura exterior igual a 12 °C (285.15 K)

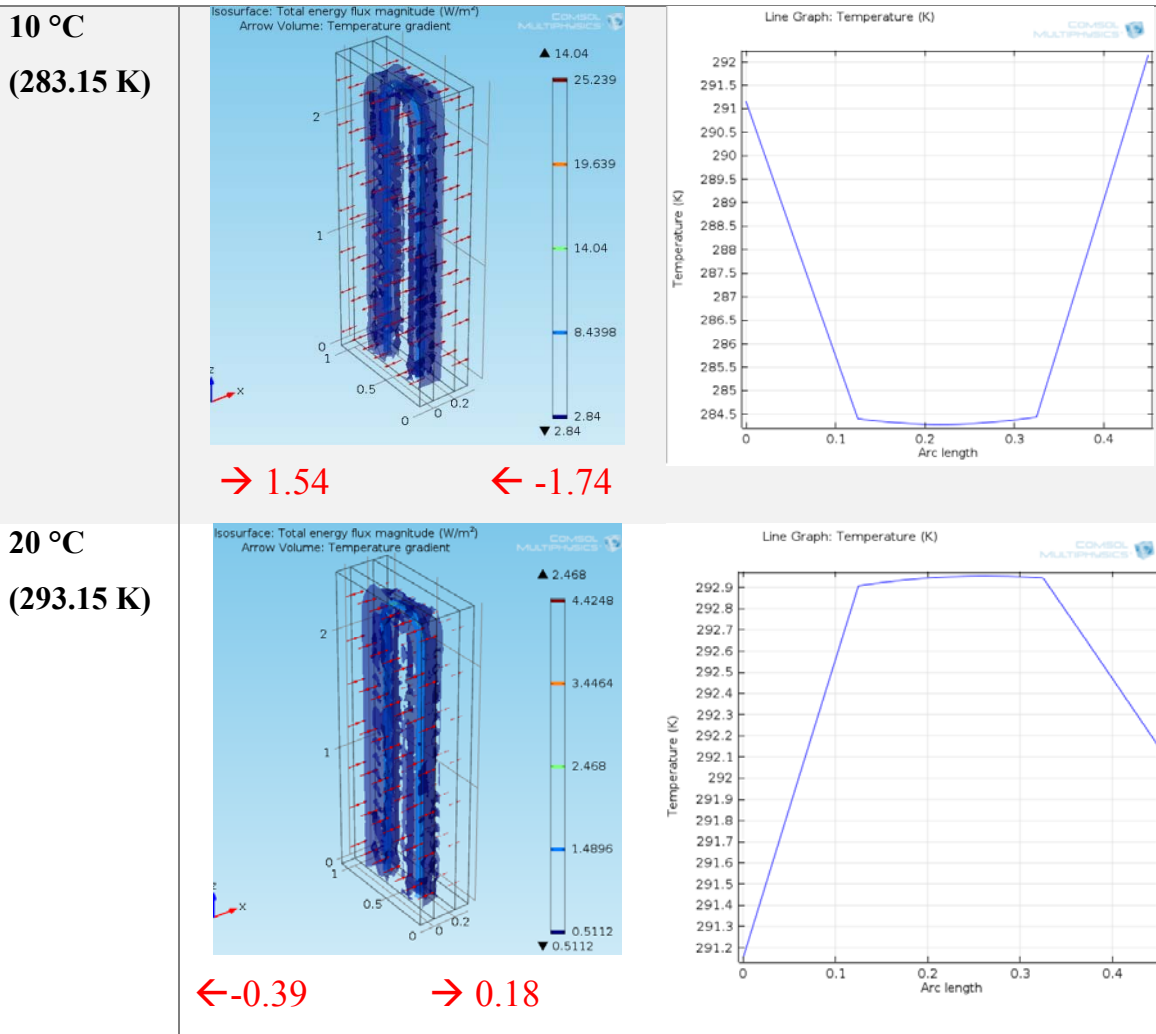
BTD **FLUJO DE CALOR (W/m^2)** **GRADIENTE DE TEMPERATURA**



3. CASO TEMPLADO.

Temperatura exterior igual a 19 °C (292.15 K)

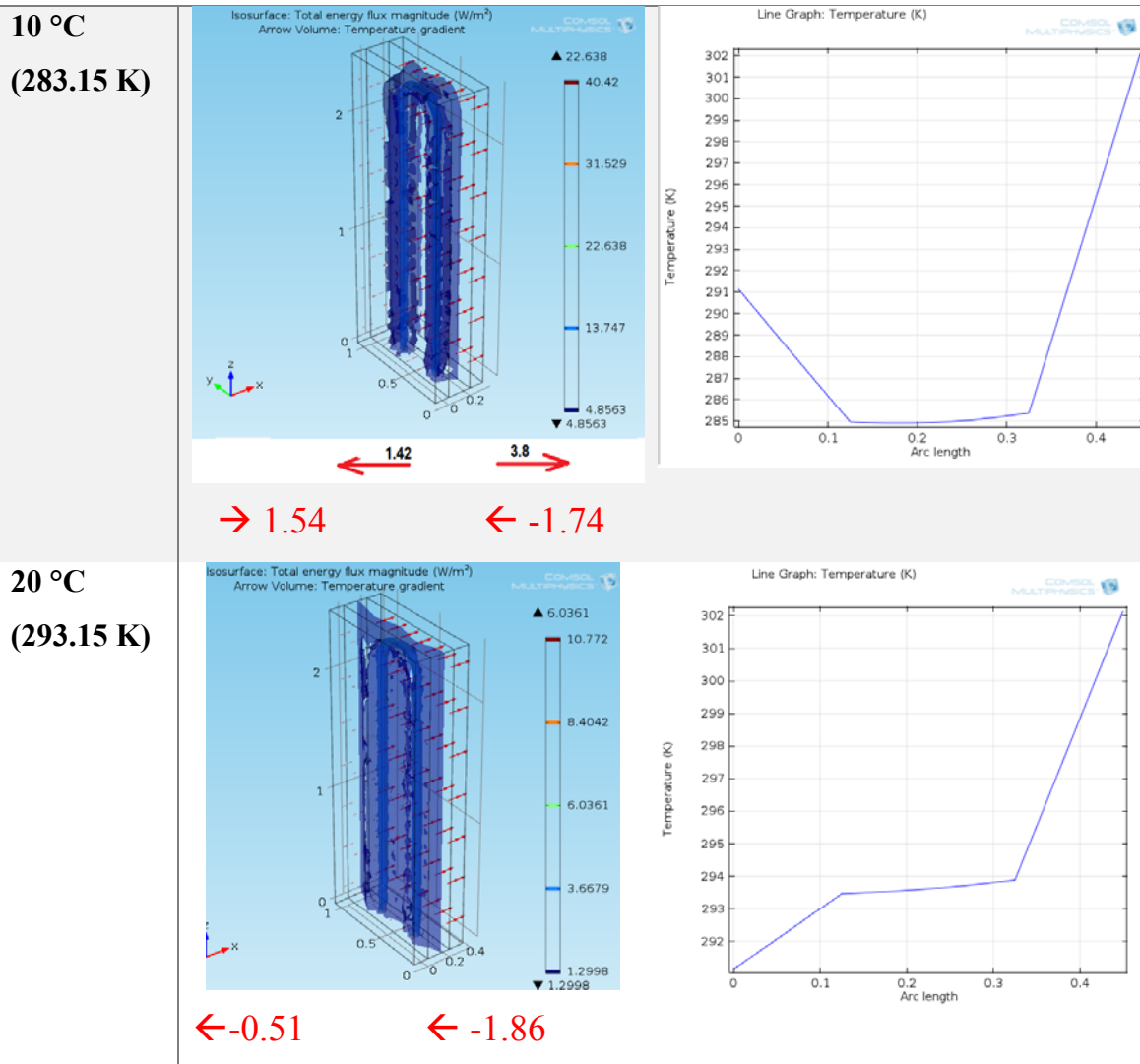
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA



4. CASO CALOR.

Temperatura exterior igual a 29 °C (292.15 K)

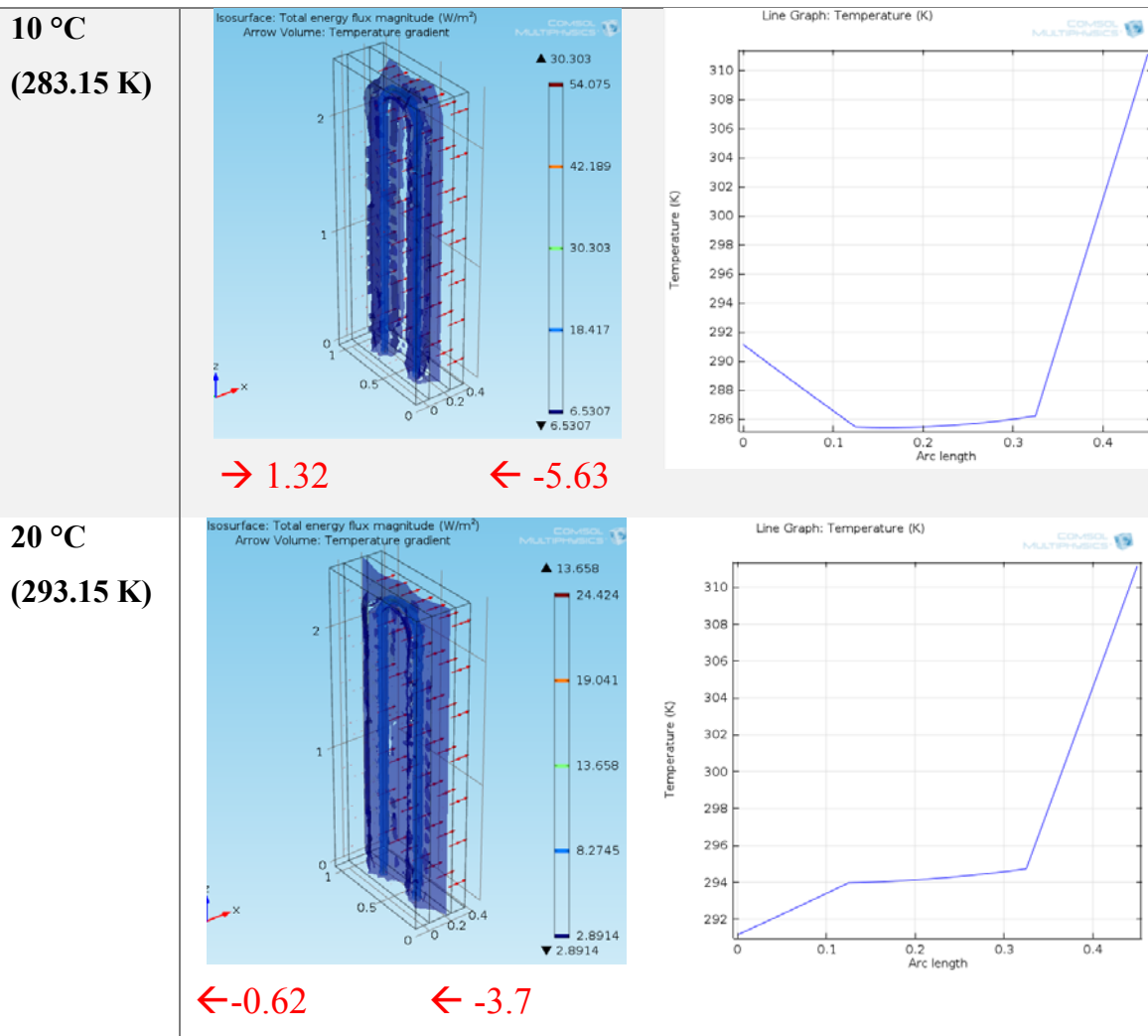
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA



5. CASO CALOR EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 38 °C (311.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

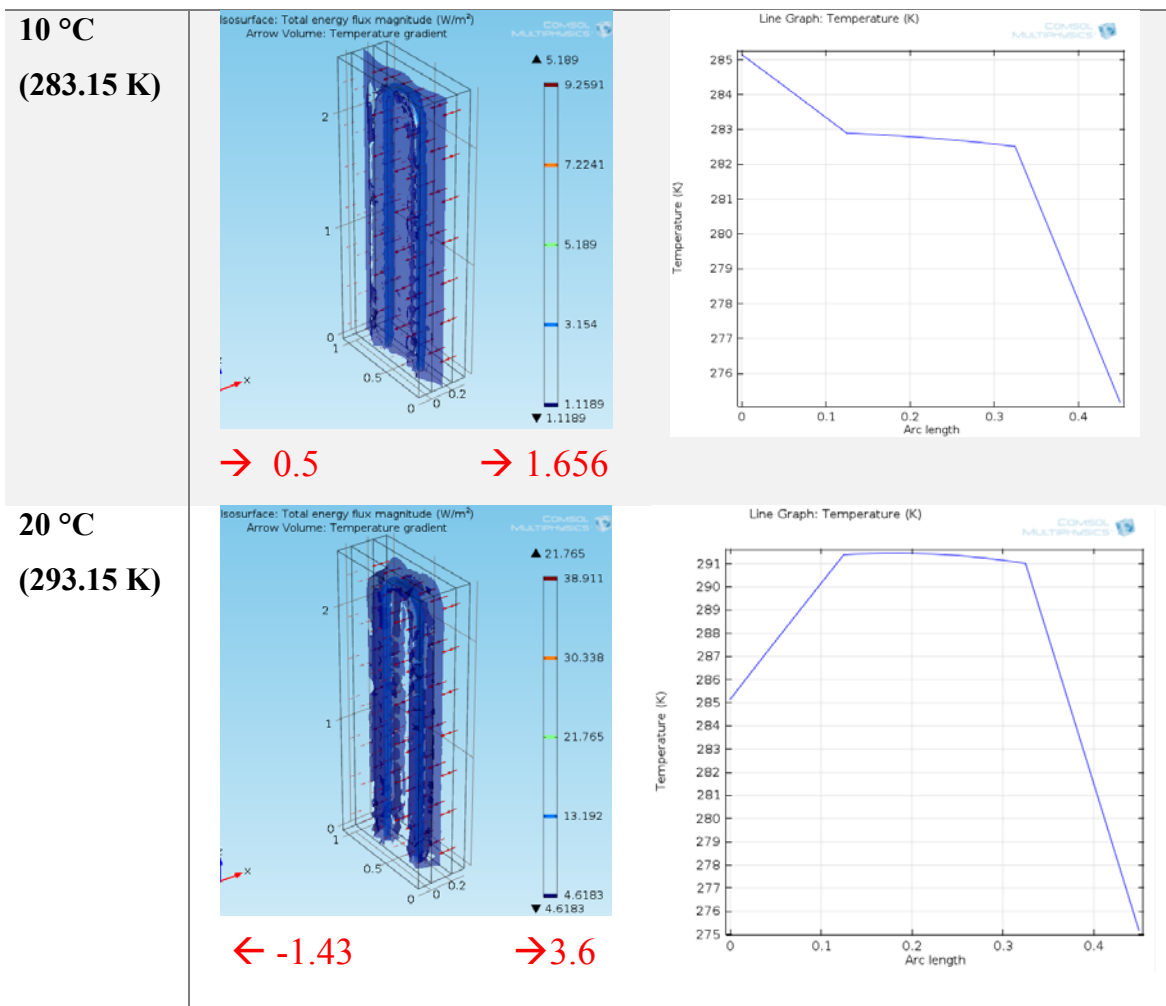


B.5 Pruebas con temperatura interior igual a 12 °C (285.15 K).

1. CASO FRIO EXTREMO.

Temperatura exterior igual a 2 °C (275.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

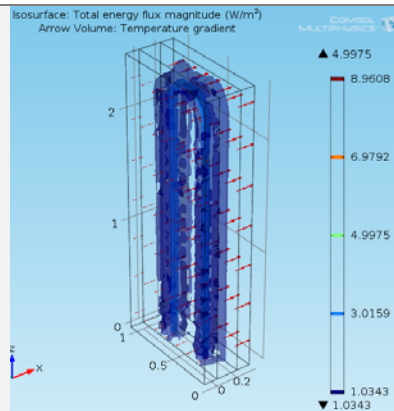


2. CASO FRIO.

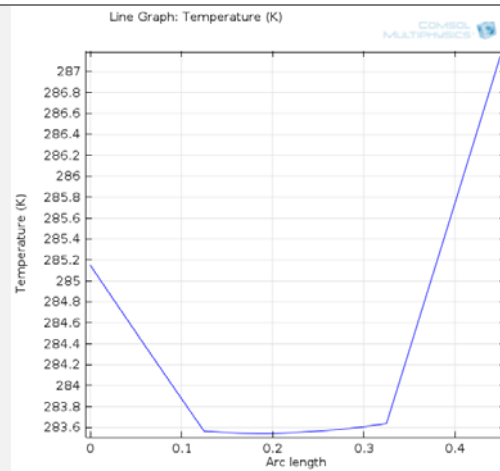
Temperatura exterior igual a 14 °C (283.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

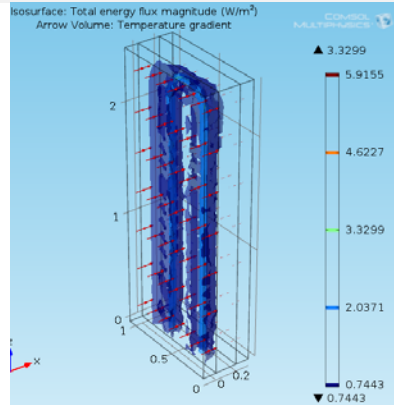
**10 °C
(283.15 K)**



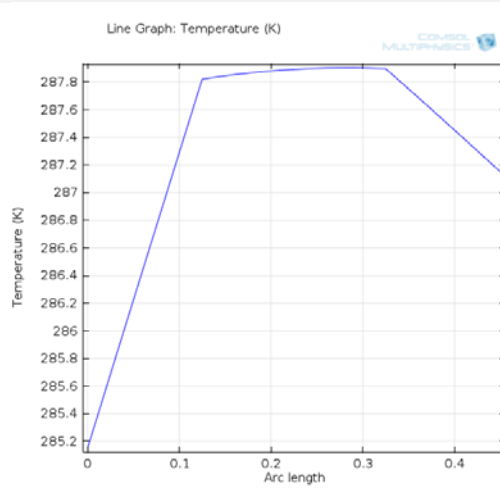
→ 0.361 ← -0.8



**15 °C
(288.15 K)**



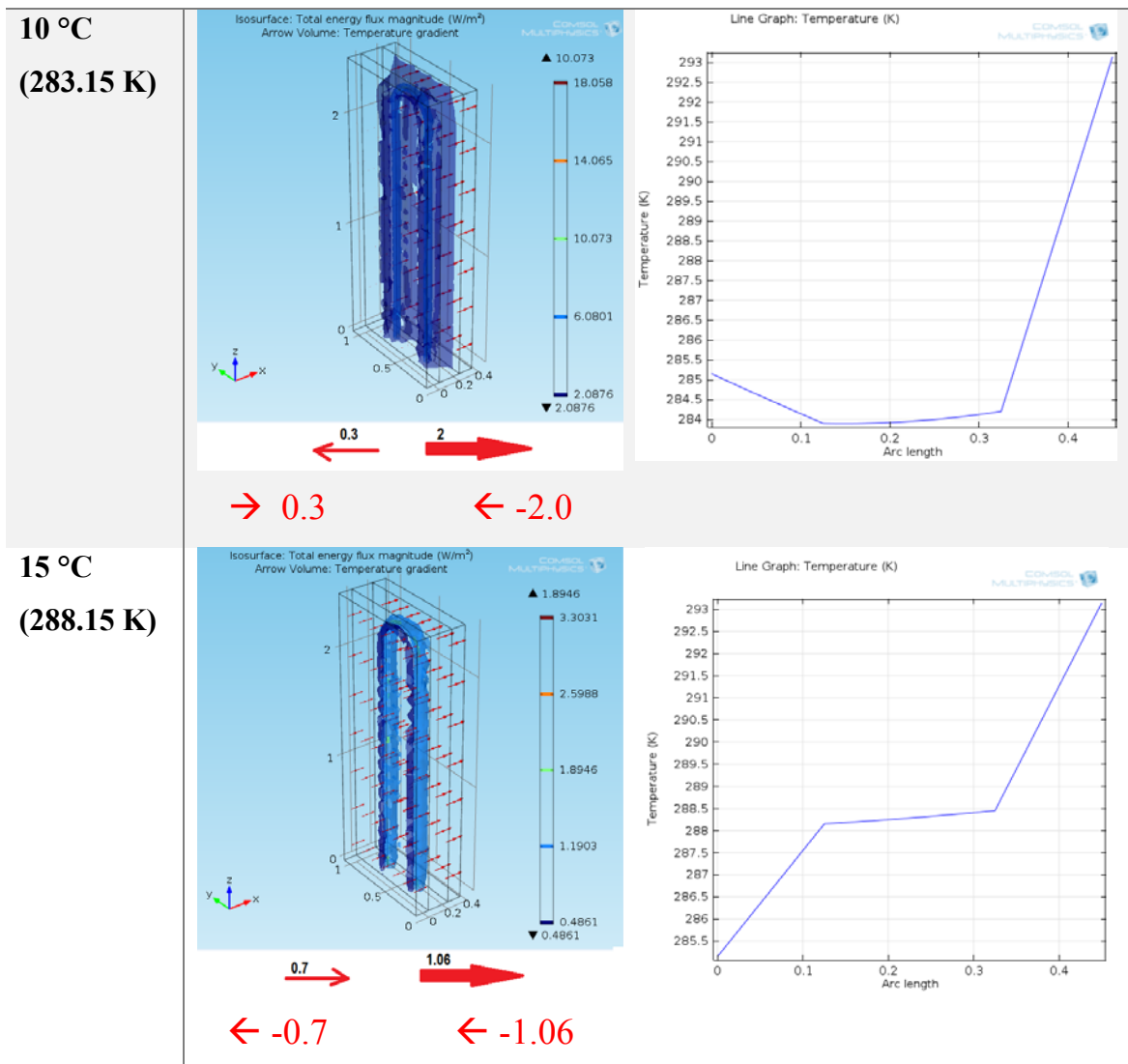
← -0.61 → 0.173



3. CASO TEMPLADO.

Temperatura exterior igual a 20 °C (293.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

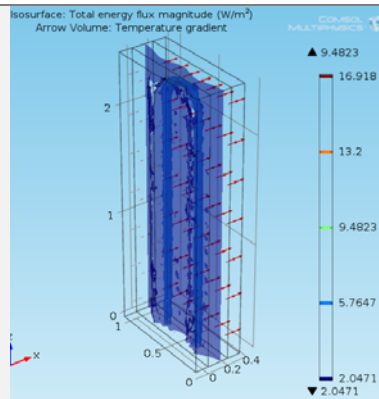


4. CASO CALOR.

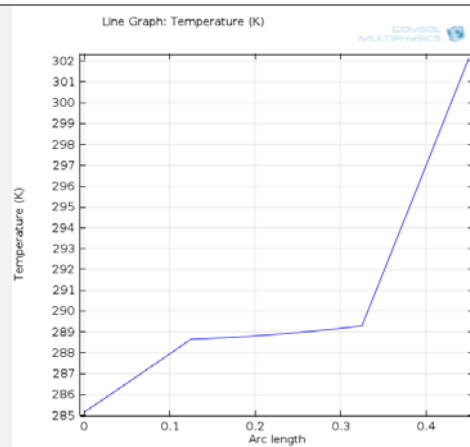
Temperatura exterior igual a 29 °C (302.15 K)

BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

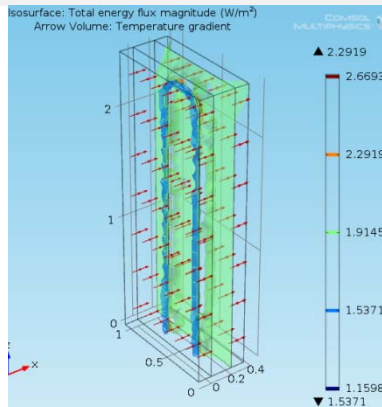
**15 °C
(288.15 K)**



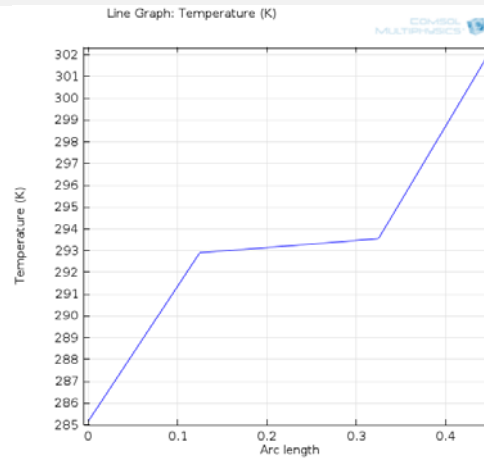
← -0.82 ← -2.9



**20 °C
(293.15 K)**



← -1.74 ← -1.93

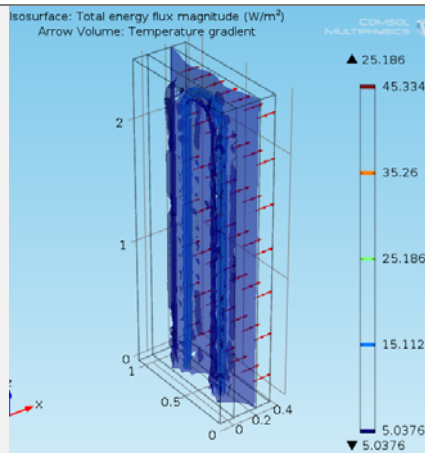


5. CASO CALOR EXTREMO

Temperatura exterior igual a 38 °C (311.15 K)

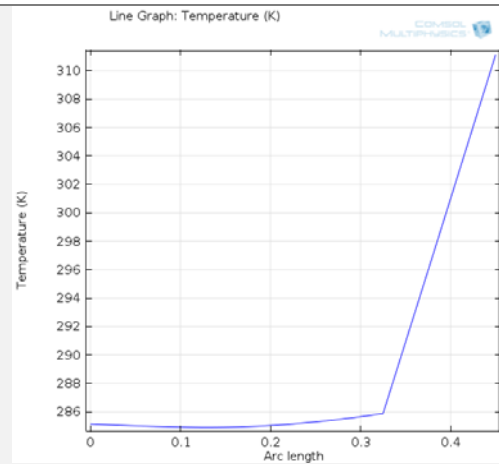
BTD FLUJO DE CALOR (W/m²) GRADIENTE DE TEMPERATURA

**10 °C
(283.15 K)**

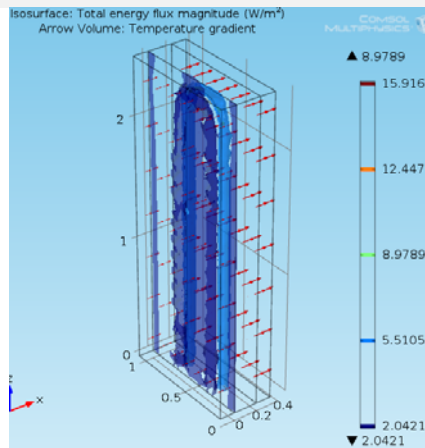


← -0.1

← -5.7

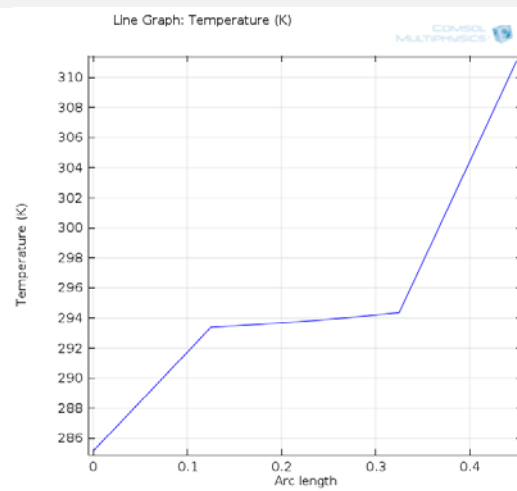


**20 °C
(293.15 K)**



← -1.85

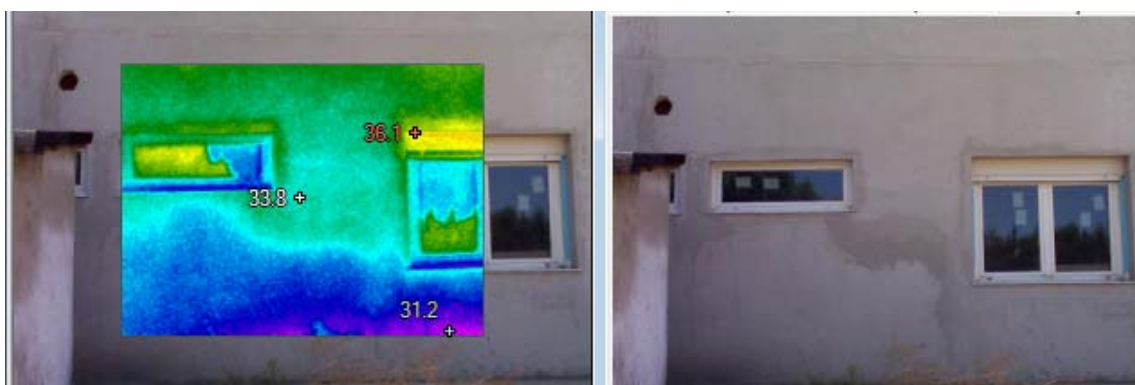
← -3.8



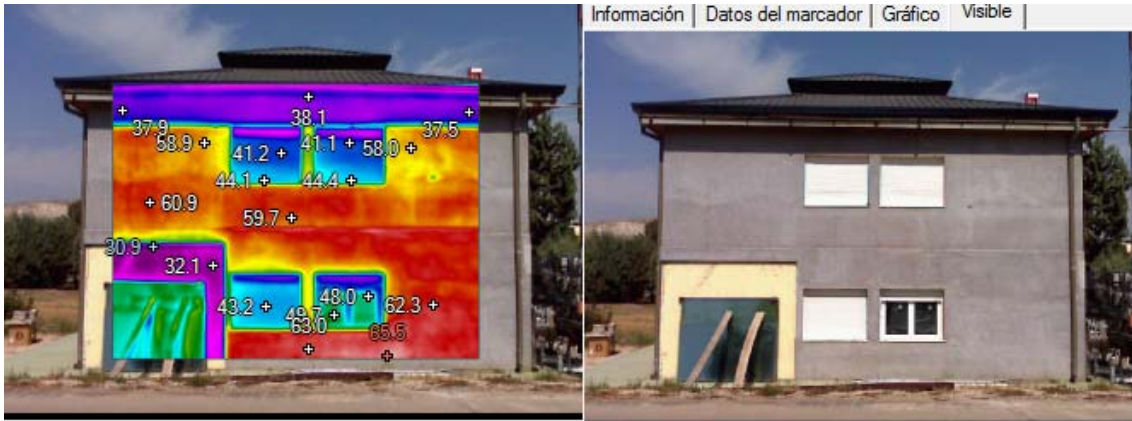
ANEXO C. ENVOLVENTE: USO DE CÁMARA TERMOGRÁFICA.

El uso de las cámaras termográficas es una herramienta útil que permite ver la distribución de la temperatura sobre los objetos. Esta herramienta en un edificio con la calefacción funcionando pueden detectar puentes térmicos y fallos de aislamiento.

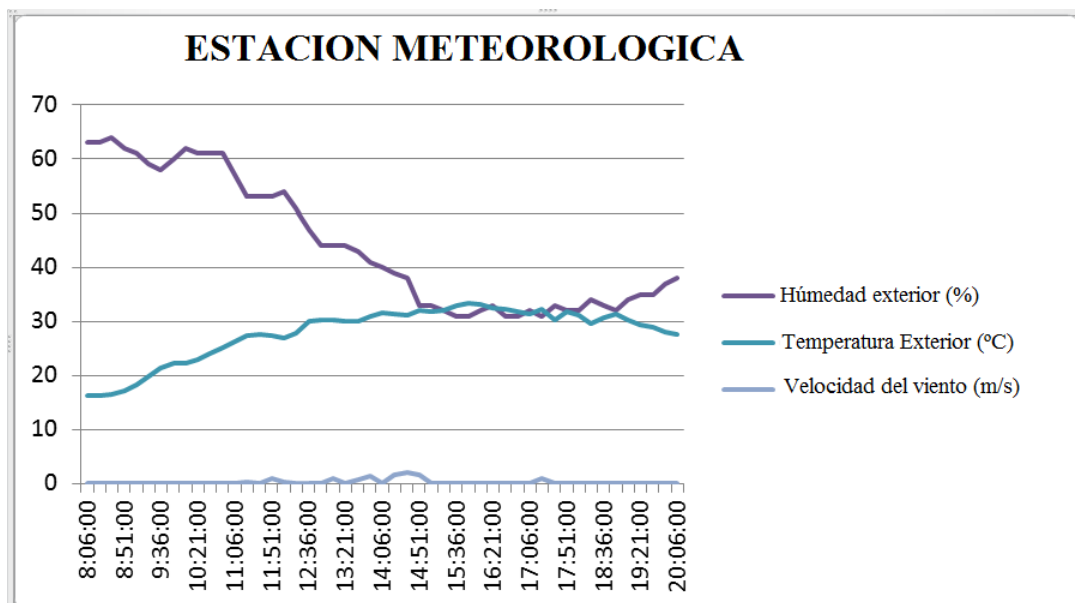
En esta parte es importante recordar que en este tipo de fotografías se encuentran dos conceptos fundamentales que tienen que ver con el calor emitido y reflejado, los cuales son complementarios y cuya suma nos da 1. El calor emitido es el del objeto y el reflejado proviene muchas veces de lo que se encuentra frente al objeto, como en el caso de los acristalamientos donde con un cierto ángulo de reflexión, en muchas ocasiones es incluso el mismo operador de la cámara termográfica. En la figura siguiente, se muestra un calor reflejado sobre los acristalamientos.

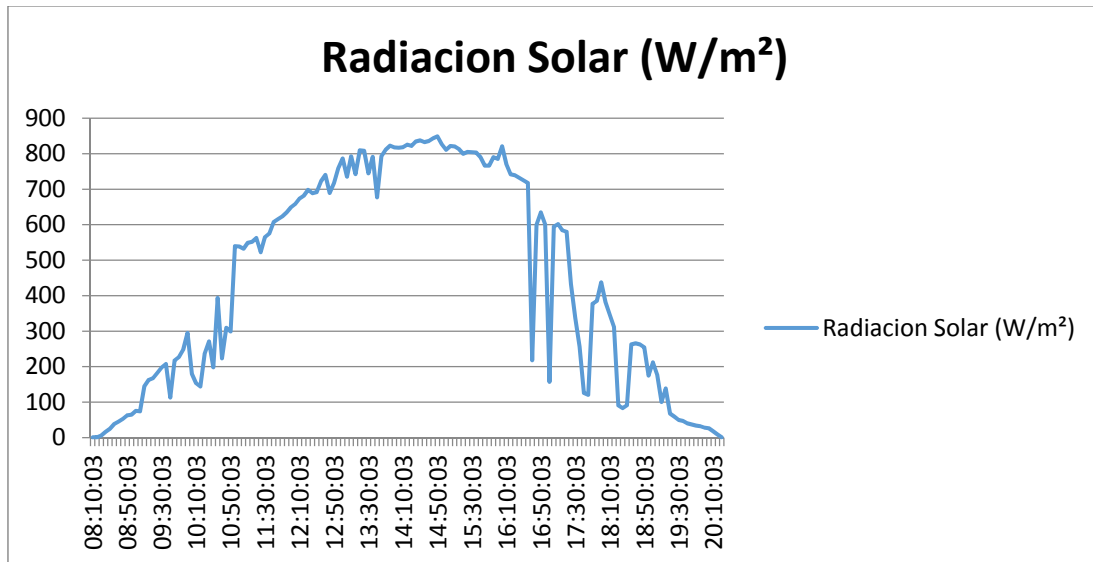


En la siguiente figura, se muestra una imagen termográfica de la cara sur de nuestro edificio tomada el 23 de septiembre del 2012 a las 13:33 horas. Podemos ver por ejemplo que en la parte central de la izquierda se da una temperatura menor que marca 30.9°C sobre otra al centro del muro con un valor de 59.7°C. La temperatura menor se da en la capa del aislante y en la que no se echó la última capa de acabado gris en la envolvente, entre una y otra hay cerca de 30°C de diferencia. Las diferencias existentes de temperatura nos llevan ***a concluir que se puede tratar una parte de la envolvente para que en determinadas épocas del año puede usarse también como elemento de captación de energía.***

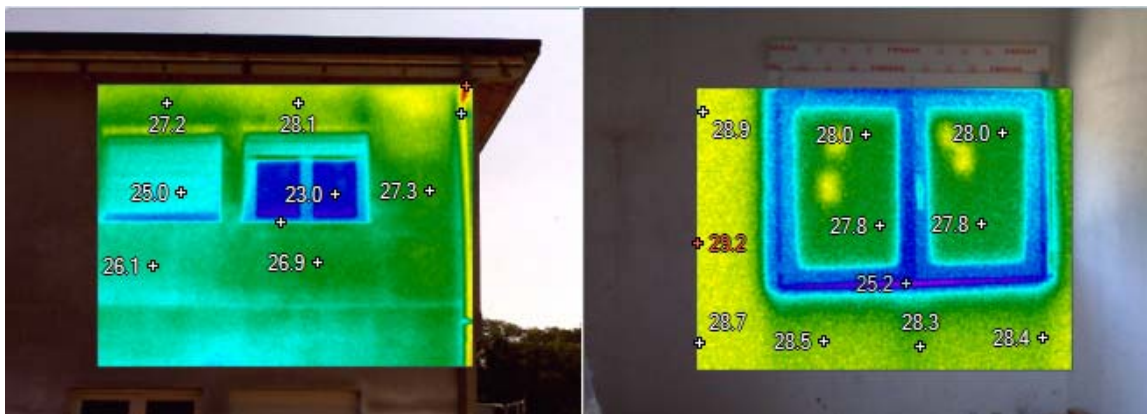


Como datos adicionales a las figuras anteriores, se muestra el comportamiento de la temperatura, humedad y viento capturados durante el transcurso de ese día por nuestra estación meteorológica, así mismo también los datos de radiación solar entregados por nuestro radiómetro. Por lo que podemos ver que aproximadamente a la hora en que se tomó la fotografía tenemos los valores de 30.5°C y 800 W/m².

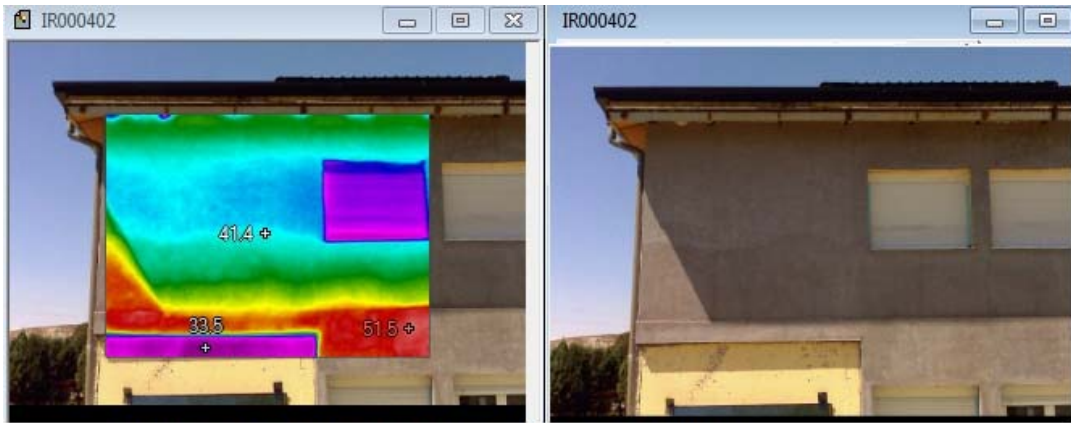




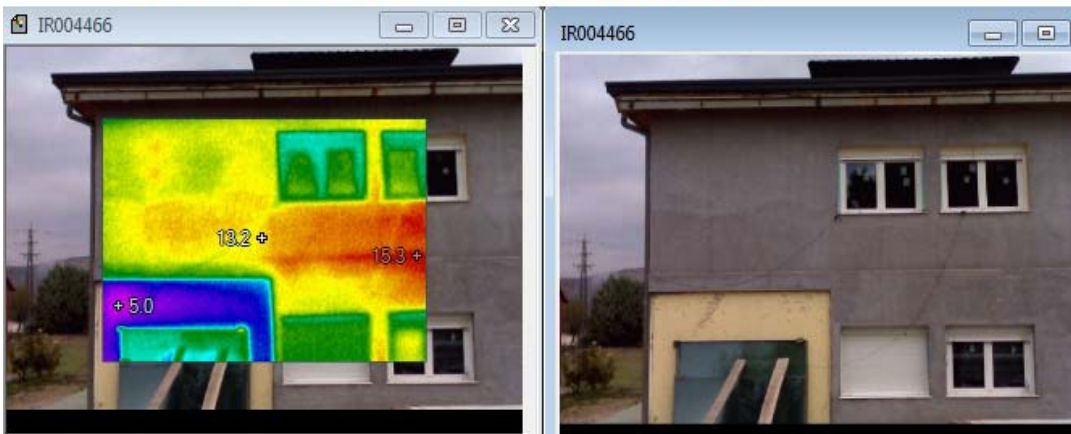
En la siguiente figura, se muestran dos fotos tomadas con la cámara termográfica el día 23 de julio del 2012 a las 10:42 horas con una temperatura exterior de 23°C. En la foto de la izquierda se muestran las temperaturas exteriores de un par de ventanas donde se puede apreciar que una tiene la persiana bajada, marcando una diferencia promedio de 2 °C entre ellas (25 °C contra 23 °C). En la foto de la derecha se observan las temperaturas desde el interior de la ventana que no tiene la persiana bajada. Con esto se confirma que la persiana como elemento estructural adicional aísla la sección de la ventana permitiendo conservar mejor el calor interior. Este tipo de elementos estructurales nos permite un juego dinámico para acoplar de una mejor manera el acristalamiento seleccionado a distintas épocas del año. Si esta persiana cuenta con sensores y actuadores nos permite una integración transparente a nuestra arquitectura para su manipulación dinámica.



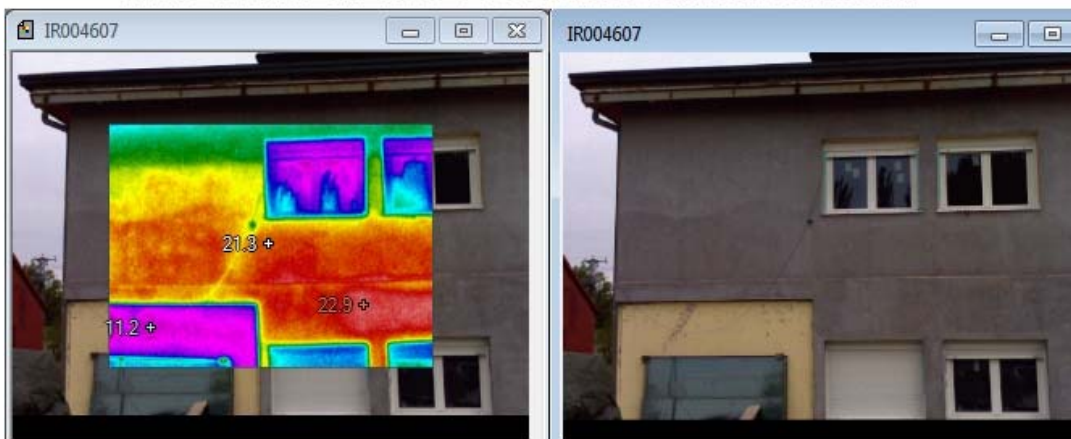
Finalmente, en la siguiente figura se muestran una serie de fotografías termográficas que expone el rango de temperaturas que pueden encontrar en diferentes estaciones del año. En este caso contar con una barrera térmica dinámica (BTD), permite manipular o reducir el flujo de calor entre el exterior y el interior de nuestro edificio.



16 DE JULIO DEL 2011 A LAS 16:10 horas.



18 DE NOVIEMBRE DEL 2011 A LAS 12:06 HORAS.



25 DE ABRIL DEL 2012 A LAS 11:52 HORAS.

ANEXO D. PATENTES Y PUBLICACIONES.

A. PATENTES.

1. Inventores: Guinea Díaz, Domingo; Villanueva Martínez, Eugenio; García-Alegre Sánchez, María Carmen; Guinea García-Alegre, Domingo Miguel; Martín Gómez, David; Rodríguez Barranco, Damían y Hernández Uribe, Oscar. “**Dispositivo Supervisor de Energía en los Edificios**”. Numero 2 380 029. G01D 7/08. **Fecha de Concesión: 20/03/2013.**

Es una patente nacional, en explotación a través de la fundación para la investigación y desarrollo de energías alternativas (FIDEAS). Su nodo sensor se usó para el monitoreo de un polideportivo en Suanzes, Madrid. Mi participación incluye el apoyo en el desarrollo de algunas figuras en especial las relacionadas con el nodo sensor y el sistema de monitoreo y control, así como soporte en la redacción cuando se hace referencia a las características técnicas del nodo sensor.

B. PUBLICACIONES.

2. Uribe, O.H.; Martin, J.P.S.; Garcia-Alegre, M.C.; Santos, M.; Guinea, D. Smart Building: Decision Making Architecture for Thermal Energy Management. *Sensors* 2015, *15*, 27543-27568.

En este artículo, como primer autor, se tuvo una fuerte participación en cada uno de los puntos tratados. Está basado en modelos hechos en COMSOL Multiphysics y en MATLAB/Simulink donde mi participación incluye desarrollar un par de ellos en su totalidad y en otros se mantuvo una participación considerable. Se ejecutaron una enorme cantidad de pruebas variando algunos de sus parámetros lo que permitió comparar los resultados obtenidos con los medidos y llegar a hacer un análisis de sensibilidad. Finalmente se integraron los resultados de simulación y datos reales en un edificio, en los que tuve parte haciendo las medidas, procesando los datos y analizándolos y comparándolos con los simulados.

3. Hernández, O.; Santos, M.; García-Alegre, M.C.; Guinea, D. A context-awareness architecture for managing thermal energy in an nZEB building. First IEEE Smart Cities Conference (ISC2-2014); Jalisco, México, 25-28 de Oct. 2015. 978-1-4673-6552-9/15

Este artículo, publicado por el IEEE, la mayor sociedad en Ingeniería a nivel mundial, y el siguiente, integran una vasta experiencia recogida de nuestra participación en OIKOS “la casa posible” en la EXPO ZARAGOZA 2008, otra en el Solar Decathlon Europe 2010

(SDE2010), y la del congreso “Madrid, Ecocity 2012”. En este artículo como primer autor se tuvo una fuerte participación en cada uno de los puntos tratados.

En este artículo se presenta una arquitectura de cuatro capas consciente del contexto para una versión de la gestión de los flujos de energía térmica en un edificio nZEB haciendo uso de tecnologías de la web semántica. A diferencia del artículo anterior (#2) y del siguiente artículo (#4), aquí hay un fuerte desarrollo basado en el uso de OWL-API, se hace uso de la ontología de la red de sensores semánticos (SSN) y presenta un uso del lenguaje SWRL para la creación de reglas que gobiernan la funcionalidad de la gestión térmica y permite crear una aplicación consciente del contexto. Cabe destacar que se presenta una nueva versión de nodo sensor basado en el PIC32, en el que he estado involucrado como responsable de su programación y funcionamiento.

4. Hernández, O.; Guinea, D.; Santos, M. Semantic sensors: a proposal from smart building to smart city model. ENC 2014, 2nd. Workshop on semantic Web and linked open data; Oaxaca, México, 3-5 de Nov. 2014, paper50.

El Encuentro Nacional de Ciencias de la Computación (ENC) es el evento científico más importante que organiza la Sociedad Mexicana de Ciencias de la Computación. En este artículo como primer autor se tuvo una fuerte participación en cada uno de los puntos tratados. En este artículo se pasa trabajar de una idea de un edificio inteligente hacia un modelo de ciudad inteligente. En esta parte se contribuye con un resumen sobre la participación personal que se tuvo en OIKOS “la casa posible” en la EXPO ZARAGOZA 2008 y en las pruebas hechas en el edificio nZEB, ambos ubicados actualmente en las instalaciones del CAR-UPM CSIC. Se desarrolló completamente una interface basada en su servidor web incorporado. Adicionalmente se desarrollaron los módulos básicos de este modelo, y el trabajo más relevante consistió en acoplar éstos al desarrollo adicional que se hizo con tecnologías de la web semántica y el almacenamiento y consulta en tripletas RDF.

5. Hernández, O.; Guinea, D.; García-Alegre, M.C. Desarrollo de un sensor de bajo costo para el monitoreo y control de una vivienda con uso de energía geotérmica de baja entalpia. Congreso internacional de investigación, Academia Journals; Guanajuato, México, 5-7 de Nov. 2014, pp. 2246-2252.

En este artículo como primer autor se tuvo una fuerte participación en cada uno de los puntos tratados. Surge posteriormente a la concesión de la patente española con numero 2 380 029 y título “Dispositivo Supervisor de Energía en los Edificios”. Se difunde el nodo sensor con capacidad de servidor web integrado como un dispositivo para la gestión de energía en un edificio nZEB. Se tuvo una participación relevante en

el diseño de la tarjeta electrónica pero especialmente en la incorporación de la tarjeta WiFi IEEE 802.11b al nodo sensor. Adicionalmente, aunque ya se contaba con una parte programada llevada a cabo durante los artículos anteriores, se hizo aun una programación más fina para el control de todas las electroválvulas instaladas en un prototipo de edificio nZEB.

6. Hernández, O.; Guinea, D.; San Martín, J.P. Sistema de almacenamiento de energía térmica usando material de cambio de fase con aplicación al uso residencial. XI Congreso Iberoamericano de energía solar y XXXVIII semana nacional de energía solar, Santiago de Querétaro, México. 6-10 de Oct. 2014, pp. 1026-1035.

En este artículo como primer autor se tuvo una fuerte participación en cada uno de los puntos tratados. Esta participación se desarrolla en tres puntos:

- A. Caracterización del material de cambio de fase (MCF), del que lo único que se conocía era que es del tipo parafina. Se participa en el desarrollo de un modelo, y el desarrollo de un sistema de adquisición de datos basado en hardware y software de National Instruments para caracterizar el MCF.
- B. Se organiza de manera paralela un análisis de los datos adquiridos mediante un programa desarrollado en MATLAB y un modelo en COMSOL Multiphysics realizados por el doctorando.
- C. Una vez caracterizado el MCF se participa en el montaje experimental de un sistema compuesto por tres elementos principales: un panel fotovoltaico, un bidón con material de cambio de fase y un circuito eléctrico. Se hizo un programa para el monitoreo y control.
- D. Al ser el ponente en este congreso y por su repercusión en el sector residencial, se invitó a publicar el contenido de este artículo en la revista ERA SOLAR (ver siguiente).

7. Hernández, O.; Guinea, D.; San Martín, J.P. Aplicación al uso residencial: almacenamiento de energía térmica con cambio de fase. ERA SOLAR Fototérmica & Fotovoltaica, May/Jun 2015, 186, pp. 24-33.

8. Guinea, D.; Hernández, O.; Guinea, D.M.; Peña, P.; Martín, D.; Izco, L.; Villanueva, E.; García-Alegre, M.C. Gestión integral de energía en la acumulación geotérmica: datos, comunicaciones, decisiones. II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria, Madrid, España; 10-11 de Marzo 2010, pp. 213-221.

En este artículo surge para presentar especialmente los avances y experiencias que surgen de OIKOS “la casa posible”. En este se participó fuertemente en la propuesta de una arquitectura de decisión. Cabe destacar que la vivienda OIKOS se encuentra

actualmente instalada en las instalaciones del CAR-UPM CSIC, en donde nuevamente se participa durante su instalación. Por lo que la arquitectura que surge de este artículo se usa como punto de partida para un monitoreo y control más óptimo de los flujos de energía eléctrica y térmica.

9. Guinea, D; Peña, P.; Guinea, D.M.; Hernández, O.; Villanueva, E.; Martín, D.; García-Alegre, M.C. Energía solar en el subsuelo. II Congreso de energía geotérmica en la edificación y la industria. Madrid, España; 10-11 de Marzo 2010, pp. 231-239.

En este artículo se hace una búsqueda relevante respecto a la inercia térmica y la acumulación de energía en el subsuelo, además se aporta información para un estudio comparativo entre tres viviendas una sin intercambiador térmico en el subsuelo y otras dos intercambiador en el subsuelo con diferentes dimensiones.

10. Guinea, D.; Peña, P.; Hernández, O.; Guinea, D.M.; Izco, L.; Villanueva, E.; García-Alegre, M.C. Autosuficiencia energética en la vivienda. I Congreso de generación distribuida (Genedis 2009), Madrid, España; 24-25 de Nov. 2009, pp. 281-286.

En este artículo se hace un aporte en la sección de introducción y en el uso de la energía residencial. Se participa en el diseño de figuras con el concepto del flujo térmico y acumulación selectiva de energía térmica en el subsuelo.

11. Hernández, O.; Gilarranz, S.; Guinea, D.M.; Villanueva, E.; Martín, D.; García-Alegre, M.C.; Izco, L.; Guinea, D. Gestión integral de energía en la edificación. I Congreso de arquitectura sostenible, Valladolid, España; 12-13 de Nov. 2009, pp. 175-178.

En este artículo se aporta el conocimiento previo ganado durante la participación en OIKOS “la casa posible”. La colaboración se centra en el apartado de “supervisión, control y optimización”. En esta parte se concibe el nacimiento de la patente arriba citada, la cual culmina en la concesión en Marzo del 2013. Se participa con el desarrollo de algunas pantallas para ver la evolución en tiempo real y pantallas de configuración del sistema. Adicionalmente se participó en el modelo conceptual de los flujos de energía existente entre los sistemas fotovoltaicos, generación y almacenamiento de hidrogeno y climatización del edificio.

12. Guinea, D.; Villanueva, E.; García-Alegre, M.C.; Peña, P.; Izco, L.; Gilarranz, S.; Hernández, O.; Guinea, D.M. OIKOS: una vivienda de consumo energético cero. I Congreso de arquitectura sostenible, Valladolid, España; 12-13 de Nov. 2009, pp. 234-236 (POSTER).

Mi contribución principal queda presente al haber participado durante el ensamble de OIKOS “la casa posible”, la cual hace uso de energía solar y geotermia de muy baja temperatura. Se participó en el desarrollo de una interface de usuario para transmitir la principal idea de que es posible construir una vivienda autosuficiente. En esta interface se muestra como ordenar y usar los flujos térmicos y eléctricos de forma conveniente para ser autosuficientes. Se apoyó en la programación de una red de microcontroladores basados en un microchip PIC16 de diseño propio, se instalaron y se enlazaron datos a la interface desarrollada. Es de destacar, que aunque no se aparece como autor aquí surge una patente referente al muro de cerramiento multicapa que se usó para esta vivienda (ES 2378 859 B1).

