

# ENERGÍA SOLAR SOSTENIBLE PARA EL DESARROLLO RURAL Y ESTIMACIÓN DE SUS COSTES

F. Javier Martín-Campo<sup>1</sup>, Javier León<sup>1</sup>, Begoña Vitoriano<sup>1</sup>, M. Teresa Ortuño<sup>1</sup>,  
Luis Narvarte<sup>2</sup>, Luis M. Carrasco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Investigación HUMLOG-UCM, Instituto de Matemática Interdisciplinar, Universidad Complutense de Madrid

<sup>2</sup>Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid

## Resumen

Este trabajo presenta una metodología para la estimación de costes en programas de electrificación rural descentralizada basado en la instalación y mantenimiento de sistemas solares domésticos. La metodología presentada consta de dos fases: (1) modelo de optimización para estimación de costes y configuración de la estructura local (agencias, vehículos y personal) y (2) modelos estadísticos de clasificación y regresión lineal para la estimación de costes sujeto a características conocidas de antemano en un programa de esta envergadura. Esta metodología ha sido validada en un programa implantado en Marruecos donde la empresa encargada de la instalación, gestión y operación subestimó, principalmente, los costes de operación, provocando el incumplimiento de las condiciones del programa.

## 1. Introducción

El desarrollo humano es un concepto que ha ido evolucionando a lo largo del tiempo e incorporando conceptos más allá de lo puramente económico. La asamblea general de la Organización de las Naciones Unidas celebrada en 2015, estableció las Metas de Desarrollo Sostenible para el período de tiempo 2015-2030, [3]. Dentro de las diferentes metas, la séptima meta proponía asegurar el acceso a energía asequible, fiable y sostenible para todos marcando como horizonte el año 2030 y con los propósitos de:

- Asegurar el acceso universal a servicios de energía asequible, fiable, sostenible y moderna
- Aumentar sustancialmente la participación de las energías renovables en la producción energética mundial
- Duplicar la tasa mundial de mejora de eficiencia energética
- Mejorar la cooperación internacional para facilitar el acceso a la investigación y tecnologías de energía limpia
- Ampliar la infraestructura y actualizar la tecnología para el suministro de servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo

Para proveer de energía eléctrica a las regiones descentralizadas a las que no alcanza el tendido eléctrico, la energía solar se ha convertido en una opción atractiva. Esta energía necesita la instalación de sistemas solares domésticos a los que pueden añadirse diferentes dispositivos eléctricos, principalmente lámparas de bajo consumo.

Marruecos lanzó un programa en que dicho servicio fue proporcionado por una empresa de servicios energéticos, siendo responsable de la instalación de

los diferentes sistemas y del mantenimiento de la red por un periodo de 10 años. Antes de aceptar este programa, la empresa tuvo que realizar una estimación de los costes para estudiar la viabilidad del programa. Esta empresa en concreto subestimó principalmente los costes de mantenimiento provocando cambios en la calidad del programa. Carrasco y otros (2013) [2] presentan en detalle los costes generados por este programa de electrificación rural descentralizada en Marruecos.

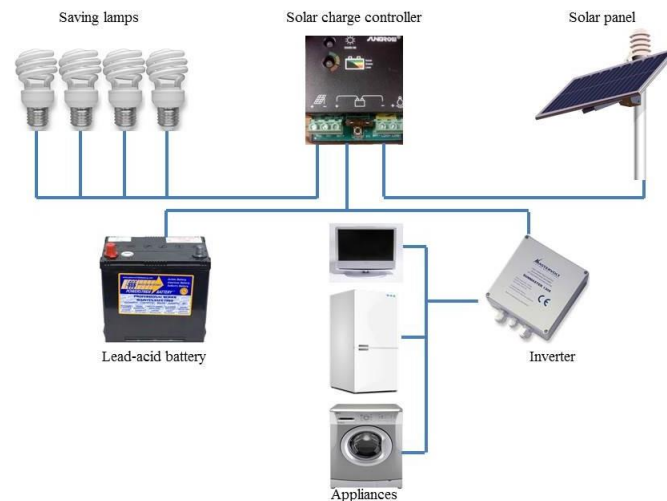


Figura 1: Sistema solar doméstico.

Con el fin de crear un sistema experto que ayude en la toma de decisiones, principalmente en la estimación de costes, este trabajo pretende mostrar una metodología basada en un modelo de optimización matemática que proporciona la estructura provincial necesaria (agencia, vehículos y personal) y un modelo estadístico basado en un árbol de clasificación y un modelo de regresión lineal capaz de estimar los costes totales del programa. Esta metodología se presentó en [1] y [4].

Este trabajo se organiza del siguiente modo: la Sección 2 describe el problema a abordar; la Sección 3 presenta la metodología usada para afrontar este problema donde la Sección 3.1 presenta un modelo de optimización matemática y la Sección 3.2 presenta un modelo estadístico de predicción de costes basado en un árbol de clasificación y un modelo de regresión lineal; la Sección 4 presenta un ejemplo práctico para ilustrar la metodología presentada; finalmente, la Sección 5 presenta las principales conclusiones del trabajo realizado.

## 2. Descripción del problema

Los programas de electrificación rural suelen estar basados en la instalación y mantenimiento de sistemas solares domésticos. Estos sistemas suelen estar formados por diferentes componentes: panel solar, controlador de carga, inversor, batería, lámparas y dispositivos según se presenta en la Figura 1.

La empresa de servicios energéticos responsable del programa es la encargada de la instalación de los sistemas solares y cobro de tarifas así como del correspondiente mantenimiento. Este último tiene dos vertientes: mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo. El mantenimiento preventivo se realiza periódicamente y, normalmente, la batería suele ser el elemento que determina el periodo entre mantenimientos preventivos consecutivos. El mantenimiento correctivo está enfocado a la reparación de fallos de los sistemas haciendo que sea impredecible por su aleatoriedad y, por tanto, desconocido de antemano.

En la Figura 2 se pueden observar los fallos ocurridos en las diferentes componentes del sistema solar doméstico durante el desarrollo del programa de Marruecos (10 años). Se puede observar que, mientras que los controladores de carga y las lámparas tienen un comportamiento constante, la batería tiene un comportamiento más irregular, observándose un pico de fallos en el sexto año.

Para poder concursar a un programa de estas características, se deben firmar una serie de condiciones como el tiempo máximo de respuesta ante un mantenimiento correctivo, número mínimo de operaciones de mantenimiento preventivo al año, tiempo máximo de pago de las correspondientes tarifas, quién paga las tarifas (usuarios o subvención), estructura local asentada para llevar a cabo las diversas operaciones de la compañía, etc.

En el caso de Marruecos, se fijaron las siguientes condiciones:

- Tiempo máximo de respuesta ante mantenimiento correctivo: 48 horas

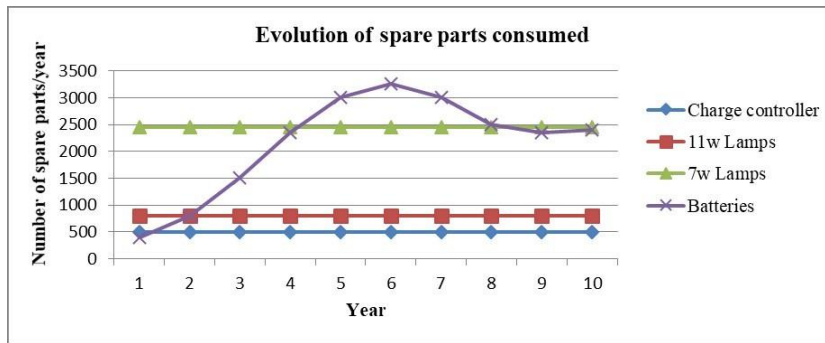
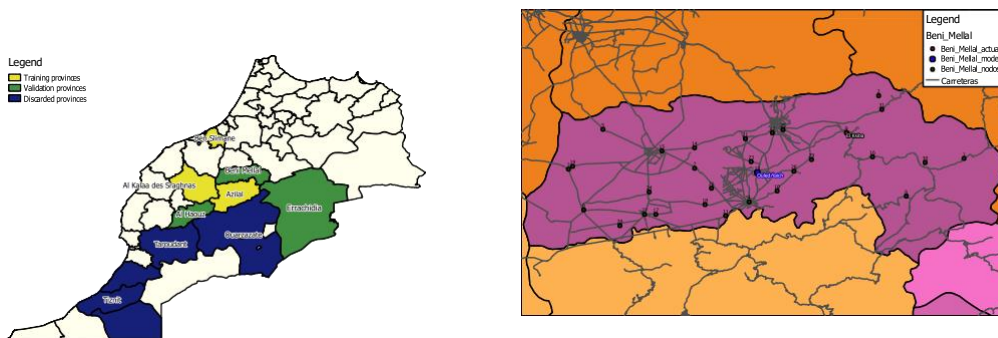


Figura 2: Sistema solar doméstico.



(a) División provincial de Marruecos.

(b) División comarcal de Marruecos.

Figura 3: División territorial de Marruecos.

- Número de operaciones de mantenimiento preventivo al año: 2
- El programa de electrificación se subdivide en provincias y se gestionan por separado
- Los sistemas solares domésticos se sitúan en pequeñas aldeas (se conoce el número de sistemas en cada aldea)
- Las aldeas pertenecen a comunidades rurales que tienen una capital
- La localización de las capitales de las comunidades rurales se conoce
- con exactitud Los puntos de encuentro se dan en mercados locales (denominados *souks*)
- Las lámparas fundidas se reemplazan en los mercados o agencias locales de la compañía
- Cada provincia debe tener al menos una agencia principal con un jefe y plantilla formada por administrativos y técnicos
- Si se necesitaran agencias secundarias deben incluir
  - sólo técnicos Cada vehículo de operaciones llevará dos técnicos
- Si se presta servicio en los mercados, sólo se

necesitará un técnico Existe un tiempo fijo de atención  
a clientes en mercados

- Los técnicos tienen una jornada laboral fija

Cabe destacar la división territorial de Marruecos, estableciendo provincias en un primer nivel y comunidades rurales (o comarcas) en un segundo nivel como se presenta en la Figura 3. Mientras que la Figura 3a muestra la división provincial, la Figura 3b muestra la división comarcal de la provincia de Beni Mellal.

En base a la división territorial, una empresa de servicios energéticos debe establecer una red de agencias de mantenimiento (provincial normalmente) con una flota de vehículos y personal asociado.

Con todos estos elementos, antes de comprometerse con la realización de un programa de electrificación rural, una empresa de servicios energéticos debe realizar una correcta estimación de todos sus costes. Para ello, la siguiente sección muestra la metodología empleada para desarrollar un sistema experto capaz de predecir de antemano los costes asociados al programa.

### 3. Metodología

La metodología desarrollada para dar respuesta a los costes de un programa de electrificación rural está estructurada en los siguientes puntos:

1. Modelo de optimización matemática: Su objetivo es establecer la dimensión de la red de mantenimiento en cuanto a agencias necesarias, vehículos y personal, además de su coste.
2. Simulación de datos realistas: Dado que los datos reales son insuficientes para poder llevar a cabo un correcto estudio estadístico, se han generado datos de diferentes provincias ficticias a las que se les ha calculado su estructura y costes mediante el modelo de optimización.
3. Métodos estadísticos: Para estimar los costes se han empleado un árbol de clasificación y un modelo de regresión lineal.

#### 3.1. Modelo de optimización: Estimación de costes

En esta primera fase, gracias a la recolección de datos del programa (costes reales y estructura), se ha estudiado un modelo de optimización matemática que establece tanto la estructura como los costes del programa en una provincia dada. Este modelo se ha entrenado en las provincias en amarillo en la Figura 3a (Azilal, Al Kalaa des Sraghnas y Ben Slimane). Una vez que se ha calibrado el modelo, se ha validado en las provincias en verde de la Figura 3a (Errachidia, Beni Mellal y Al Haouz). Las provincias en azul no se tuvieron en cuenta debido a que no se cumplieron las condiciones del programa y, por tanto, los resultados obtenidos no podrían ser comparables. En cambio, sí que se ha usado su información para la generación de datos de nuevas provincias.

El modelo de optimización matemática está formado, entre otros, por los siguientes elementos (ver [1, 4] para más detalles):

- Conjuntos de índices:
  - $r, rr \in R \equiv$  comunidades rurales
  - $d \in D \equiv$  días del horizonte temporal
  - $v \in V \equiv$
- aldeas Variables binarias:
  - $BL(r) = 1 \iff$  se localiza una agencia en la comunidad rural  $r$
  - $BA(rr, r) = 1 \iff$  la comunidad rural  $rr$  se atiende desde la comunidad rural  $r$  (si ésta última tiene una agencia localizada en ella)
  - $BR(rr, d, r) = 1 \iff$  la comunidad rural  $rr$  se atiende el día  $d$  desde la agencia localizada en  $r$
- Variables enteras:
  - $NCR(r) \equiv$  número de vehículos asignados a la agencia localizada en la comunidad rural  $r$
  - $NCT(rr, d, \#) \equiv$  número de vehículos viajando desde la comunidad rural  $r$  el día  $d$  para atender sistemas en la comunidad rural  $rr$
- Variables continuas:

Provincia	Binarias	Enteras	Continuas	Total Restricciones
Ben Slimane	2.358	2.529	2.268	7.155
Azilal	26.130	26.070	25.200	77.400
Al Kalaa	87.780	86.295	84.700	258.77

				5	
<b>Errachidia</b>	24.418	24.389	23.548	72.355	194.330
<b>Beni Mellal</b>	27.900	27.807	26.908	82.615	221.804
<b>Al Haouz</b>	21.168	21.195	20.412	62.775	168.672

- $NSR(r, d) \equiv$  número de sistemas visitados en la comunidad rural  $r$  el día  $d$

Tabla 1: Número de variables y restricciones en cada provincia.

- $TM(rr, d, \#)$  tiempo empleado en la comunidad rural  $rr$  el día  $d$  con vehículos de la comunidad rural  $r$

El conjunto de restricciones del modelo viene dado

$$\text{por: Minimizar } cfp + \sum_r cmc(r) \cdot BL(r) + \sum_r cnc \cdot$$

$$NCR(r) +$$

$$2 \cdot ctr \sum_r \sum_{d \in \mathbb{N}} dist(r, rr) \cdot NCT(rr, d, r) +$$

$$ctr \cdot \sum_r \sum_{v \in r} dist(r) \cdot nvis(v)$$

sujeto

a:

$$\begin{aligned}
& BR(rr, d, r) \leq BA(rr, r) \leq BL(r) \\
& NSR(rr, d) \leq \sum_{rr} nvis(v) \cdot \sum_{r} BR(rr, d, r) \\
& \sum_{d} NSR(rr, d) = \sum_{v \in rr} nvis(v) \\
& BL(r) \leq NCR(r) \leq numc \cdot BL(r) \\
& BR(rr, d, r) \leq NCR(r) \\
& NCT(rr, d, r) \leq NCR(r) \\
& BR(rr, d, r) \leq NCT(rr, d, r) \leq numc \cdot BR(rr, \\
& \sum_r d, r) BR(rr, d, r) \geq b(rr, d) \\
& \sum_{rr} NCR(rr) \geq \sum_{rr} b(rr, d) \cdot (1 - BL(rr)) \\
& TM(rr, d, r) \geq tb(rr, d) \cdot (BR(rr, d, r) - BL(rr)) \\
& TM(rr, d, r) \geq tdd(rr) \cdot NSR(rr, d) - M \cdot (1 - BR(rr, d, r)) \\
& \sum_{rr} (2t(r, rr) \cdot NCT(rr, d, r) + TM(rr, d, r)) \leq dailyt \cdot NCR(r) \\
& dailyt \cdot NCT(rr, d, r) \geq TM(rr, d, r) + 2t(r, rr) \cdot NCT(rr, d, r)
\end{aligned}$$

La Tabla 1 muestra las dimensiones (número de variables y restricciones) del modelo resultante en cada una de las provincias estudiadas. Se puede observar que Al Kalaa es la provincia más grande cuya resolución también resultó ser la más compleja.

Las Tablas 2, 3 y 4 presentan los resultados obtenidos para las provincias de entrenamiento: Azilal, Ben Slimane y Al Kalaa, respectivamente. La primera columna presenta datos reales con la configuración real; la segunda columna presenta los costes estimados por el modelo implementado en GAMS fijando la configuración; la tercera columna presenta la solución del modelo sin forzar ninguna configuración.

Se puede observar en la Tabla 2 que el modelo determina que la estructura óptima es la misma que la que fue implementada. Comparando los resultados reales con el modelo fijando la estructura real, los costes difieren en un 2,50 %, es decir, la estimación de costes es adecuada. De modo análogo, para la provincia de Ben Slimane, los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 3, son similares a los que se dieron en la realidad.





	Datos reales	Modelo fijando estructura	Modelo sin fijar estructura
Centros localizados	$r_1$	$r_1$	$r_1$
Núm. vehículos	2	2	2
Coste estructural (e)	48.011	48.011	48.011
Coste transporte (e)	8.687	10.105	10.105
Coste total (e)	56.698	58.116	58.116
Ratio	–	2, 50 %	2, 50 %

Tabla 2: Costes reales y estimados de la provincia de Azilal.

	Datos reales	Modelo fijando estructura	Modelo sin fijar estructura
Centros localizados	$r_1$	$r_1$	$r_1$
Núm. vehículos	1	1	1
Coste estructural (e)	19.174	19.174	19.174
Coste transporte (e)	1.192	1.218	1.218
Coste total (e)	20.366	20.392	20.392
Ratio	–	0, 13 %	0, 13 %

Tabla 3: Costes reales y estimados de la provincia de Ben Slimane.

	Datos reales	Modelo fijando estructura	Modelo sin fijar estructura
Centros localizados	$r_2$	$r_2$	$r_1$ y $r_2$
Núm. vehículos	4	4	3
Coste estructural (e)	66.875	66.875	57.704
Coste transporte (e)	23.280	19.259	11.428
Coste total (e)	90.155	86.134	69.132
Ratio	–	-4, 46 %	-23, 32 %

Tabla 4: Costes reales y estimados de la provincia de Al Kalaa.

Sin embargo, en la Tabla 4 se puede observar que el modelo estima correctamente los costes reales pero que otra configuración hubiera sido mejor, consistiendo en la apertura de un centro más y la asignación de un vehículo menos con respecto a la estructura real, aportando una mejora de un 23,32 % con respecto a los costes reales (debido principalmente al ahorro en desplazamientos). La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos por el modelo en las provincias de validación.

Puede observarse que tanto en Errachidia como en Beni Mellal, el número de técnicos es impar, incumpliendo la condición del programa en la que se exigía que hubiera dos técnicos por vehículo. Por ese motivo, los costes han sido levemente sobreestimados. En el caso de Al Haouz, la estimación de costes es correcta.

### 3.2. Modelos estadísticos

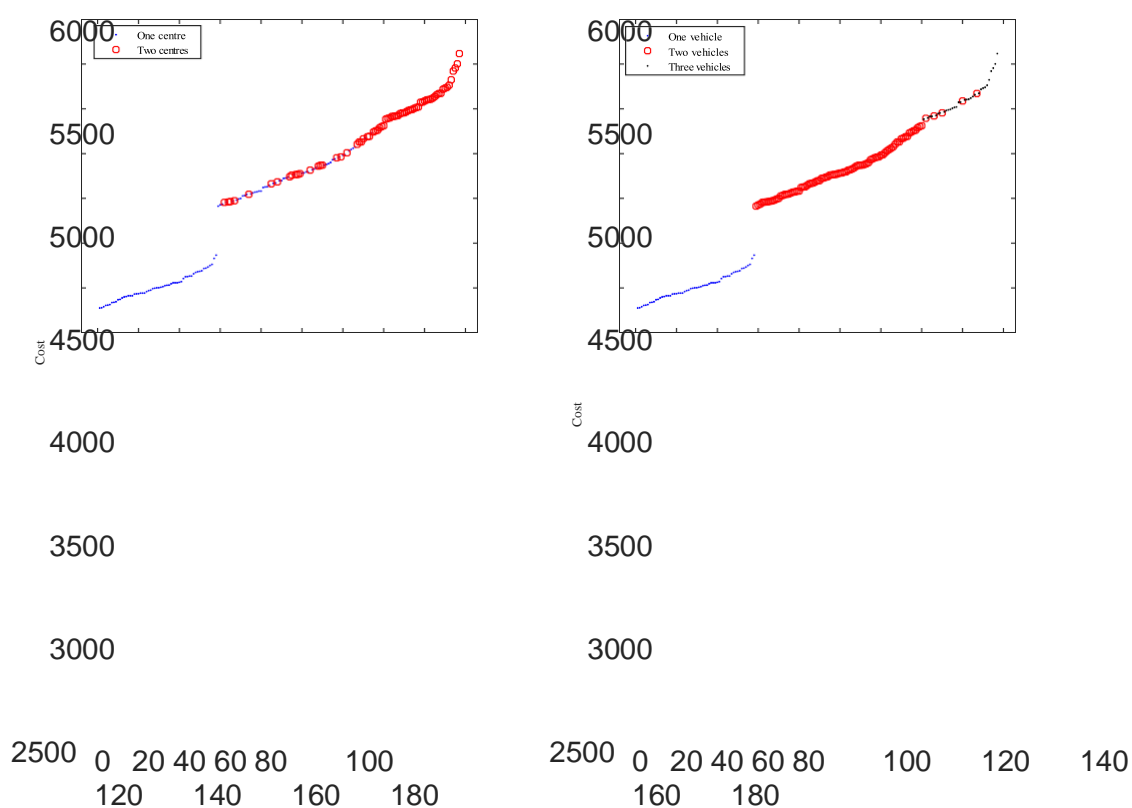
Persiguiendo el objetivo de obtener una herramienta útil en la estimación de costes en programas de electrificación rural, es necesaria la obtención de datos suficientes para usar modelos estadísticos y que sus estimaciones resulten robustas. Para ello, con la información de las 6 provincias de Marruecos estudiadas,

se han simulado datos para un total de 177 nuevas provincias ficticias de las que se han estimado sus costes y estructura funcional a partir del modelo previamente presentado. La generación de estos datos se ha realizado cambiando parámetros con respecto a los datos reales, tales como número de comunidades rurales, sistemas instalados, aldeas, mercados, costes de viaje, número máximo de sistemas por comunidad rural, por aldea, etc.

Tras resolver el modelo para cada uno de los 177 casos generados, se obtuvo que había un salto

		Errachidia	Beni Mellal	Al Haouz
<b>Datos</b>	# agencias	1	1	1
	# vehículos	2	3	1
	# técnicos	3	5	2
<b>Modelo</b>	# agencias	2	1	1
	# vehículos	2	3	1
	# técnicos	4	6	2
	<b>Ratio</b>	6,83 %	13,95 %	6,37 %

Tabla 5: Resultados obtenidos con las nuevas provincias que no se usaron en la fase de entrena- miento.



(a) Agrupados por agencias instaladas. (b) Agrupados por número de vehículos.

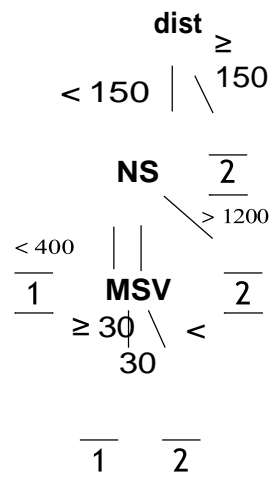
Figura 4: Coste de los 177 casos ordenados de menor a mayor coste.

en cuanto a coste al pasar de uno a dos vehículos (ver Figura 4b), contrariamente a la hipótesis inicialmente planteada, es decir, que el salto de coste se produciría cuando se pasara de una a dos agencias locales instaladas (ver Figura 4a). La comparación puede observarse en la Figura 4 donde se ordenaron de menor a mayor coste los resultados obtenidos.

### 3.2.1. Árbol de clasificación

Debido a que las diferencias sustanciales en materia de coste se ha mostrado

que se obtenían cambiando el número de vehículos de 1 a 2, se ha estudiado un árbol de clasificación que, en función de los parámetros de la provincia, clasifica el número de vehículos como 1 o más de uno. El árbol obtenido se muestra a continuación, junto a la matriz de confusión donde se puede observar que sólo en un total de 3 casos sobre 177 se ha clasificado erróneamente.



Matriz de confusión:

		estimado	
		1	2
real	1	56	2
	2	1	118

### 3.2.2. Regresión lineal

Finalmente, se ha estudiado un modelo de regresión lineal incluyendo diferentes características de la provincia y algunos de sus productos. Además, se ha incluido la información obtenida del

Nombre	Valor	Descripción
<b>NV</b>	0,4	Número de aldeas
<b>MSV</b>	1,64	Número máximo de sistemas en una aldea
<b>t</b>	-19,03	Tiempo medio entre comunidades
<b>Mt</b>	8,02	Tiempo máximo entre comunidades
<b>distt × NV</b>	-0,1	Distancia media dentro de una comunidad rural × NV
<b>ctr × distt × NV</b>	2,37	Coste de viaje × distt × NV
<b>ctr × dist</b>	52,83	ctr × Distancia media entre comunidades rurales
<b>singleVeh</b>	2360	Si sólo se necesita un vehículo
<b>h</b>		
<b>multVeh</b>	3455	Si se usa más de un vehículo

Tabla 6: Coeficientes del modelo de regresión.

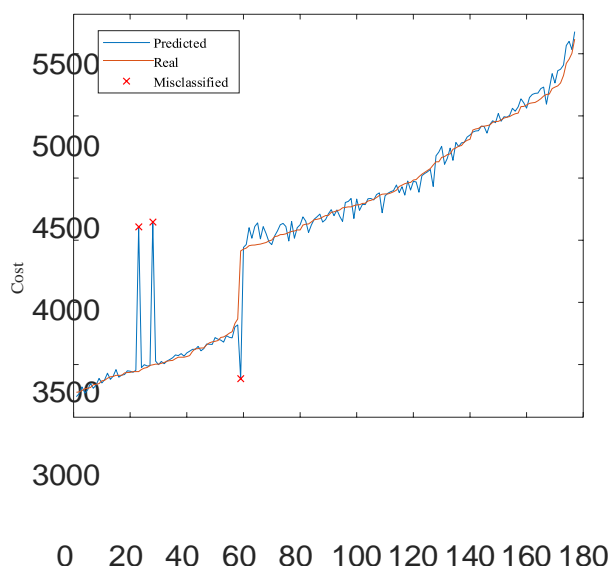


Figura 5: Costes reales y estimados por el modelo de regresión lineal.

árbol de clasificación con una variable *dummy*. El valor  $R^2$  ajustado del modelo de regresión es de 0,9616. La Tabla 6 muestra los valores estimados para cada una de las variables significativas junto a la descripción de la característica usada.

Se puede observar en la Figura 5 que los costes estimados por el modelo de regresión lineal se aproximan a los costes reales excepto en las tres observaciones mal clasificadas por el modelo del árbol de clasificación donde el número de vehículos o bien sobrestiman tal coste (las dos observaciones mal clasificadas de la izquierda) o subestiman el coste total (observación mal clasificada de la derecha).

#### 4. Aplicación

A modo de aplicación, se presenta a continuación un ejemplo para comprobar si las tarifas impuestas a los usuarios son suficientes para cubrir los gastos de instalación y mantenimiento o no. Para ello, se conocen los ingresos: 70€ de tarifa inicial por sistema instalado y tarifa mensual. Al ser el periodo de amortización de 10 años, el ingreso total anual por sistema es de  $7 + T$  siendo  $T$  la tarifa anual a determinar. En el caso de Marruecos, esta tarifa anual fue de 59€.

Por otro lado, los costes son: instalación, 417e, reportando un coste anual de 41,70e anuales; reemplazos, estimado en 23,50e por sistema y año; mantenimiento, donde el modelo de regresión reporta un coste de  $13 \frac{C}{NS}$  siendo C el coste de mantenimiento por 4 semanas y NS el número de sistemas instalados.

Uniéndola esta información se obtiene la ecuación de balance, de modo que, para obtener una inversión rentable, la tarifa anual debería ser de al menos:

$$T \geq 13 \frac{C}{NS} + 23,50 + 41,70 - 7 = 13 \frac{C}{NS} + 58,20$$

Asumamos una provincia con las siguientes características:

Nombre	Valor	Descripción
dist	96,724	Distancia media entre comunidades rurales
NS	1676	Número de sistemas instalados
MSV	56	Número máximo de sistemas en una aldea
t	96,724	Tiempo medio de desplazamiento entre comunidades rurales
Mt	267	Tiempo máximo de desplazamiento entre comunidades rurales
distt	7,603	Distancia media dentro de una comunidad rural
ctr	0,093	Coste de viaje
NV	116	Número de aldeas

El árbol de clasificación reporta que se necesita más de un vehículo. Incluyendo esta información en el modelo de regresión, se obtiene que el coste  $C$  es de 4475,34e. Incorporando este dato a la ecuación de balance, la tarifa anual  $T$  debería ser al menos de 92,91e, muy distante de la tarifa real de 59e. Ante esta situación, o bien la empresa debería incrementar la tarifa anual a los usuarios o bien buscar soluciones donde el Estado pudiera subsidiar la parte restante con el fin de proporcionar energía a los habitantes de zonas rurales descentralizadas.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un problema al que se enfrentan diferentes compañías energéticas antes de implantar redes de electrificación descentralizada basada en energía solar. En concreto, se ha estudiado un caso real de Marruecos, donde la compañía energética tuvo dificultades para afrontar los costes debido a la subestimación de los costes de mantenimiento. Se han desarrollado herramientas matemáticas para la estimación de costes para sugerir si la participación en el programa puede resultar rentable o no usando información de primera etapa. Estas herramientas son un modelo de optimización matemática que permite obtener la estructura óptima (agencias, vehículos y personal) y un modelo estadístico compuesto de un árbol de clasificación y un modelo de regresión lineal que es capaz de estimar los costes totales del programa. Gracias a estas herramientas, las compañías energéticas pueden fijar las tarifas de los diferentes usuarios y estudiar la necesidad de subsidiar a los usuarios con ayudas del Estado.

## Referencias

- [1] L.M. Carrasco, F.J. Martín-Campo, L. Narvarte, M.T. Ortuño, and B. Vitoriano. Design of maintenance structures for rural electrification with solar home systems. the case of the moroccan program. *Energy*, 117(Part 1):47–57, 2016.
- [2] L.M. Carrasco, L. Narvarte, and E. Lorenzo. Operational costs of a 13,000 solar home systems rural electrification programme. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20:1–7, 2013.
- [3] Organización de las Naciones Unidas. Sustainable development goals, 2015. <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/sustainabledevelopmentgoals> (último acceso: diciembre de 2020).
- [4] J. León, F.J. Martín-Campo, M.T. Ortuño, B. Vitoriano, L.M. Carrasco, and L. Narvarte. A methodology for designing electrification programs for remote areas. *Central European Journal of Operations Research*, 28:1265–1290,

2020.