

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de la Energía

### Estudio de compensación de potencia reactiva en viviendas unifamiliares: ZeroCap

Autor: Marta Alés Gómez

Tutor: Manuel Barragán Villarejo

**Dpto. de Ingeniería Eléctrica**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de la Energía

# **Estudio de compensación de potencia reactiva en viviendas unifamiliares: ZeroCap**

Autor:

Marta Alés Gómez

Tutor:

Manuel Barragán Villarejo

Profesor Ayudante Doctor

Dpto. de Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Estudio de compensación de potencia reactiva en viviendas unifamiliares: ZeroCap

Autor: Marta Alés Gómez

Tutor: Manuel Barragán Villarejo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

*A mis padres*





# Agradecimientos

---

A la Escuela Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla, por poner a disposición los recursos que hicieron posible el estudio.

A mis profesores, en especial a aquellos que inspiraron en sus alumnos las ganas de aprender y superación.

A Endesa, por confiar en mi y apostar por la idea de este Trabajo.

A mi tutor, Manuel Barragán Villarejo, por su absoluta disponibilidad e implicación, y ser guía en la elaboración y composición.

A María, Marina y Blanca, por las innumerables horas de estudio compartidas.

A mis padres, por ser un pilar fundamental.

*Marta Alés Gómez*

*Sevilla, 2019*



# Resumen

---

El sector residencial ha experimentado una creciente demanda energética en los últimos años y las previsiones auguran que este aumento continúe. A este escenario se suman el desarrollo de la digitalización y la automatización de tareas en las viviendas. Los dispositivos electrónicos, cada vez más presentes, provocan la aparición de armónicos que reducen la eficiencia eléctrica aumentando las pérdidas y el desgaste de los elementos de la red.

Ante la previsión de continuo crecimiento en la demanda de energía eléctrica y el aumento de la digitalización en este sector surge la necesidad de introducir medidas de eficiencia energética en el sistema eléctrico del hogar. En este Trabajo se plantea el análisis de la compensación de potencia reactiva en el sector residencial como posible medida de eficiencia.

La compensación de potencia reactiva supone beneficios para la red tales como el aumento de la capacidad de ésta, la mejora de la tensión o la disminución de las pérdidas. Aunque en la actualidad esta práctica se da principalmente en el sector industrial, los nuevos acontecimientos sugieren un futuro en el cuál la compensación de este efecto sea beneficioso también en la vivienda.

# Abstract

---

The residential sector has experienced a growing energy demand in recent years and this increase is expected to continue. Besides this scenario, the development of digitization and automation of tasks in homes become a relevant issue. The electronic devices, which are increasingly present, cause the emergence of harmonic which reduce the electrical efficiency by increasing the losses and wear of the network elements.

Faced with the forecast of continuous growth in the demand for electricity and the increase of the digitization in this sector arises the need to introduce measures of energy efficiency in the household electrical system. This thesis raises the analysis of reactive power compensation in the residential sector as a possible measure of efficiency.

Reactive power compensation assumes network benefits such as increased capacity, improved tension, or decreased loss of strength. Although today this practice is mainly present in the industrial sector, the new events suggest a future in which the compensation of this effect is beneficial also in housing.

# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Antecedentes</i>	1
1.2. <i>Motivación e hipótesis</i>	2
1.3. <i>Normativa</i>	4
1.4. <i>Objetivo</i>	5
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	5
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	5
<b>2 Cargas de alto consumo</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Frigorífico</i>	7
2.1.1. <i>Funcionamiento</i>	7
2.2. <i>Lavadora</i>	8
2.2.1. <i>Funcionamiento</i>	8
2.3. <i>Secadora</i>	10
2.3.1. <i>Funcionamiento</i>	10
2.4. <i>Lavavajillas</i>	10
2.4.1. <i>Funcionamiento</i>	10
2.5. <i>Televisión</i>	11
2.5.1. <i>Funcionamiento</i>	11
2.6. <i>Climatización</i>	11
2.6.1. <i>Funcionamiento</i>	11
<b>3 Herramientas y Softwares</b>	<b>13</b>
3.1 <i>Analizador de red</i>	13
3.1.1. <i>Configuración</i>	13
<b>4 Caracterización de Curvas de Cargas de Alto Consumo</b>	<b>18</b>
4.1. <i>Frigorífico</i>	18
4.2. <i>Lavadora</i>	19
4.2.1. <i>Lavado corto</i>	19
4.2.2. <i>Lavado largo</i>	21
4.3. <i>Secadora</i>	22
4.4. <i>Lavavajillas</i>	23
4.4.1. <i>Lavado corto</i>	23
4.4.2. <i>Lavado largo</i>	24
4.5. <i>Televisión</i>	25

4.6. Climatización	26
4.6.1. Régimen de calefacción	26
4.6.2. Régimen de refrigeración	27
<b>5 Consumo Diario</b>	<b>30</b>
5.1. Primavera	30
5.2. Verano	31
5.3. Otoño	33
5.4. Invierno	35
<b>6 Compensación de Potencia Reactiva en la Vivienda</b>	<b>38</b>
6.1. Configuración de ZeroCap	38
6.2. ZeroCap en el sistema eléctrico	38
6.3. Ahorro energético	39
6.3.1. A nivel de consumidor	40
6.3.1.1. Ahorro en consumo de potencia reactiva	40
6.3.1.2. Ahorro en pérdidas	41
6.3.1.3. Mejora del factor de potencia	46
6.3.2. Ahorro a nivel de compañía eléctrica	47
6.3.2.1. Ahorro en consumo de potencia reactiva	50
6.3.2.2. Ahorro en pérdidas	52
6.3.2.3. Mejora del factor de potencia	54
<b>Bibliografía</b>	<b>60</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Diferentes tarifas en baja tensión	4
Tabla 2. Término de facturación de energía reactiva	5
Tabla 3. Valor máximo, mínimo y media del consumo de potencia reactiva durante un año típico	38
Tabla 4. Estaciones del compensador ZeroCap	38
Tabla 5. Valores de QC en función de QE	39
Tabla 6. Datos cuantitativos de la instalación	42
Tabla 7. Pérdidas por efecto Joule durante un año en la vivienda	46
Tabla 8. Coeficiente de simultaneidad, según el número de viviendas	49
Tabla 9. Características eléctricas transformador MT/BT Ormazabal	50
Tabla 10. Pérdidas por efecto Joule durante un año en cuatro edificios de viviendas	54

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Diferentes opciones del contador inteligente	2
Figura 2. Velocidad de adopción de la digitalización en las distintas industrias	3
Figura 3. Consumo energético de electricidad en el sector residencial realizado en una muestra de 30 casas de voluntarios de nivel socioeconómico medio	7
Figura 4. Ciclo de refrigeración por compresión	8
Figura 5. Estructura de una lavadora eléctrica	9
Figura 6. Ciclo de un programa de lavado	9
Figura 7. Flujos de aire en una secadora remoto	10
Figura 8. Ciclo de un programa de lavado	11
3 Figura 9. Equipo climatización frío-calor, trabajando en régimen refrigeración	13
Figura 10. Analizador de red	13
Figura 11. Pantalla de inicio	14
Figura 12. Pantalla de configuración	14
Figura 13. Pantalla para configuración de pinzas amperimétricas	15
Figura 14. Pantalla para configuración del Factor de Escala	15
Figura 15. Pantalla de Selección del Tipo de Circuito	16
Figura 16. Pantalla para Selección de Valores Nominales	16
Figura 17. Configuración de Opciones Avanzadas	17
Figura 18. Pantalla para configuración intervalos de tiempo	17
Figura 19. Evolución de la intensidad y tensión del frigorífico	18
Figura 20. Evolución de la potencia activa, reactiva y aparente del frigorífico	19
Figura 21. Zoom de la evolución de la potencia aparente y el factor de potencia del frigorífico	19
Figura 22. Evolución de la intensidad y la tensión de la lavadora. Estado de funcionamiento corto	20
Figura 23. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia de la lavadora. Estado de funcionamiento corto	20
Figura 24. Evolución de la intensidad y tensión de la lavadora. Estado de funcionamiento largo	21
Figura 25. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia de la lavadora. Estado de funcionamiento largo	21
Figura 26. Evolución de la intensidad y tensión de la secadora	22
Figura 27. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia de la secadora	22
Figura 28. Evolución de la intensidad y tensión del lavavajillas. Estado de funcionamiento corto	23
Figura 29. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del lavavajillas. Estado de funcionamiento corto	24
Figura 30. Evolución de la intensidad y tensión del lavavajillas. Estado de funcionamiento largo	24



Figura 31. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del lavavajillas. Estado de funcionamiento largo	25
Figura 32. Evolución de la intensidad y tensión de la televisión	25
Figura 33. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del televisor	26
Figura 34. Evolución de la intensidad y tensión del climatizador. Funcionamiento en régimen de calefacción	27
Figura 35. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del climatizador. Funcionamiento en régimen de calefacción	27
Figura 36. Evolución de la intensidad y tensión del climatizador. Funcionamiento en régimen de refrigeración	28
Figura 37. Evolución de la potencia activa, reactiva y aparente del climatizador. Funcionamiento en régimen de refrigeración	28
5 Figura 38. Evolución del factor de potencia del climatizador. Funcionamiento en régimen de refrigeraciónConsumo Diario	30
Figura 39. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de primavera	30
Figura 40. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de primavera	31
Figura 41. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de primavera	31
Figura 42. Factor de potencia en el hogar durante un día de primavera	31
Figura 43. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de verano	32
Figura 44. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de verano	32
Figura 45. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de verano	33
Figura 46. Factor de potencia en el hogar durante un día de verano	33
Figura 47. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de otoño	34
Figura 48. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de otoño	34
Figura 49. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de otoño	35
Figura 50. Factor de potencia en el hogar durante un día de otoño	35
Figura 51. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de invierno	36
Figura 52. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de invierno	36
Figura 53. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de invierno	37
Figura 54. Factor de potencia en el hogar durante un día de invierno	37
Figura 55. ZeroCap en el sistema eléctrico residencial	39
Figura 56. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de primavera	40
Figura 57. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de verano	40
Figura 58. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de otoño	41
Figura 59. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de invierno	41
Figura 60. Intensidad consumida antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de primavera	43

Figura 61. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de primavera	43
Figura 62. Intensidad consumida antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de verano	44
Figura 63. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de verano	44
Figura 64. Intensidad consumida antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de otoño	44
Figura 65. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de otoño	45
Figura 66. Intensidad y potencia consumidas antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de invierno	45
Figura 67. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de invierno	45
Figura 68. Factor de potencia durante un día típico de primavera, antes y después de ZeroCap	46
Figura 69. Factor de potencia durante un día típico de verano, antes y después de ZeroCap	47
Figura 70. Factor de potencia durante un día típico de otoño, antes y después de ZeroCap	47
Figura 71. Factor de potencia durante un día típico de invierno, antes y después de ZeroCap	47
Figura 72. Esquema de red para bloque de viviendas	48
Figura 73. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de primavera	50
Figura 74. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de verano	51
Figura 75. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de otoño	51
Figura 76. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de invierno	51
Figura 77. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de primavera	52
Figura 78. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de verano	53
Figura 79. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de otoño	53
Figura 80. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de invierno	54
Figura 81. Factor de potencia durante un día típico de primavera en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap	55
Figura 82. Factor de potencia durante un día típico de verano en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap	55
Figura 83. Factor de potencia durante un día típico de otoño en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap	55
Figura 84. Factor de potencia durante un día típico de invierno en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap	56



# 1 INTRODUCCIÓN

---

La digitalización de los hogares se ha incrementado de manera notable durante las últimas décadas [1] y se prevé que este aumento continúe en los años venideros con el objetivo de brindar el más alto estándar de comodidad, calidad y ahorro energético a los usuarios.

Esta revolución digital únicamente se puede llevar a cabo mediante la integración en los hogares de nuevos dispositivos, herramientas y tecnologías tales como: contadores inteligentes, Internet de las cosas, domótica, energías renovables en la edificación, vehículos eléctricos... Estos nuevos dispositivos, además de permitir alcanzar los objetivos descritos anteriormente, pueden provocar un gran impacto en el sistema eléctrico que debería ser profundamente analizado.

Por un lado, el consumo eléctrico residencial ha presentado un mayor crecimiento respecto otros sectores, duplicándose cada 15 años aproximadamente [2] y las previsiones de futuro auguran un continuo aumento de la demanda eléctrica. Esto hará que los sistemas eléctricos de distribución actuales tengan que ser reforzados o explotados de manera diferente con el objetivo de abastecer estos grandes incrementos de consumos en tan cortos periodos de tiempo. [3]

Por otro lado, los dispositivos electrónicos distorsionan la red eléctrica. Éstos funcionan a frecuencias diferentes de las del sistema eléctrico (50 Hz) provocando la aparición de armónicos que reducen la eficiencia de la red eléctrica aumentando las pérdidas y el envejecimiento de los elementos de la red como motores y transformadores. Además, estos equipos electrónicos cuentan con filtros inductivos y capacitivos que intentan reducir el impacto del contenido armónico en la red pero que provocan una variación en los consumos de potencia reactiva de los hogares.

Considerando la información anterior y teniendo en cuenta que el sector residencial en España es el responsable del 25% del consumo eléctrico total [4] cabe hacer hincapié en la implantación de medidas de eficiencia energética, como la posible viabilidad del uso de compensadores de potencia reactiva en el sistema eléctrico del hogar.

Ante este escenario, en el cual las previsiones son de un aumento del consumo de potencia reactiva, este trabajo plantea el análisis del consumo de potencia reactiva de los diferentes dispositivos existentes en un hogar medio español. De esta forma, se pretende brindar una idea clara de la importancia de este tipo de potencia actualmente en los hogares.

## 1.1. Antecedentes

Desde el propio surgimiento de los sistemas eléctricos de corriente alterna durante la segunda mitad del siglo XIX, numerosos científicos advirtieron de los efectos nocivos del desfase de corriente y tensión producidos por la presencia de bobinas y capacitores en el sistema, caracterizados por la potencia reactiva. Esto motivó la introducción de dispositivos compensadores del efecto. [5]

La energía reactiva está presente en las instalaciones eléctricas debido a que ciertas máquinas eléctricas necesitan de ella para su funcionamiento. En general, siempre se habla de motores y transformadores por ser los principales elementos que están compuestos por un devanado eléctrico.

La importancia de la corrección de la energía reactiva en media y alta tensión es de vital importancia para la eficiencia de las redes de distribución, pues gracias a ella se consigue el factor de potencia óptimo, que reduce las pérdidas por efecto Joule, maximizando la capacidad de la red para la distribución de energía eléctrica.

En el caso de las viviendas unifamiliares existen electrodomésticos y dispositivos que consumen reactiva, no obstante, actualmente este consumo se considera despreciable o muy pequeño en relación con el restante consumo. Por ello, para las compañías distribuidoras no ha resultado rentable medirlo y, por consiguiente, cobrar su exceso.

La factura eléctrica, sin embargo, cambia para siempre de acuerdo con la Orden Ministerial ITC/3860/2007 o “Plan de sustitución de equipos de medida”, la cual establece que los suministros con hasta 15 kW de potencia contratada deberán ser sustituidos por nuevos equipos que permitan la discriminación horaria y la telegestión antes de la fecha 31 de diciembre de 2018.

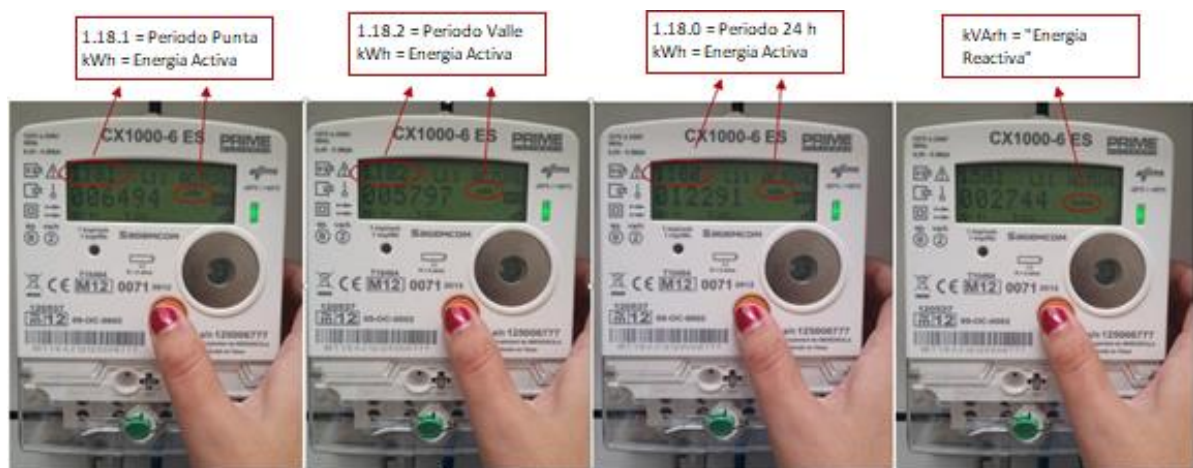


Figura 1. Diferentes opciones del contador inteligente

Gracias a la tecnología, los nuevos contadores inteligentes ofrecen un control absoluto sobre la energía: recogen con exactitud el consumo, hora a hora, día a día, y envían todos los datos de manera automática. Los nuevos contadores permiten por primera vez el acceso a la información de consumo de potencia activa, reactiva y aparente. En la Figura 1 se muestran algunas de las opciones mencionadas que este dispositivo es capaz de facilitar.

## 1.2. Motivación e hipótesis

La digitalización dirige de manera radical la estrategia de industrias y está cambiando el terreno de los modelos de negocio. Múltiples sectores compiten en la actualidad para implementar las nuevas prestaciones digitales en sus negocios. La innovación está en la agenda de todas las organizaciones.

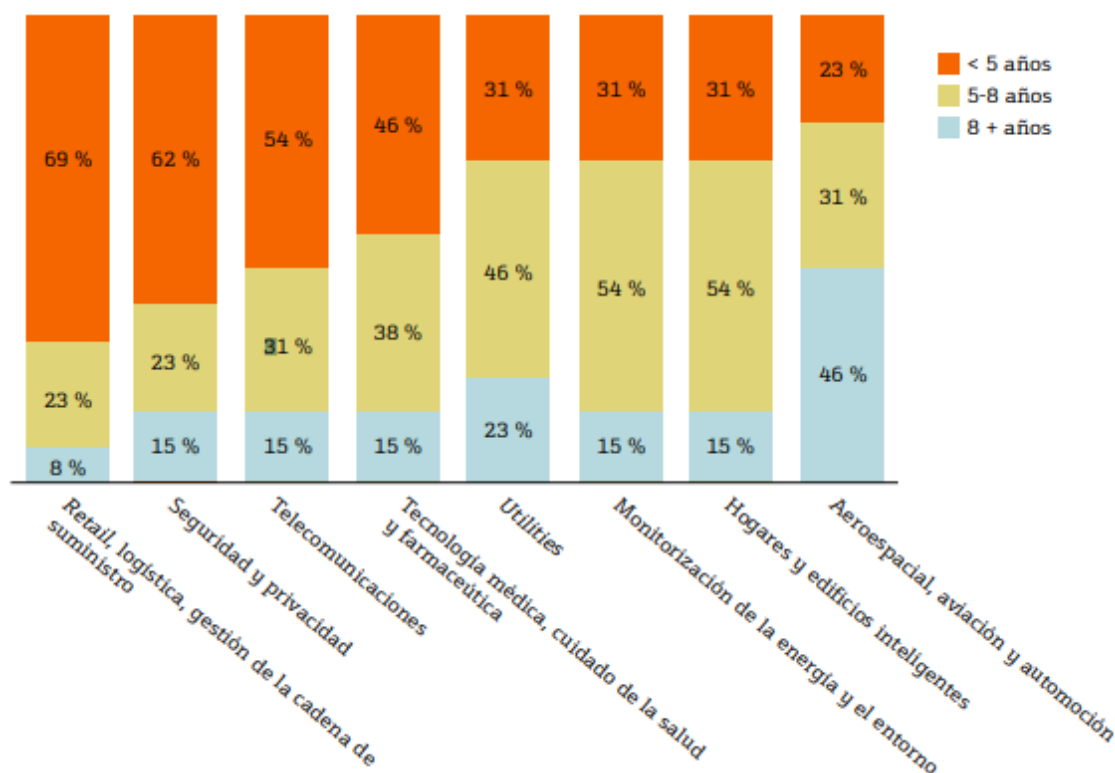


Figura 2. Velocidad de adopción de la digitalización en las distintas industrias. Fuente [6]

Cada vez es más frecuente encontrarse con nuevos dispositivos capaces de conectarse a Internet y permitir al usuario un control y manejo de forma remota desde cualquier parte del mundo. La Figura 2 muestra cómo el sector residencial pretende adoptar esta nueva tecnología en un periodo de menos de 8 años. Con la irrupción de la digitalización en el hogar se abre una enorme ventana de oportunidades para la creación de aplicaciones en las áreas de la automatización, el uso de sensores y la comunicación entre máquinas. De hecho, las posibilidades son casi infinitas. Dentro del sector doméstico se pueden destacar tres aplicaciones:

**Electrodomésticos Inteligentes:** Son versiones conectadas de los clásicos dispositivos de uso doméstico que aprovechan los sensores y la conexión para facilitar su uso y ofrecer nuevas posibilidades a los usuarios. Actualmente ya existen alternativas comerciales entre las cuales las televisiones *smart* son las más conocidas. Como ejemplo, un refrigerador que controle los productos que contiene y pueda determinar la escasez o falta de los productos para elaborar automáticamente la lista para el supermercado, pudiendo enviarla a los smartphones o incluso realizar directamente la orden de compra online al supermercado de preferencia. [7]

**Control y Automatización de los sistemas del hogar:** Una de las posibilidades novedosas es que se pueden controlar los mismos dispositivos remotamente y programar su funcionamiento a través, por ejemplo, de los smartphones. Por ejemplo, las luces y persianas de la casa pueden activarse o desactivarse cuando el sol se oculte o si el tiempo está muy nublado; el aire acondicionado en cada habitación puede ajustarse a la temperatura preferida del miembro de la familia que en ella se encuentre; la calefacción puede encenderse antes de nuestro horario de llegada del trabajo, etc. [7]

**Monitorización del estado de la casa:** Podemos estar actualizados en tiempo real sobre toda la información relacionada al estado de objetos conectados en el hogar: podemos saber si las luces están encendidas, si hemos dejado el fuego encendido en la cocina, si hay una alarma de humo activa, a qué temperatura se encuentra cada sector de la casa o visualizar imágenes del circuito cerrado desde cualquier ubicación. [7]

La implementación y penetración de esta tecnología constituyen sin embargo un proceso considerablemente gradual que debe ir superando ciertos obstáculos como son: la tecnología disponible, los costes, el tamaño y diseño visual, la cantidad de energía necesaria, la infraestructura de la red, la seguridad y la privacidad, el medio ambiente... [7] Entre las diferentes áreas de desafío a las que debe enfrentarse la revolución digital, en este trabajo se destaca el impacto que supone en la red el consumo de potencia reactiva debido al uso masificado de todo tipo de electrónica. A medida que los aparatos analógicos son sustituidos por dispositivos digitales, compuestos en su mayoría por electrónica, los consumos de potencia reactiva varían y, por tanto, el factor de potencia de los domicilios. Este fenómeno ha pasado desapercibido a nivel del consumidor, al no reflejarse en la factura eléctrica. Sin embargo, el aumento que se prevé en el consumo de potencia en los hogares hará que la potencia reactiva empiece a ser un término a tener en cuenta por las compañías eléctricas en el futuro. Se podría llegar incluso a penalizar por este tipo de potencia del mismo modo que ocurre en la industria. Se deberá considerar, además, que los dispositivos electrónicos en las viviendas tales como routers, Smart TV, ordenadores, etc., presentan un consumo de potencia reactiva incluso cuando éstos se encuentran en stand-by y que habrá que cuantificar para estudiar su impacto.

### 1.3. Normativa

Para tener una idea clara de cómo repercute económicamente el consumo de potencia reactiva conviene entender la tarificación vigente española mediante la cual se factura este tipo de potencia.

La penalización por consumo de energía reactiva viene contemplada en el BOE, concretamente en la orden ITC 1723/2009, en el artículo 9.3 del RD 1164/2001.

Para el objeto de estudio, este trabajo se centra en las tarifas de baja tensión por ser éstas las que se dan en el sector residencial. Las tarifas de baja tensión se aplicarán a los suministros efectuados a tensiones no superiores a 1 kV y son las siguientes:

Tabla 1. Diferentes tarifas en baja tensión

Tarifa de acceso	Baja Tensión
	Hasta 10 kW
2.0A	Tarifa común en la mayoría de hogares con un solo periodo de facturación (24 horas mismo precio)
2.0DHA	Tarifa común en muchos hogares con discriminación horaria de dos periodos (punta y valle)
2.0DHS	Tarifa con tres periodos únicamente recomendable para usuarios con coches eléctricos
	De 10 kW a 15 kW
2.1A	Tarifa común para viviendas grandes o pequeños negocios
2.1DHA	Tarifa común para viviendas grandes o pequeños negocios con discriminación horaria de dos periodos (punta y valle)
2.1DHS	Tarifa con tres periodos para viviendas grandes (recomendable para coches eléctricos)
	Más de 15 kW
3.0A	Empresas con más de 15 kW de potencia contratada en baja tensión. Discriminación de tres periodos horarios

Para la vivienda media actual, es decir, en suministros con tarifas de acceso 2.0A, 2.0DHA, 2.1A y 2.1DHA sólo es de aplicación la facturación de “energía reactiva” si se midiera un consumo de ésta durante el período de facturación superior al 50 por 100 de la energía activa consumida durante el mismo. En la actualidad no es común que se facture la energía reactiva puesto que estos niveles no se alcanzan fácilmente.

En caso de superarse este límite, para las tarifas de baja tensión, el precio del kVArh depende del valor del factor de potencia y viene recogido en la siguiente tabla:

Tabla 2. Término de facturación de energía reactiva. Fuente: Artículo 9.3 del Real Decreto 1164/2001

Cosφ	Euro/kVArh
Cosφ < 0,95 y hasta cosφ = 0,90	0.000013
Cosφ < 0,90 y hasta cosφ = 0,85	0.017018
Cosφ < 0,85 y hasta cosφ = 0,80	0.034037
Cosφ < 0,80	0.051056

## 1.4. Objetivo

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos de este trabajo en coherencia con la motivación e hipótesis planteada.

### 1.4.1. Objetivo general

El objetivo general que se pretende alcanzar es el de estimar el consumo de potencia reactiva actual en el sector residencial y brindar así una idea de la importancia de este tipo de consumo con respecto al consumo total. Para ello, se caracterizará el consumo de los electrodomésticos de un hogar típico. A partir de los consumos de los electrodomésticos se simulará el perfil de consumo eléctrico total de una vivienda en las diferentes estaciones del año; primavera, verano, otoño e invierno, para el clima de la ciudad de Sevilla.

Además, se pretende analizar el ahorro energético que se podría llegar a alcanzar si se estableciera el uso de compensadores, primero en la vivienda, posteriormente en un bloque de pisos y a nivel general en una ciudad. Por último, se valorará qué posibles actores resultarían beneficiados de aplicar esta medida de ahorro (consumidor, comercializadora, distribuidora, etc.).

### 1.4.2. Objetivos específicos

Para la consecución del objetivo general se plantean una serie de objetivos específicos. En primer lugar, se pretende registrar los consumos de tensión intensidad, potencia activa, reactiva y aparente, y factor de potencia de los diferentes electrodomésticos. Todo ello mediante el analizador de red DRANETZ PX5 XFAST. Una vez obtenidos los datos necesarios se procederá al estudio y análisis de éstos mediante las curvas de consumo obtenidas. Con las curvas de consumo de los electrodomésticos se generará un perfil de consumo de la vivienda de cuatro días tipo distribuyendo el uso de cada electrodoméstico a lo largo de las veinticuatro horas. Cada día tipo corresponderá a una estación diferente: primavera, verano, otoño e invierno. A partir de los perfiles de consumo diarios se evaluará la potencia consumida en los diferentes días, así como la importancia de la potencia reactiva con respecto a la potencia activa.

Para el análisis de la medida de ahorro, en primer lugar, se configurará un compensador de potencia. El compensador se compondrá de una pequeña batería de condensadores con diferentes escalones. Se obtendrán



los perfiles de consumo de la vivienda y el bloque de pisos antes y después de la instalación del compensador y se evaluará el ahorro obtenido y la eficacia del compensador.

## 2 CARGAS DE ALTO CONSUMO

El comportamiento de las cargas eléctricas en el hogar depende de factores como: el tiempo de trabajo, las condiciones técnicas, la marca del equipo y las condiciones de uso. [8] Las cargas tenidas en cuenta en este trabajo fueron aquellas de mayor consumo en el hogar y que en su conjunto componen a grosso modo el consumo total de un hogar típico en la actualidad. En este capítulo se describe el funcionamiento básico de cada una de ellas.

### 2.1. Frigorífico

El frigorífico o nevera es la carga de más alto consumo energético en el hogar [2], tal y como se muestra en la Figura 3. Su función es la de mantener los alimentos contenidos en su interior a una determinada temperatura.

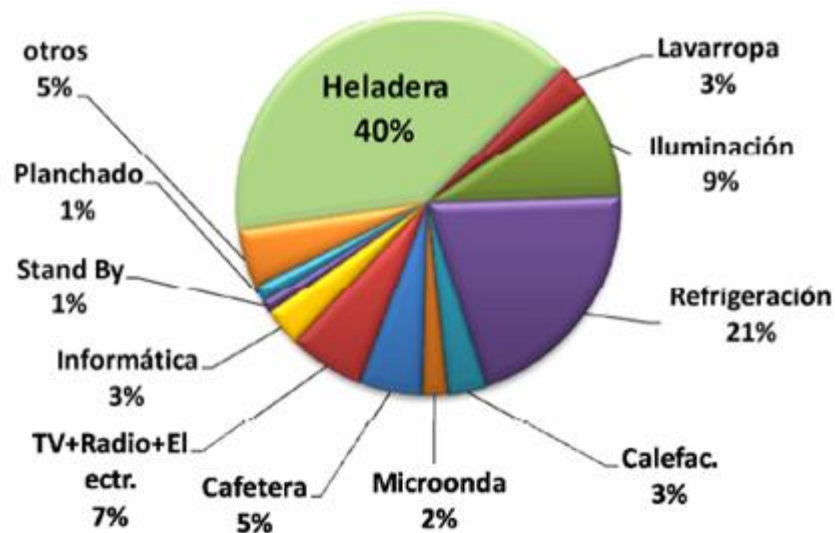


Figura 3. Consumo energético de electricidad en el sector residencial realizado en una muestra de 30 casas de voluntarios de nivel socioeconómico medio. Fuente [2]

#### 2.1.1. Funcionamiento

El objetivo principal de un frigorífico es el de extraer calor de su interior para enfriar el contenido de éste. El sistema consiste en un circuito cerrado formado por dos serpentines cuya misión será condensar y evaporar un fluido. Los dos serpentines están unidos entre sí mediante un compresor y una válvula de expansión según la Figura 4. Por el sistema de serpentines circula un líquido refrigerante que absorbe el calor del frigorífico y lo expulsa hacia el exterior.

El ciclo comienza cuando el gas refrigerante sale del serpentín evaporador; es decir, el serpentín situado en el interior del frigorífico, y se introduce en el compresor. Este dispositivo se encarga de aportar energía al gas, aumentando su presión y temperatura, tal y como se observa en el proceso 1-2 de la gráfica en la Figura 4.

Gracias a este aumento de presión y temperatura, el gas refrigerante se convierte en líquido y, al atravesar el serpentín exterior, cede su calor a la atmósfera a través de las paredes del tubo condensador. Se trata del proceso 2-3.

Posteriormente, durante el proceso 3-4, el líquido refrigerante atraviesa la válvula, disminuyendo su presión y pasando de un estado de más alta presión y temperatura a uno de menor presión y temperatura. El líquido refrigerante, a baja presión y temperatura, al entrar en el serpentín interior se evaporará debido a la disminución de presión y al calor que recoge de los elementos del frigorífico, reduciendo la temperatura interior de éste. De esta manera se cierra el ciclo con el paso del estado 4 al estado 1.

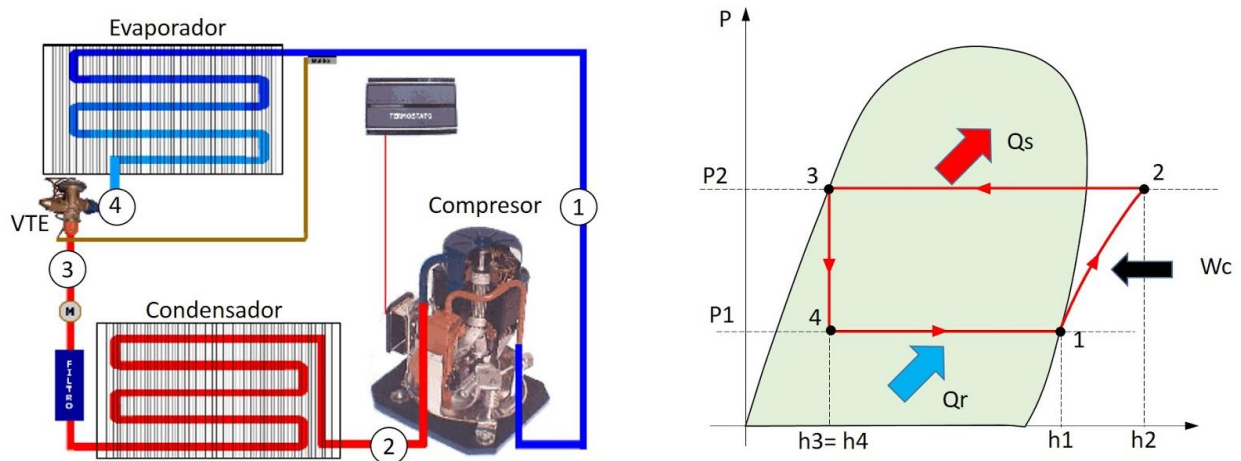


Figura 4. Ciclo de refrigeración por compresión

Este ciclo se repite constantemente hasta que el termostato dé la orden de parada al compresor, momento en que el frigorífico habrá alcanzado la temperatura deseada y el líquido dejará de fluir por el sistema. En este estado de stand-by del frigorífico el consumo es prácticamente nulo. Una vez que la temperatura del interior del frigorífico aumenta por encima de la temperatura de consigna el termostato vuelve a dar la orden de consecución de los ciclos. El consumo pasa a ser considerable durante este periodo, consecuencia del funcionamiento de la válvula y el compresor.

## 2.2. Lavadora

La lavadora es un electrodoméstico electromecánico usado para el lavado de la ropa. Alguna de sus características más importantes son: el consumo de energía, el ahorro de agua, los niveles de vibración y ruido. [8]

### 2.2.1. Funcionamiento

El funcionamiento básico de una lavadora consiste en activar un motor que mezcla en el interior de un tambor giratorio el agua, la ropa y los detergentes. En la Figura 5 se observan las diferentes partes internas que hacen posible el funcionamiento de la lavadora.

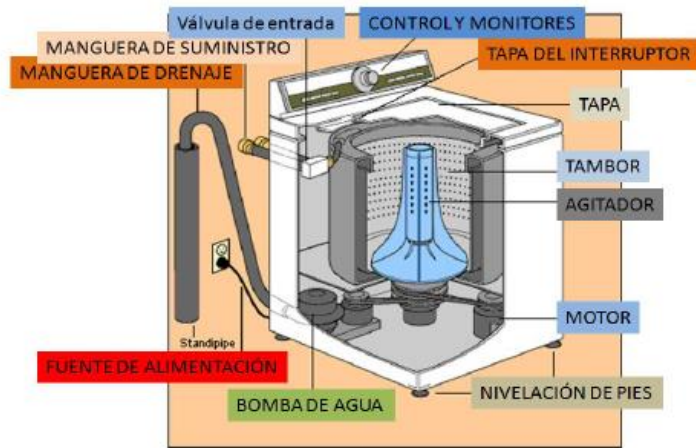


Figura 5. Estructura de una lavadora eléctrica. Fuente [8]

Un conmutador controla la entrada de energía que recibe el motor y el conmutador es a su vez controlado por un microprocesador, el cual almacena las diferentes opciones de lavado. Cuando el motor se activa se producen una serie de contactos entre el motor, el microprocesador, las válvulas de entrada y salida de agua que desarrolla las etapas de lavado.

Aunque un ciclo de lavado puede presentar variaciones dependiendo del programa seleccionado, se pueden identificar tres fases principales en el programa de una lavadora:

- 1 Lavado (Aporte de agua y calor).
- 2 Aclarado (Aporte de agua).
- 3 Centrifugado.

Estas fases del lavado se representan en la Figura 6. Se observa cómo varían los niveles del consumo de agua y energía de cada fase.

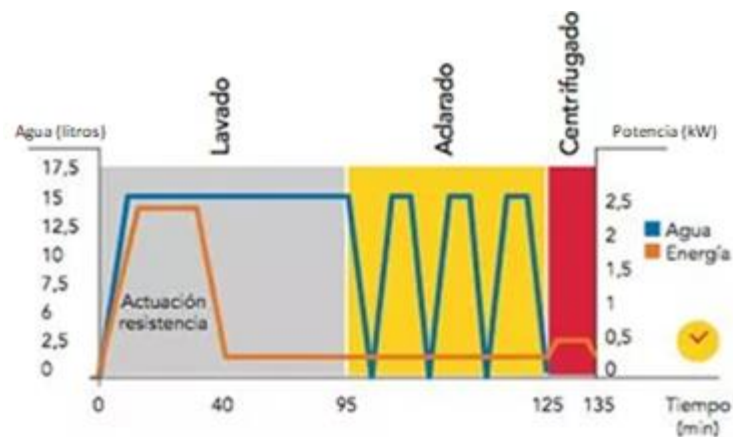


Figura 6. Ciclo de un programa de lavado. Fuente [8]

El mayor consumo se da en la fase de lavado al actuar las resistencias eléctricas para calentar el agua mediante efecto Joule. La cantidad de energía que se consume dependerá por tanto de la temperatura seleccionada en el programa de lavado, la temperatura del agua de aporte de red y de la cantidad de agua a calentar.

## 2.3. Secadora

La secadora eléctrica es el electrodoméstico que nos permite el secado de la ropa posterior al lavado de ésta. Con los últimos avances logrados en eficiencia energética en otros electrodomésticos se ha vuelto más importante reducir el consumo de energía de las secadoras de ropa, que representa el 8.6% de la energía promedio consumida en un hogar. [10][11]

### 2.3.1. Funcionamiento

El funcionamiento básico consiste en introducir aire calentado de una manera forzada dentro del tambor giratorio de capacidad variable, en el cual la ropa húmeda va dando vueltas lentamente. [8]

En la Figura 7 se ilustra el funcionamiento, así como las principales estructuras que participan en el ciclo del aire. En ella se observa el primer proceso del ciclo, en el cual el aire exterior al entrar pasa a través de la fuente de calor o calentador remoto, aumentando su temperatura. El aire seco y caliente se introduce en el tambor en movimiento, donde se humedece absorbiendo el agua de la ropa húmeda. Por último el aire húmedo se expulsa por succión del aire, mediante un ventilador.

En la secadora, la fuente de calor o calentador es la responsable de más del 80% de la energía consumida. [11]

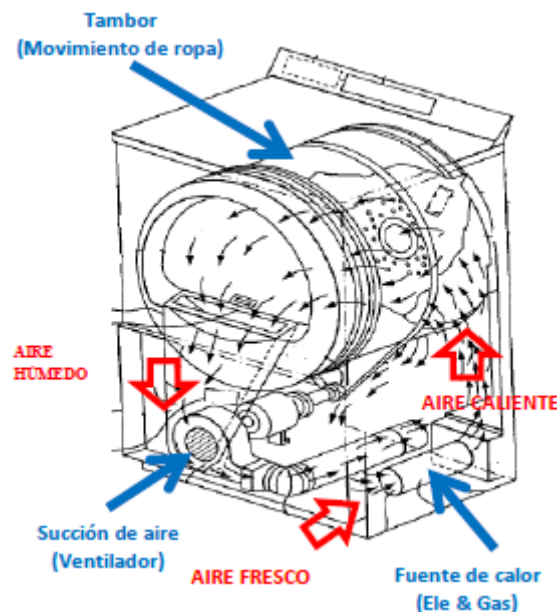


Figura 7. Flujos de aire en una secadora remoto. Fuente [10]

## 2.4. Lavavajillas

El uso del lavavajillas ha supuesto un ahorro de agua y energía frente al lavado a mano. No obstante, es difícil encontrar datos reales sobre ahorro en el consumo eléctrico.

### 2.4.1. Funcionamiento

Un ciclo de lavado básico incluye una fase de prelavado, un lavado con agua caliente, un periodo de aclarado y finalmente el secado. El tiempo que dura el ciclo completo es de aproximadamente una hora y media. Los tiempos de cada fase que compone el ciclo dependen del equipo y del programa seleccionado.

Si observamos el programa de lavado que se muestra en la Figura 8, del consumo total que supone un ciclo de lavado del lavavajillas, los mayores consumos de energía se producen en aquellas fases en las que hay aporte de energía al agua para calentar, lo que se realiza mediante el efecto Joule a través de resistencias. En el resto de las fases, el consumo de energía se emplea en abrir y cerrar válvulas, arrancar los motores de impulsión y la bomba de desagüe.



Figura 8. Ciclo de un programa de lavado. Fuente Proconingenieros

## 2.5. Televisión

A medida que la tecnología ha avanzado las señales han pasado de ser analógicas a digitales con las televisiones plasma, LCD y LED. Las previsiones indican que el LED es la tendencia que sigue el mercado.

### 2.5.1. Funcionamiento

La televisión produce una serie de diminutos puntos en la pantalla que, cuando se ven en su conjunto, parecen formar una imagen. Las televisiones más antiguas dependen de un tubo de rayos catódicos para producir imágenes y operar con una señal analógica mientras que las pantallas plasma están formadas por celdas de gases nobles emisores de luz. Las pantallas LCD y las LED están fabricadas con cristal líquido que divergen en la forma en que retroiluminan la imagen.

La principal diferencia entre televisores LCD y LED sería que los primeros utilizan lámparas fluorescentes, situadas en la parte superior e inferior, mientras las teles LED toman su nombre de la fuente de luz usada.

## 2.6. Climatización

La climatización constituye la carga de mayor consumo en potencia. En los hogares españoles es el responsable del 47% del consumo total de energía. [6]

### 2.6.1. Funcionamiento

El ciclo de refrigeración simple se compone de cuatro procesos fundamentales. En régimen de calefacción el ciclo es el inverso.

**Expansión:** El refrigerante está en estado líquido en la unidad exterior a alta presión. Es enviado a la unidad interior y, para conseguir el efecto de refrigeración, se manda a través de un elemento de expansión. Con ello se consigue reducir la presión y la temperatura del líquido, dejándolo con las condiciones óptimas para la operación.

**Evaporación:** En el evaporador (dentro de la unidad interior), el líquido se evapora, extrayendo calor del aire del local a climatizar (impulsado por un ventilador). Todo el refrigerante se evapora en el evaporador y como resultado se obtiene gas.

**Compresión:** Este gas vuelve a la unidad exterior para convertirse, de nuevo, en líquido. El primer paso es comprimir el gas. Esta operación se efectúa en el compresor obteniendo gas a alta presión.

**Condensación:** El vapor a alta presión circula a través del condensador. Se evacua el calor al exterior y se obtiene el refrigerante en estado líquido.

El ciclo descrito se ilustra en la Figura 9:

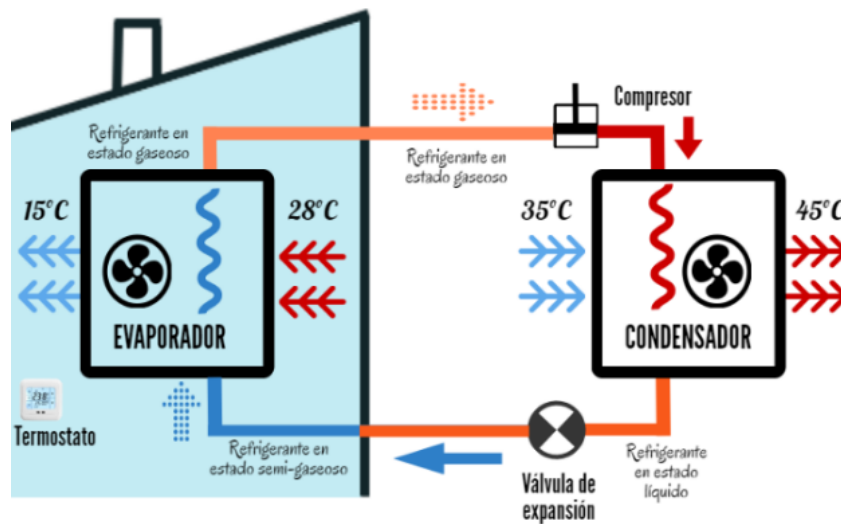


Figura 9. Equipo climatización frío-calor, trabajando en régimen refrigeración. Fuente: Daikin Europe

## 3 HERRAMIENTAS Y SOFTWARES

---

En este capítulo se indican y se describen las herramientas empleadas para la toma de datos de los electrodomésticos mencionados y los programas con los que se gestionan los datos medidos para la configuración de las curvas.

### 3.1 Analizador de red

Para la obtención de datos se emplea el analizador de red DRANETZ PX5 XFAST, mostrado en la Figura 10. El dispositivo registra los datos de tensión, intensidad, potencias y factor de potencia. Esta información se guarda en una tarjeta de memoria cuya información se traspa al ordenador a través de un adaptador de fibra óptica. El analizador incluye unas pinzas de tensión, cables de conexión y pinzas amperimétricas.



Figura 10. Analizador de red

#### 3.1.1. Configuración

La configuración se lleva a cabo a través de la pantalla táctil. En la pantalla principal se inicia con la opción start/setup, que se puede observar en la Figura 11.



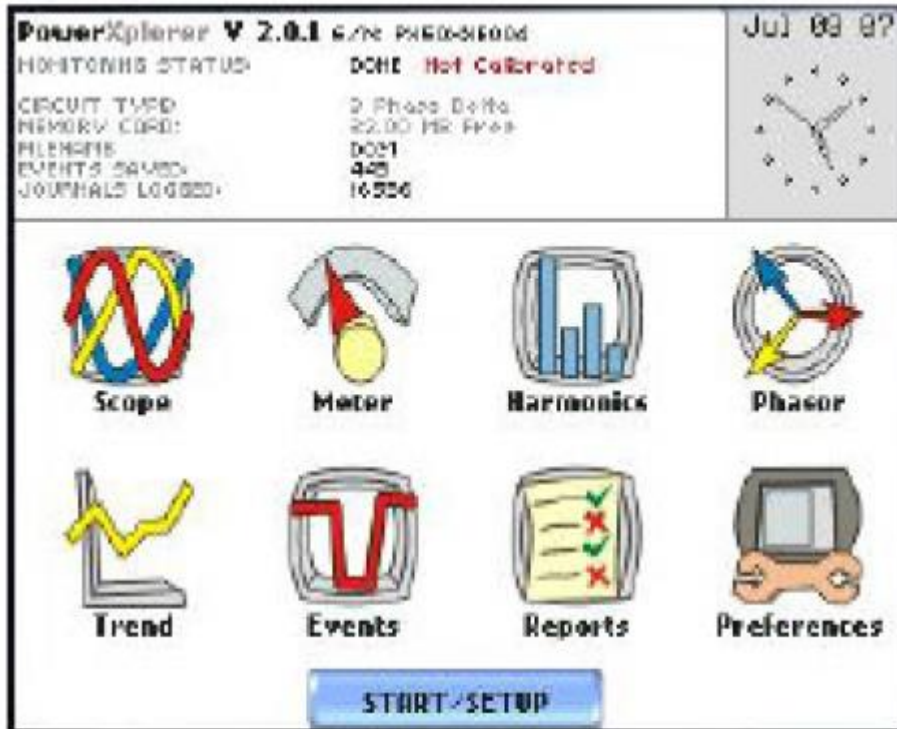


Figura 11. Pantalla de inicio. Fuente: [19]

En la siguiente pantalla, Figura 12, se selecciona la opción Wizard setup, para la configuración paso a paso.



Figura 12. Pantalla de configuración. Fuente: [19]

A continuación, se da paso a una pantalla que da la opción de configurar las pinzas amperimétricas o en su defecto el rango de intensidad en el que se trabajará.

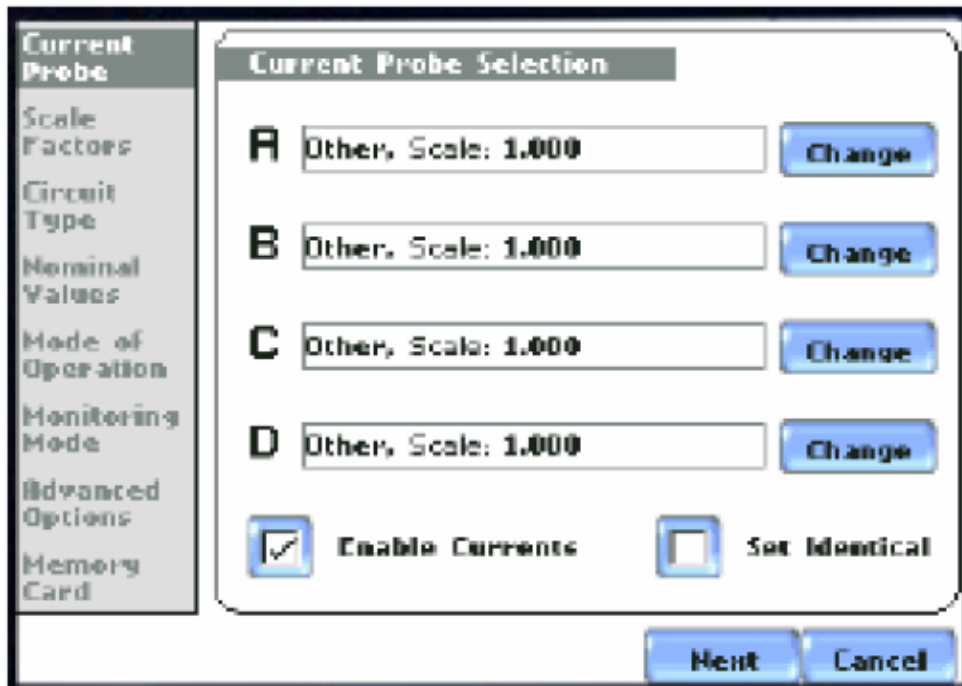


Figura 13. Pantalla para configuración de pinzas amperimétricas. Fuente: [19]

La Figura 14 muestra la configuración del factor de escala tanto para las pinzas amperimétricas como para las medidas de tensión.

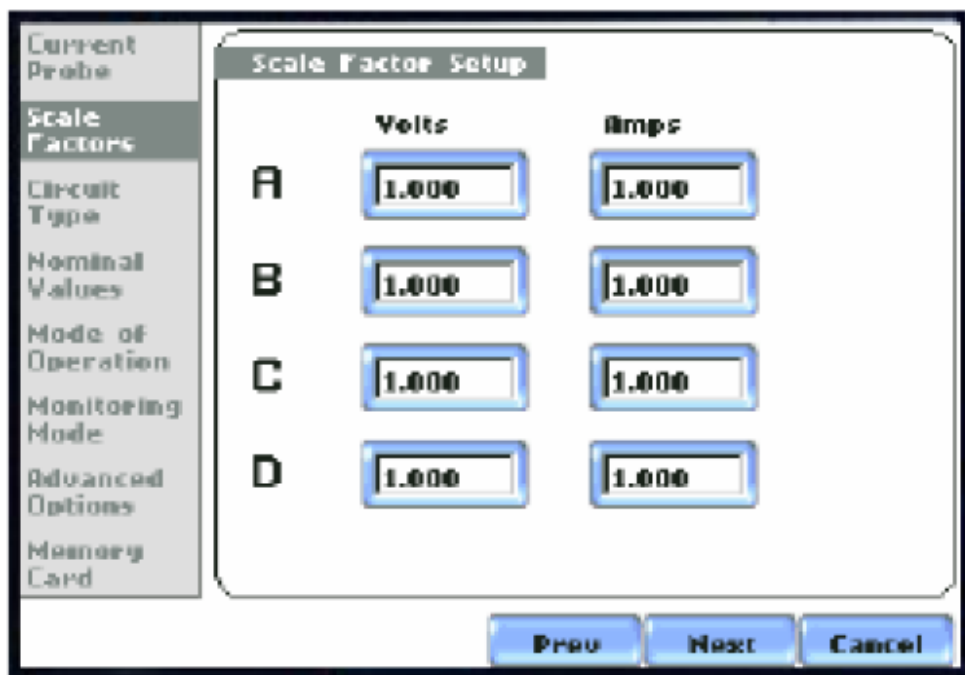


Figura 14. Pantalla para configuración del Factor de Escala. Fuente [19]

La pantalla que aparece a continuación permite la selección del tipo de circuito. El montaje eléctrico debe hacerse tal y como aparece en el esquema para que las medidas sean correctas. La conexión que muestra la Figura 15 es trifásica pero la que se ha llevado a cabo es monofásica.

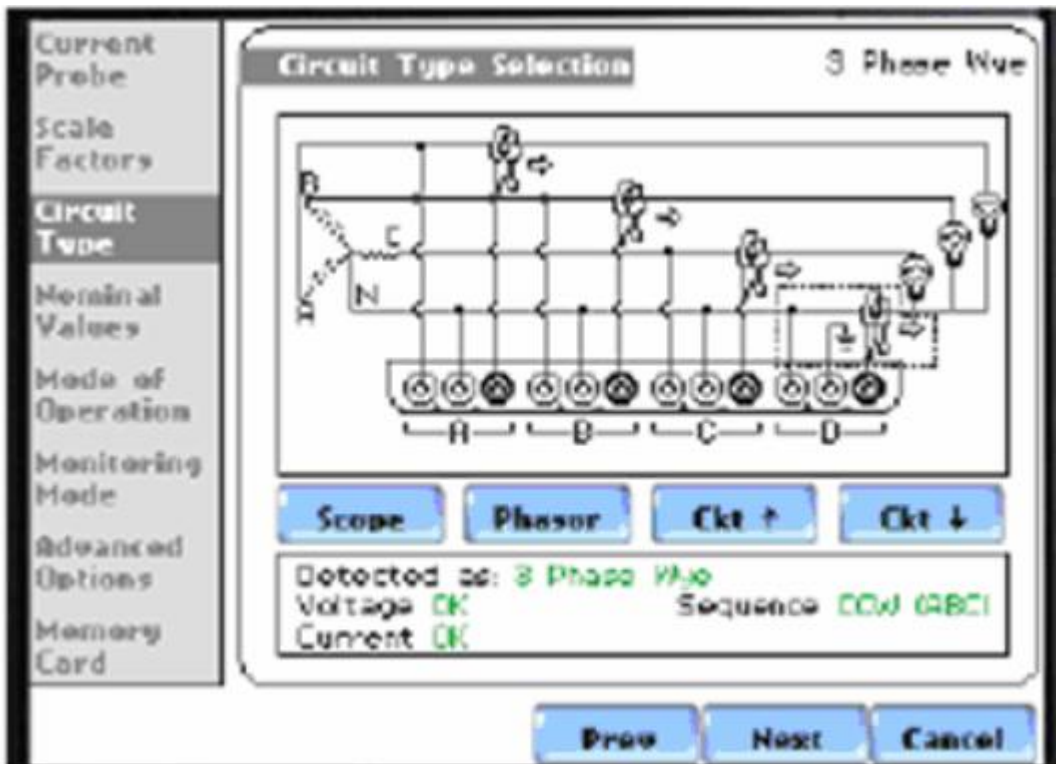


Figura 15. Pantalla de Selección del Tipo de Circuito

Posteriormente, se seleccionan los valores de frecuencia, tensión e intensidad nominales, mostrados en la Figura 16.

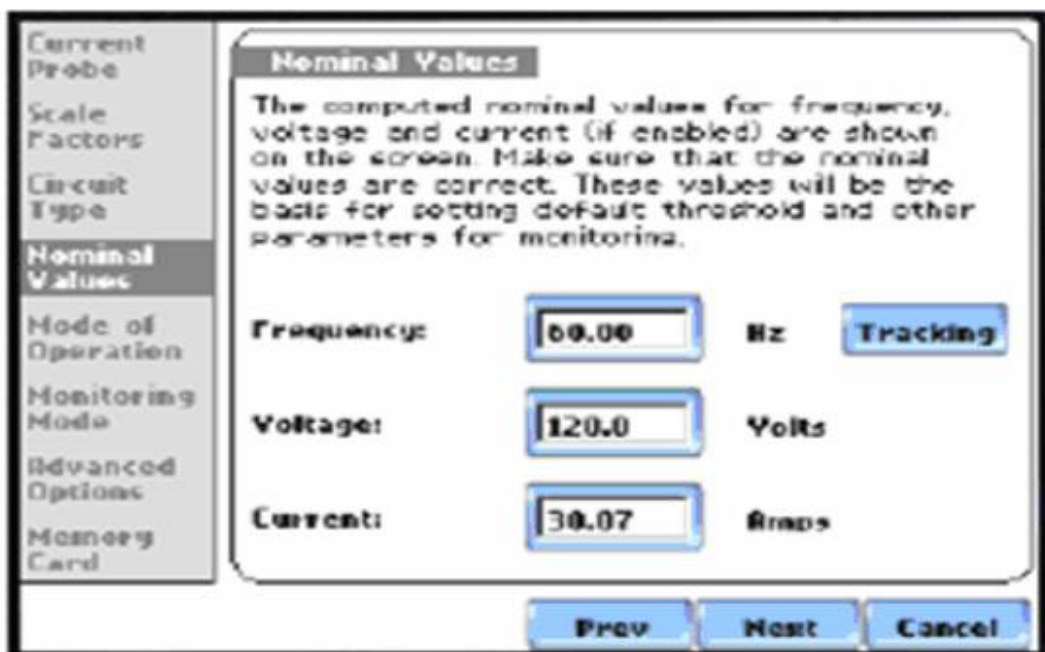


Figura 16. Pantalla para Selección de Valores Nominales. Fuente: [19]

En la pantalla de opciones avanzadas, Figura 17, seleccionamos la opción “WaveForm Capture” para que el analizador registre las ondas de voltaje, intensidad, factor de potencia, potencia activa, reactiva y aparente (opción “Power Values (RMS, Watts, VA...)” de la Figura 18) y tome los datos según el intervalo de tiempo indicado. En este caso, el analizador registra datos **cada segundo en el caso de la climatización**, cada **30 segundos en el caso del frigorífico**, y cada **10 segundos en el resto de los casos**. [9]

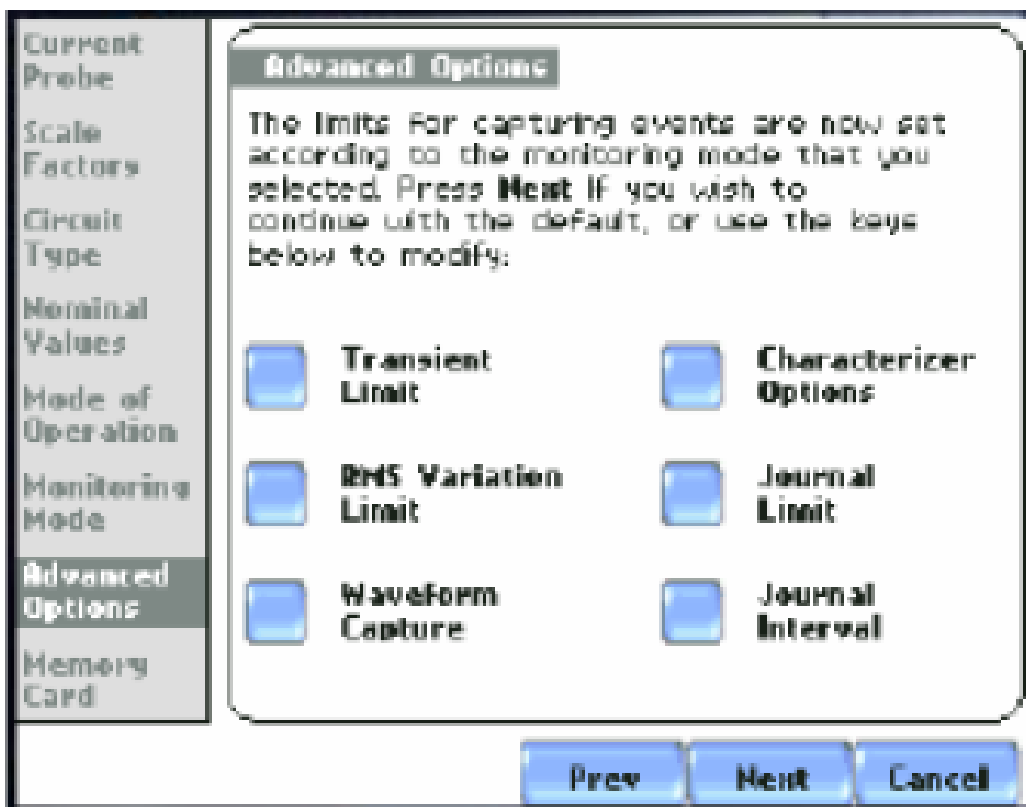


Figura 17. Configuración de Opciones Avanzadas. Fuente: [21]

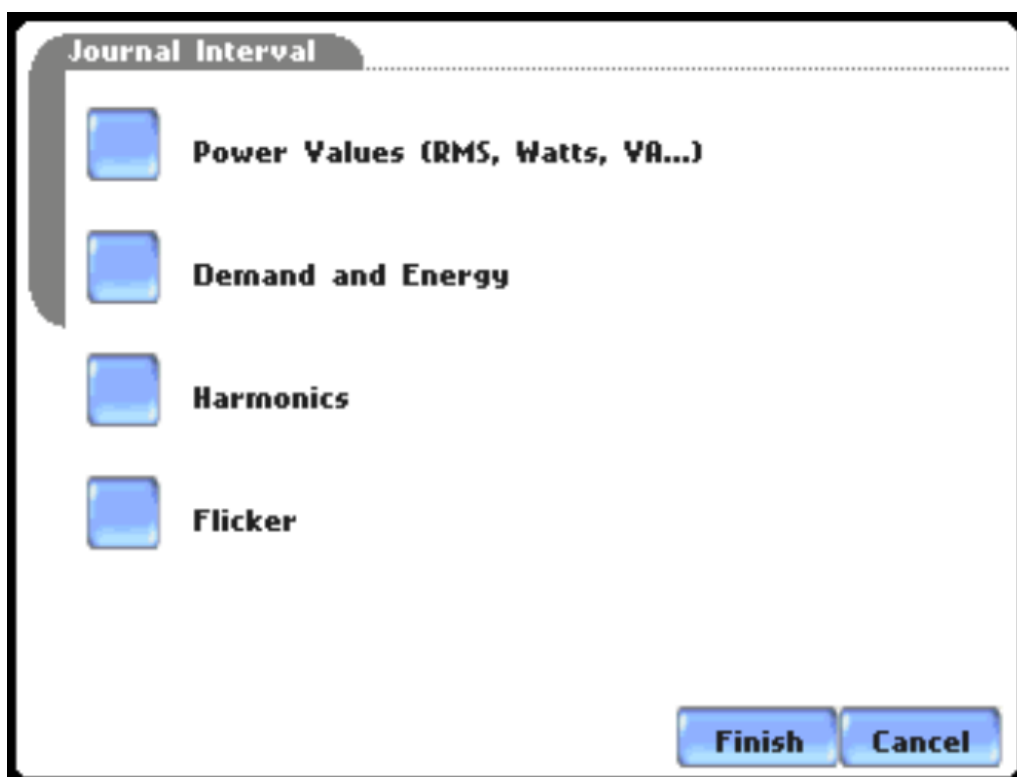


Figura 18. Pantalla para configuración intervalos de tiempo. Fuente [21]

# 4 CARACTERIZACIÓN DE CURVAS DE CARGAS DE ALTO CONSUMO

El analizador de red se ha empleado para la obtención de las diferentes medidas de cada electrodoméstico por separado. De cada electrodoméstico se ha obtenido la intensidad, la tensión, la potencia activa, reactiva y aparente, y el factor de potencia. Estos datos se muestran en forma de gráficas que muestran la evolución de dichos parámetros. En las gráficas el eje de abscisas se corresponde con las horas en la cuales se realizó la medición. A continuación se presentan los datos obtenidos.

## 4.1. Frigorífico

El frigorífico es un electrodoméstico cuyo funcionamiento se da las 24 horas del día, los 365 días del año por lo general. En las gráficas propuestas se describe la evolución de la intensidad, la tensión, potencias y factor de potencia durante 24 horas. En la Figura 19 se observa que la tensión tiene una evolución apenas variable, sus valores se mantienen alrededor de los 227 voltios. En el caso de la intensidad, sin embargo, se trata de un funcionamiento cíclico. Cada ciclo se compone de una fase de arranque de unos pocos segundos en la que la intensidad alcanza los 10 A. Después de la fase de arranque el frigorífico comienza a funcionar haciendo circular el refrigerador y disminuyendo la temperatura del interior hasta que se alcanza la temperatura de consigna. Durante este período se registra una intensidad de 0,8 A aproximadamente. Una vez alcanzada la temperatura de consigna, la intensidad vuelve a valores prácticamente nulos. Cabe decir que, durante el tiempo en el que se tomaron las medidas, el frigorífico no fue abierto en ningún momento, de ahí el perfil puramente cíclico.

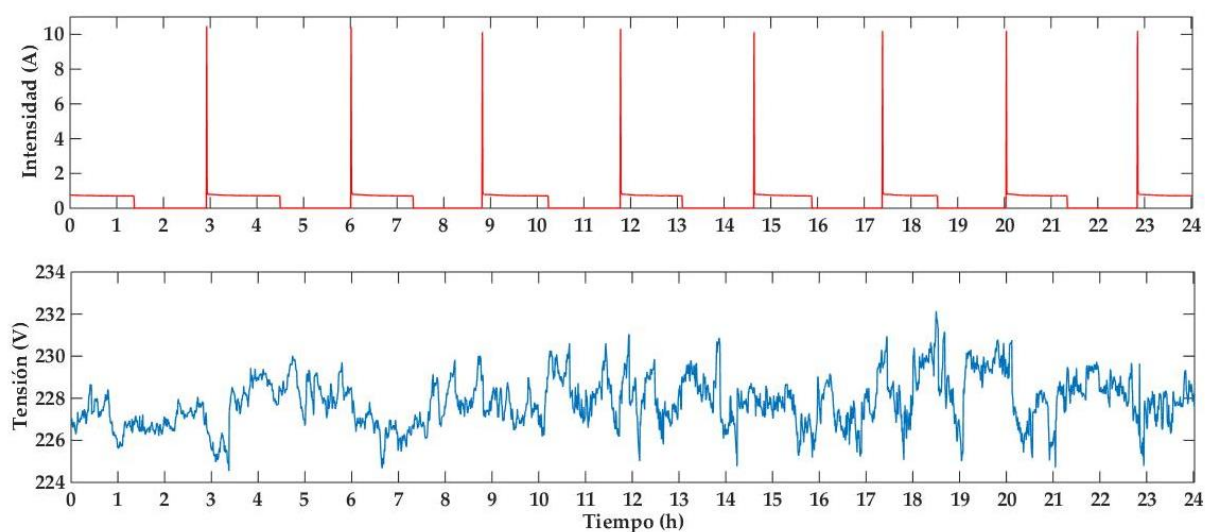


Figura 19. Evolución de la intensidad y tensión del frigorífico

Las Figura 20 y la Figura 21 muestran el perfil de consumo de potencia activa, reactiva y aparente, y el factor de potencia. Estos parámetros mantienen un perfil de consumo similar al de la intensidad. Nótese que el pico en

el consumo no se da en uno de los ciclos en el caso de las potencias y el factor de potencia. Esto es debido a que el registro de datos no es continuo, sino cada 30 segundos en este caso y, al durar esta fase unos pocos segundos, no ha sido registrada.

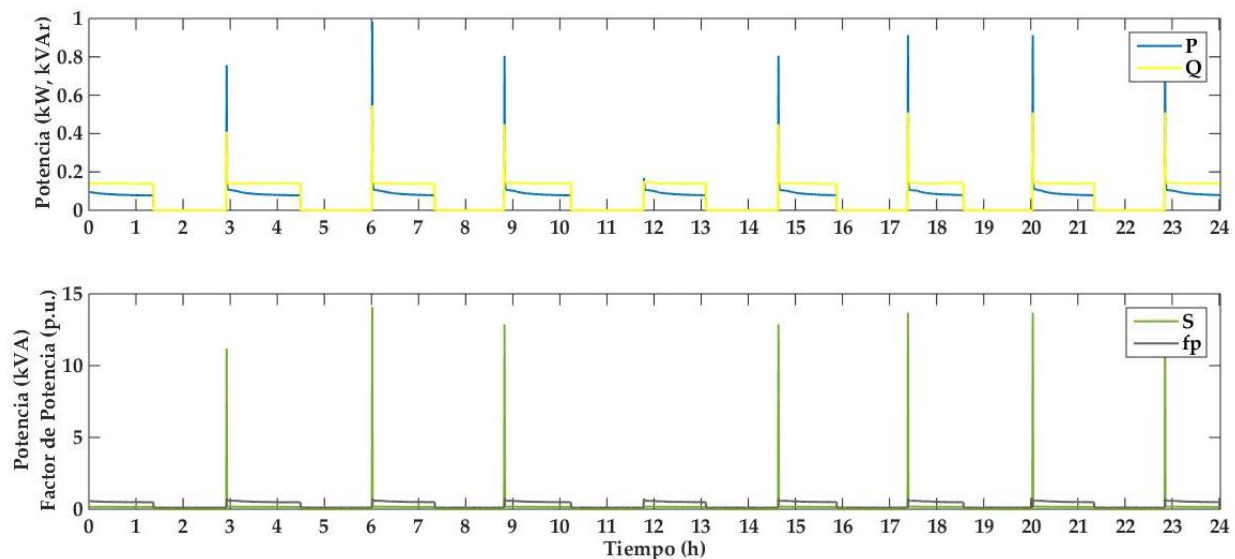


Figura 20. Evolución de la potencia activa, reactiva y aparente del frigorífico

En el caso del factor de potencia, durante el periodo de refrigeración, éste comienza a disminuir y, por tanto, los valores de potencia reactiva se mantienen durante este período aún cuando el consumo de potencia activa disminuye levemente (gráfica primera de la Figura 20). Los valores máximos de potencia alcanzados en esta parte del ciclo no llegan a los 0,2 kVAr. La Figura 21 muestra la evolución del factor de potencia y potencia aparente del frigorífico.

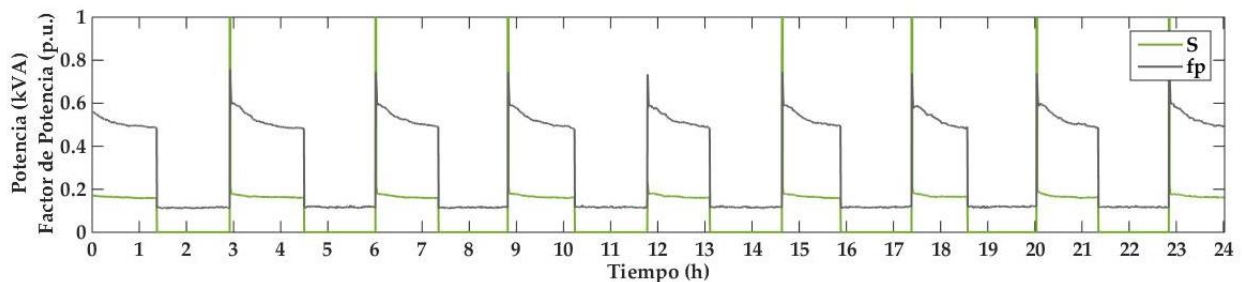


Figura 21. Zoom de la evolución de la potencia aparente y el factor de potencia del frigorífico

## 4.2. Lavadora

Se han registrado los datos de dos estados de funcionamiento típicos del consumo de la lavadora: lavado corto (a 40°C y 800 r.p.m.) y lavado largo económico. La diferencia entre los estados de funcionamiento se refleja en la duración de éstos. El lavado corto tiene un tiempo de duración de una hora y media y el largo de tres horas.

### 4.2.1. Lavado corto

El estado de funcionamiento corto se da a 40 °C y 800 r.p.m. La Figura 22 muestra la evolución de las tensiones y las intensidades, en ella se observa una evolución constante de la tensión, excepto en el comienzo, que coincide con la fase de lavado. En esta fase se produce un gran consumo de intensidad por el calentamiento del agua y éste provoca, a su vez, una pequeña caída de tensión.

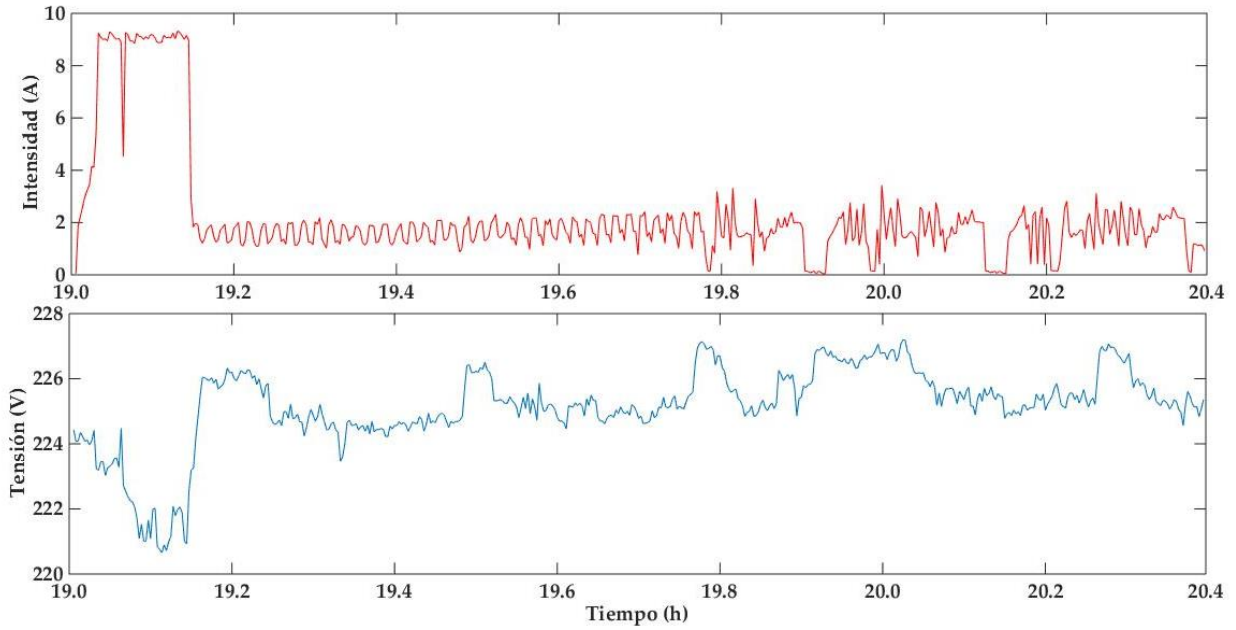


Figura 22. Evolución de la intensidad y la tensión de la lavadora. Estado de funcionamiento corto

El aumento en el consumo inicial también se puede observar en la Figura 23, donde la potencia activa absorbida por la lavadora llega a ser de un valor máximo de 2 kW. Este consumo se debe a que, al comienzo del lavado, el tambor de la lavadora tiene que llenarse de agua caliente y mover toda la ropa introducida además del agua. La segunda gráfica de la Figura 23 refleja que la potencia reactiva se mantiene en un valor constante alrededor de 0.4 kVAr con una oscilación de  $\pm 0.1$  kVAr. Se observa que el factor de potencia es únicamente constante en el arranque del lavado. En este período el consumo producido es mayoritariamente de potencia activa y por tanto el factor de potencia se mantiene cercano a la unidad en este tramo. El tramo siguiente, correspondiente al aclarado, presenta una oscilación del factor de potencia que se refleja en un valor de potencia reactiva ligeramente superior a la activa. Para concluir, la fase final o centrifugado supone una oscilación mayor de todos los parámetros.

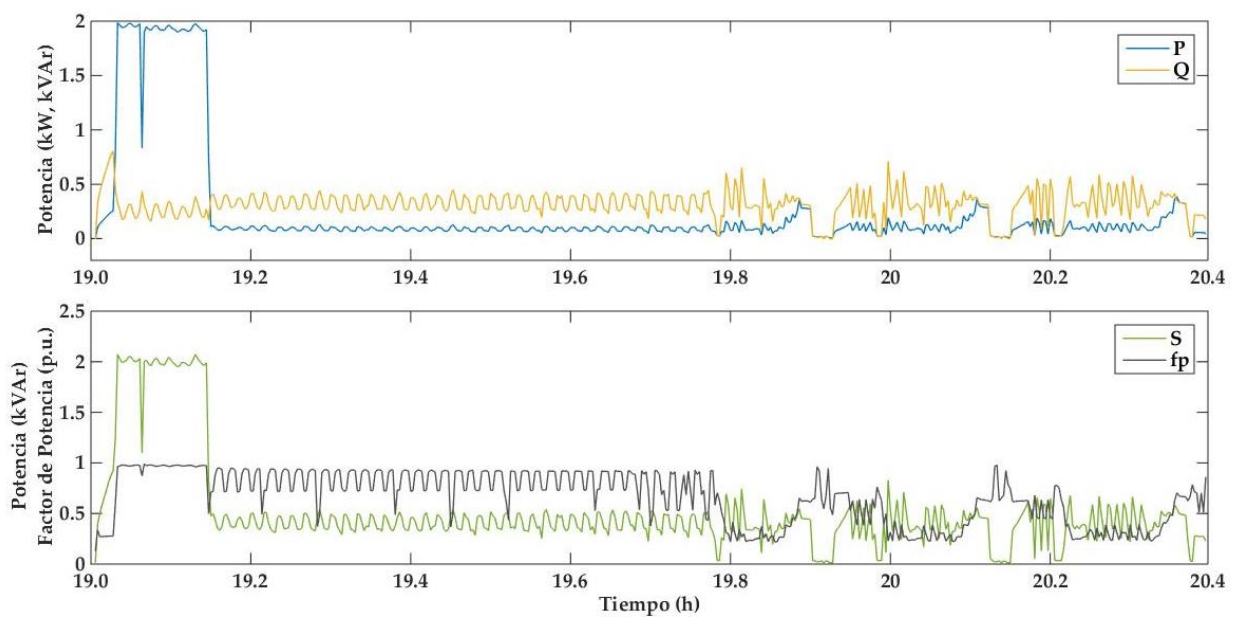


Figura 23. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia de la lavadora. Estado de funcionamiento corto

### 4.2.2. Lavado largo

El comportamiento de la lavadora en el estado de funcionamiento largo es similar al anterior según se observa en las Figuras 24 y 25.

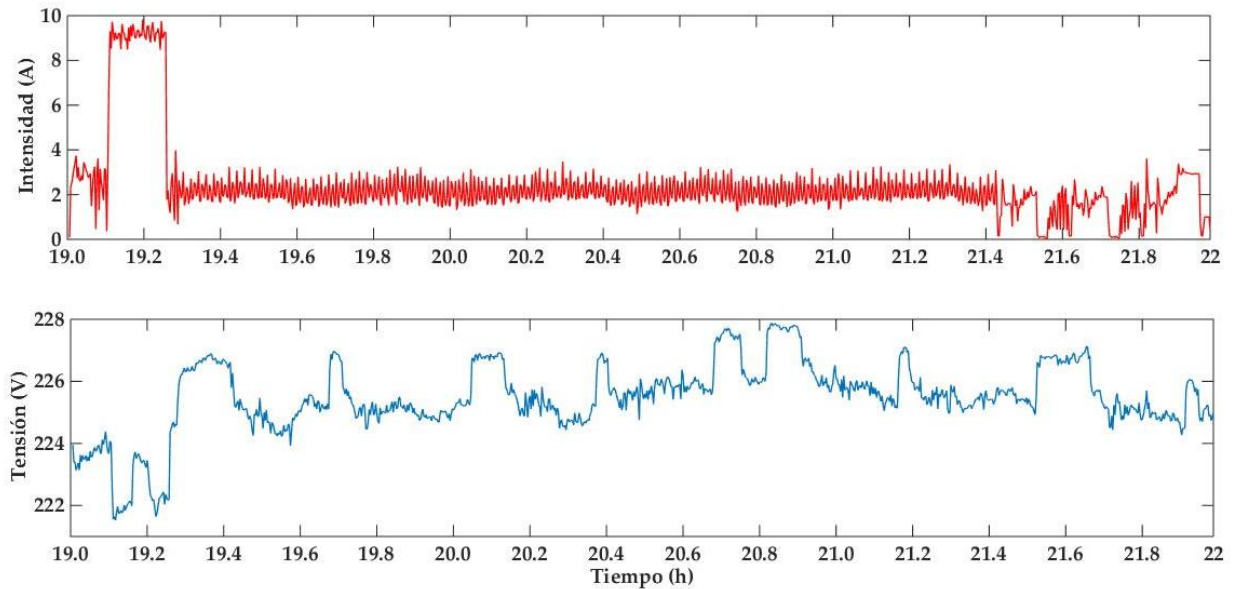


Figura 24. Evolución de la intensidad y tensión de la lavadora. Estado de funcionamiento largo

La Figura 25, en concreto, muestra cómo al inicio del lavado se consume la mayor parte de potencia activa y posteriormente se mantienen prácticamente constantes los consumos de las potencias activa, reactiva, aparente y factor de potencia. La diferencia principal entre el estado de lavado corto y largo es, por tanto, la duración. El lavado anterior tiene un tiempo de duración de una hora y media y el actual de tres horas, sin embargo, los intervalos de gran consumo de potencia producidos al principio duran el mismo tiempo para ambos estados, mientras que la fase de aclarado o fase de aporte de agua es notablemente mayor en este último caso.

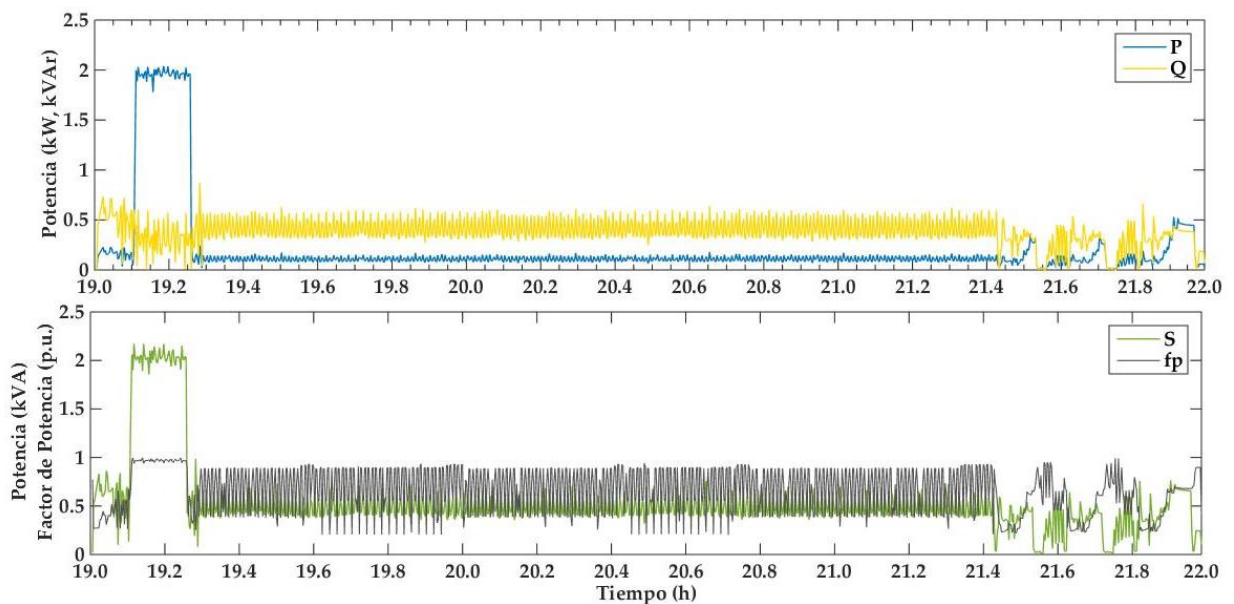


Figura 25. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia de la lavadora. Estado de funcionamiento largo



### 4.3. Secadora

El perfil de consumo de la secadora se muestra en la Figura 26 y la Figura 27. En el caso de este electrodoméstico se observa un periodo inicial que dura hasta aproximadamente la mitad del ciclo. En este primer periodo la intensidad se mantiene a un valor constante de prácticamente 10 A y se correspondería con la fase de aporte de calor al flujo de aire entrante. Le sigue un segundo periodo en el cual la intensidad se compone de ciclos de trabajo de 10 A con ciclos de consumo casi nulo. Estas variaciones también se ven reflejadas en la variación cíclica de la tensión. Se trata del consumo debido al motor que hace girar el tambor con la ropa en el interior.

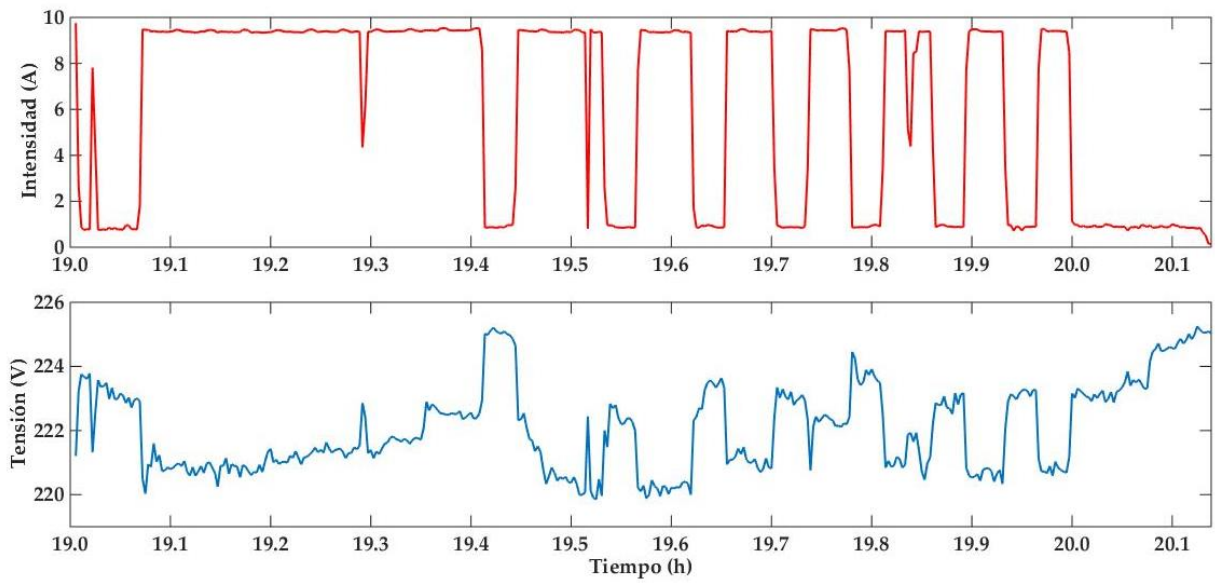


Figura 26. Evolución de la intensidad y tensión de la secadora

La potencia activa supone casi la totalidad del consumo, siendo por tanto la potencia reactiva prácticamente despreciable y el factor de potencia unitario durante el ciclo de secado.

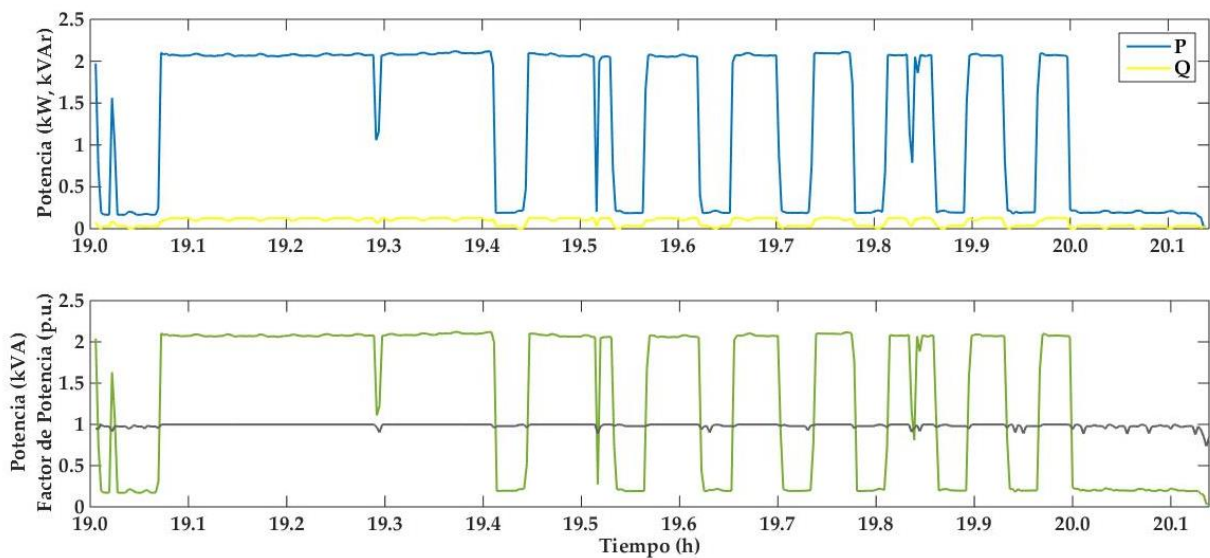


Figura 27. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia de la secadora

## 4.4. Lavavajillas

Al igual que en la lavadora, se han registrado dos estados de funcionamiento típicos para el fregaplatos. El lavado corto y largo, a 45 °C a mitad de carga. La diferencia entre los dos estados está en la duración del tiempo de lavado.

### 4.4.1. Lavado corto

En el lavado corto el agua alcanza una temperatura de 45 °C y el lavavajillas se configura a mitad de carga. La Figura 28 muestra una evolución de la tensión constante, con valores alrededor de los 225 V, salvo dos pequeñas caídas de tensión al principio y al final que coinciden con el aumento de la intensidad hasta 10 A. Estos aumentos de consumo se producen en aquellas fases en las que hay aporte de energía al agua para calentar, lo que se realiza mediante el efecto Joule. La suma de estos dos intervalos supone casi la mitad del tiempo total de funcionamiento, siendo la corriente prácticamente nula durante el resto del periodo de trabajo.

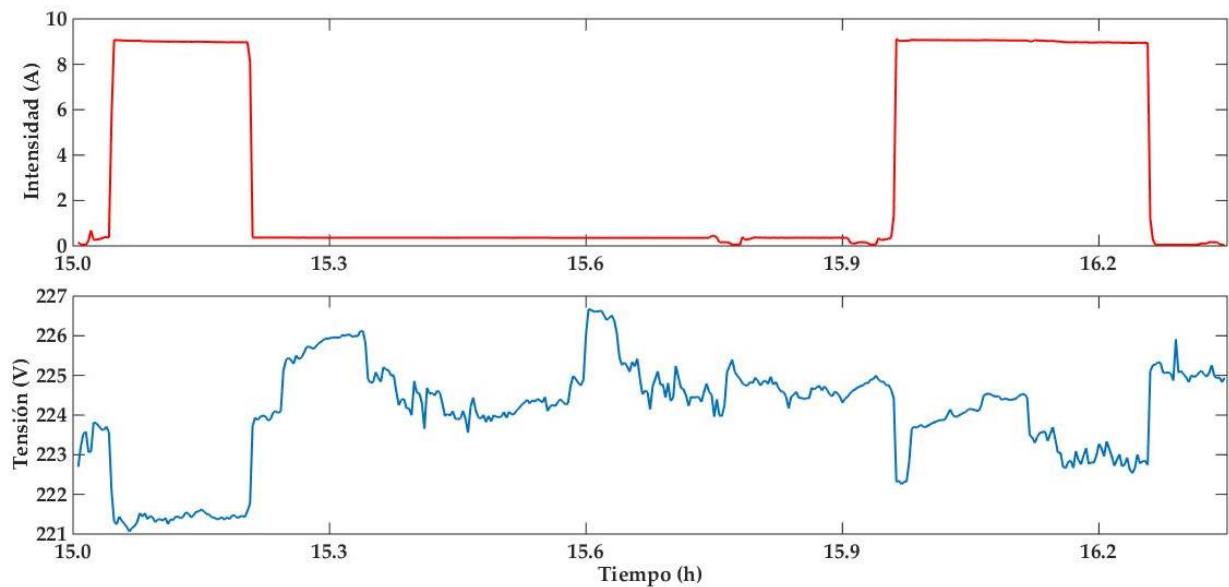


Figura 28. Evolución de la intensidad y tensión del lavavajillas. Estado de funcionamiento corto

En cuanto a las potencias, representadas en la Figura 29, los grandes consumos se producen, al igual que las corrientes, en los periodos inicial y final de funcionamiento, siendo la mayoría de la potencia consumida potencia activa. La potencia reactiva se mantiene prácticamente nula durante todo el ciclo de trabajo provocando que el factor de potencia sea unitario.

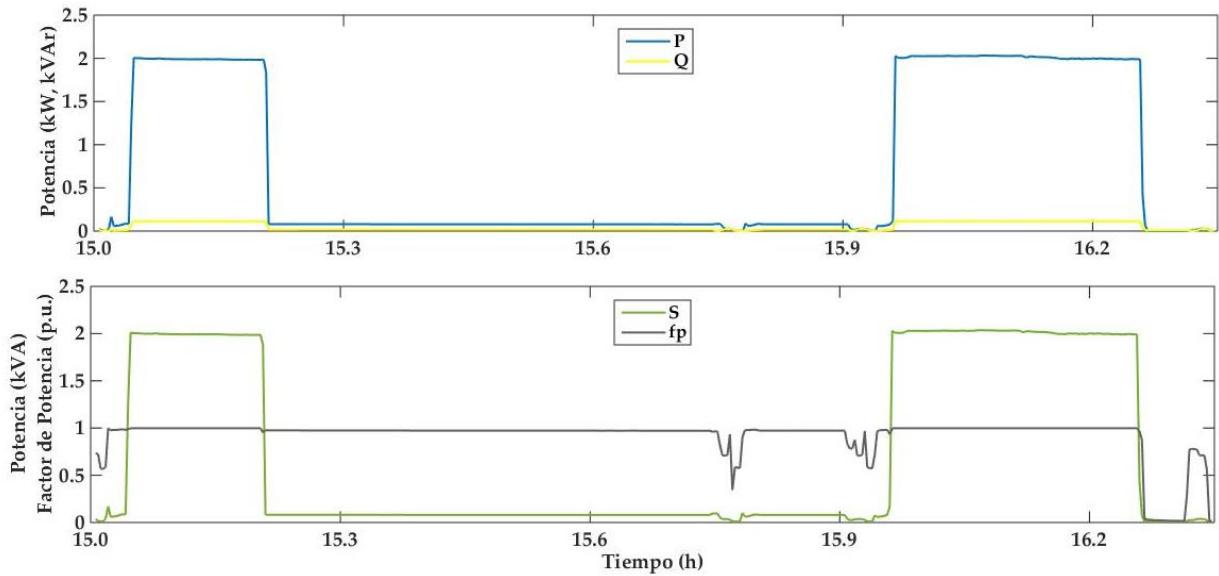


Figura 29. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del lavavajillas. Estado de funcionamiento corto

#### 4.4.2. Lavado largo

El perfil de consumo del lavado largo, que se muestra en las Figuras 30 y 31, es muy similar al estado de funcionamiento corto. El lavado largo se diferencia en el tiempo de duración del ciclo, que es ligeramente superior. En las figuras se observan de nuevo las dos etapas de consumo al inicio y al final del ciclo. La duración de estas etapas es similar a las del caso anterior y la diferencia principal se da en el tiempo de lavado, que es superior en este caso.

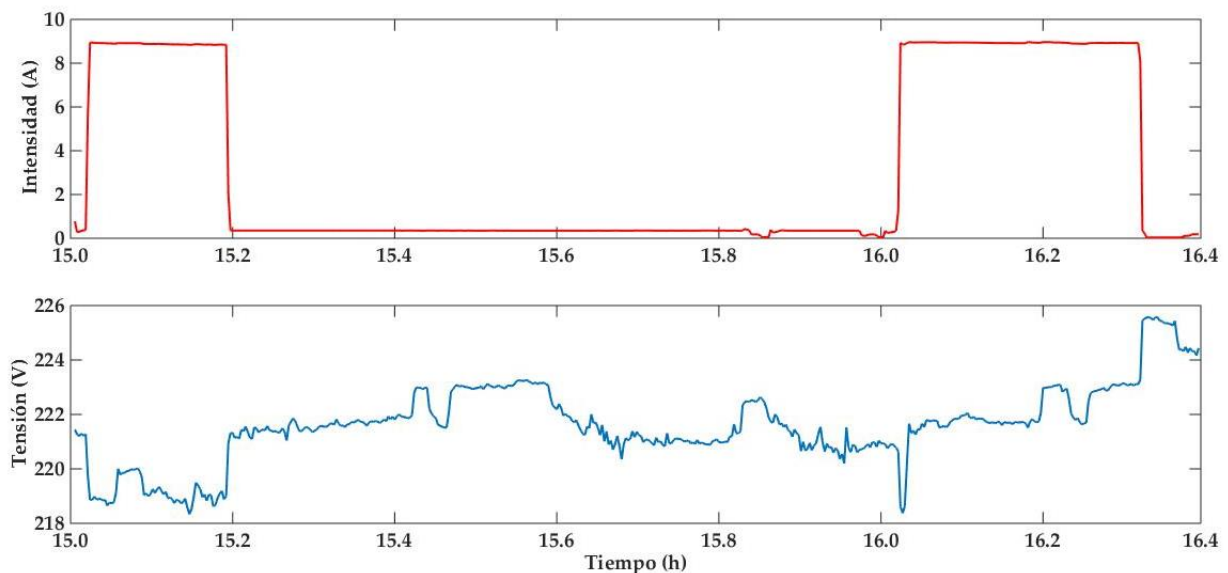


Figura 30. Evolución de la intensidad y tensión del lavavajillas. Estado de funcionamiento largo

Al igual que en el estado de funcionamiento corto, el factor de potencia se mantiene prácticamente unitario durante todo el ciclo y el consumo de potencia reactiva es muy inferior al consumo de potencia activa.

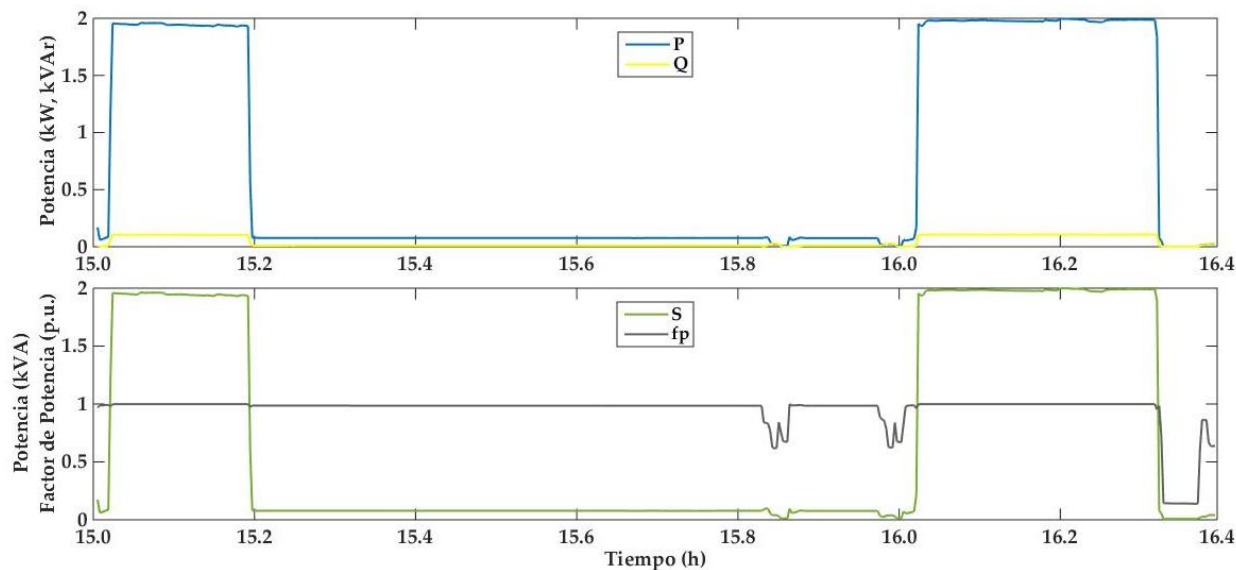


Figura 31. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del lavavajillas. Estado de funcionamiento largo

## 4.5. Televisión

Las Figuras 32 y 33 presentan los resultados obtenidos para el consumo de la televisión. La evolución de los parámetros se caracteriza por tener un perfil plano durante todas las horas de funcionamiento. Este perfil plano indica que el consumo de este electrodoméstico es constante y que no sufre ninguna variación durante las horas de trabajo. Si bien existe una fase de arranque al inicio con un leve aumento en el consumo.

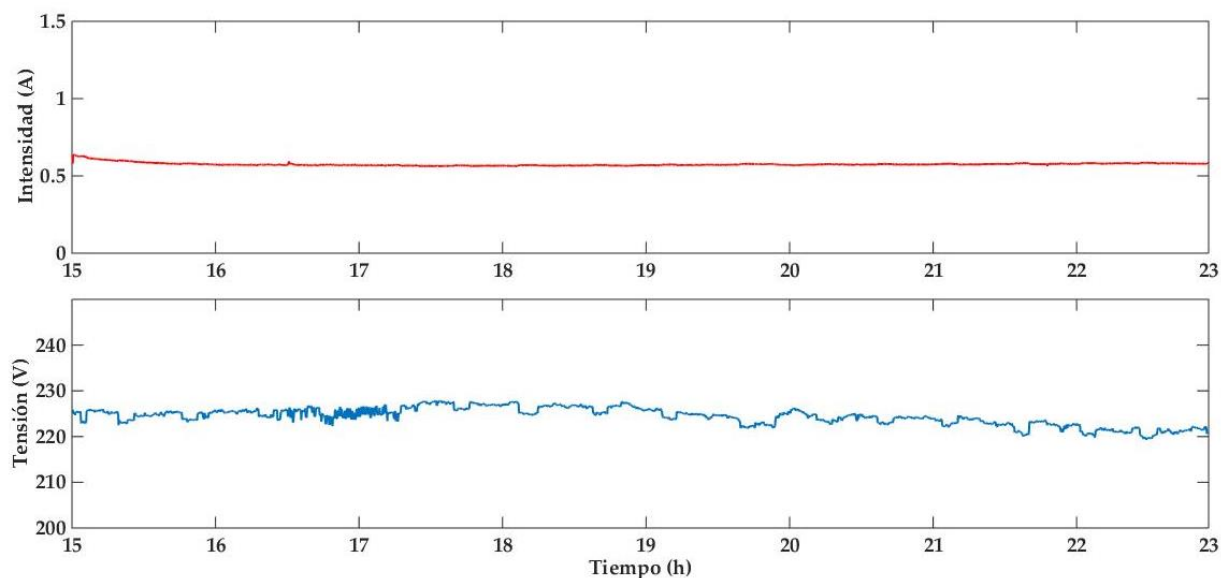


Figura 32. Evolución de la intensidad y tensión de la televisión

El mayor consumo de potencia es debido a la potencia activa provocando por tanto un factor de potencia cercano a la unidad tal y como se muestra en la Figura 33.

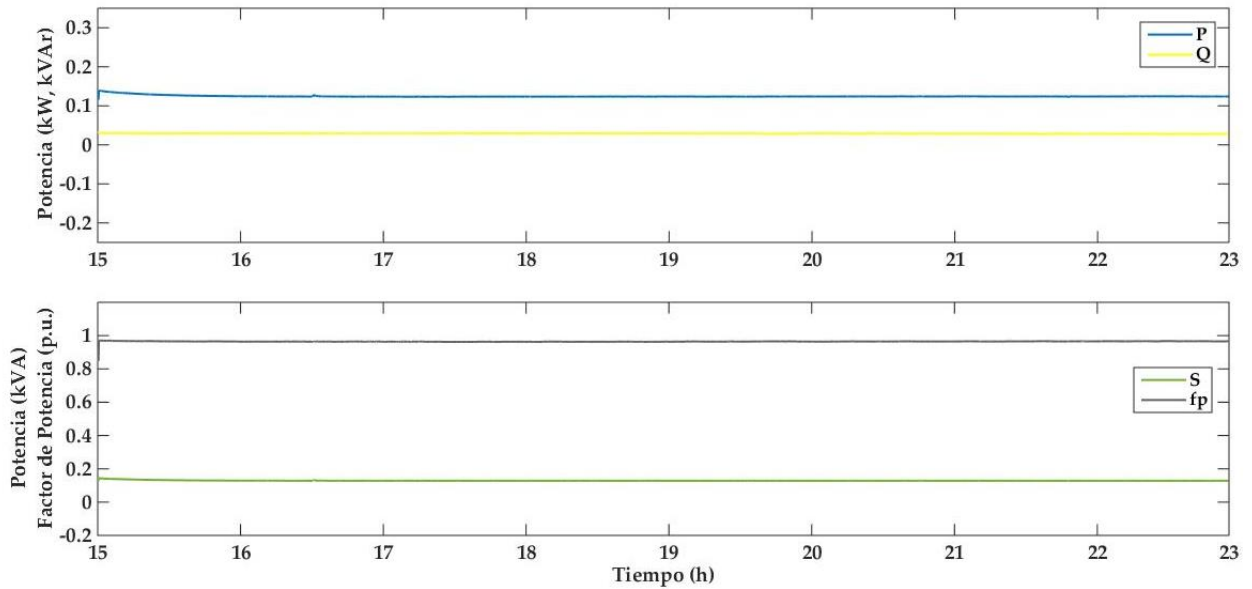


Figura 33. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del televisor

## 4.6. Climatización

Para la caracterización de la climatización del hogar se registraron los datos de un split, tanto en régimen de calefacción como de refrigeración.

### 4.6.1. Régimen de calefacción

El comportamiento del split en régimen de calefacción se muestra en las Figuras 34 y 35. En la Figura 34, en concreto, se observa un primer momento de arranque en el que la intensidad alcanza más de 20 A. A continuación, le sigue una fase de funcionamiento que al inicio presenta oscilaciones tanto en la intensidad como en el consumo de potencias. Una vez alcanzada la temperatura en el local, el climatizador deja de funcionar y es el momento en el que se observa una caída de intensidad a valores nulos. Una vez que la temperatura vuelve a disminuir por debajo de la temperatura de consigna el climatizador vuelve a activarse, dándose de nuevo el arranque seguido del periodo de funcionamiento. Por otra parte, los valores de tensión se mantienen prácticamente constantes.

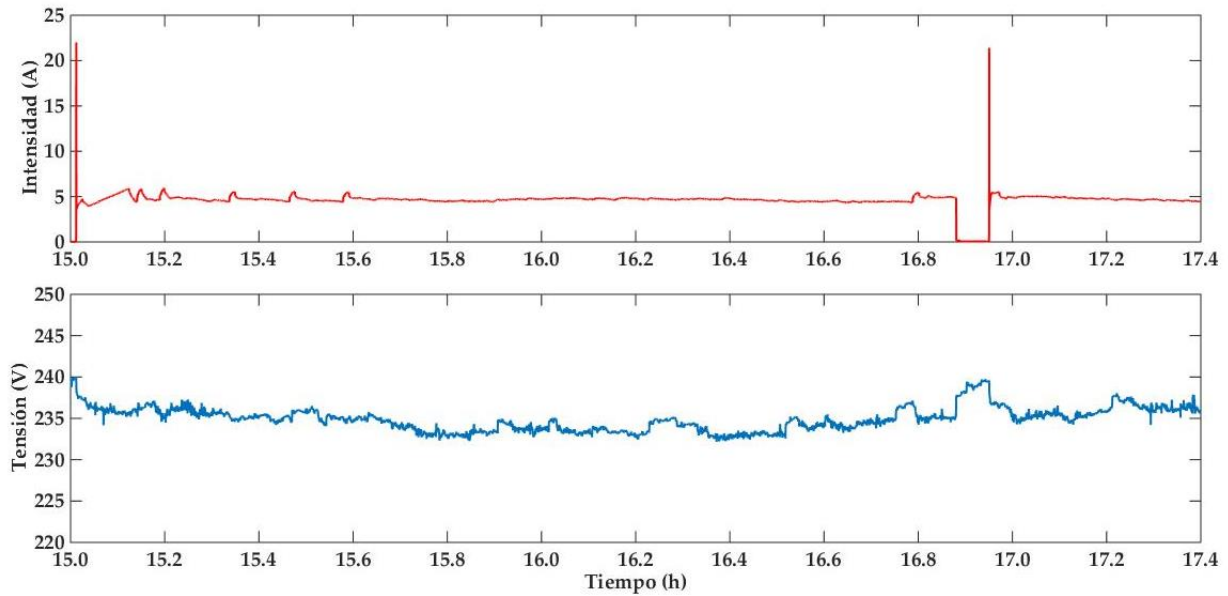


Figura 34. Evolución de la intensidad y tensión del climatizador. Funcionamiento en régimen de calefacción

La potencia reactiva, según la primera gráfica de la Figura 35, supone aproximadamente la mitad del consumo de potencia activa. Las potencias presentan un perfil de consumo similar a la intensidad. El factor de potencia se mantiene a valores cercanos a 0.8 salvo cuando el split se detiene y comienza a funcionar en stand by, que disminuye a 0.6.

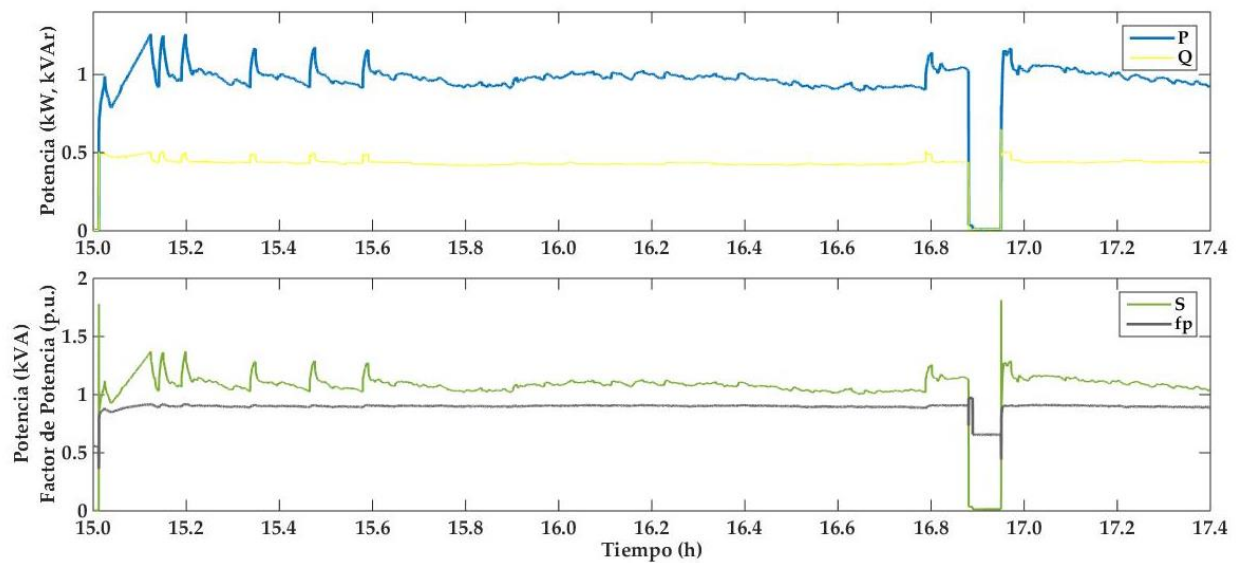


Figura 35. Evolución de la potencia activa, reactiva, aparente y factor de potencia del climatizador. Funcionamiento en régimen de calefacción

#### 4.6.2. Régimen de refrigeración

En el caso del régimen de refrigeración el funcionamiento es prácticamente el mismo, salvo que el ciclo se da en sentido opuesto. El perfil de consumo es por tanto muy similar al observado anteriormente. En este caso se han podido registrar más ciclos.

El perfil de consumo de la intensidad y la tensión se muestran en la Figura 36.

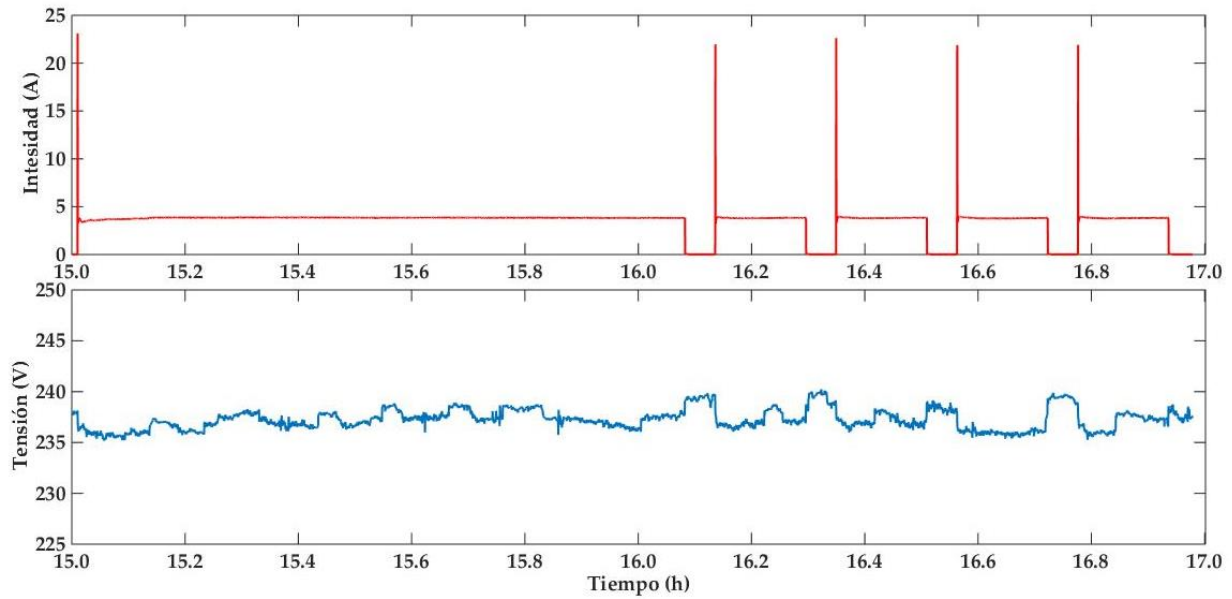


Figura 36. Evolución de la intensidad y tensión del climatizador. Funcionamiento en régimen de refrigeración

El perfil de consumo de las potencias se muestra en la Figura 37. En ellas se observa que en el caso de la refrigeración la oscilación es mucho menor. Además, el consumo de potencia reactiva con respecto al consumo de potencia activa sube en comparación con el régimen de calefacción.

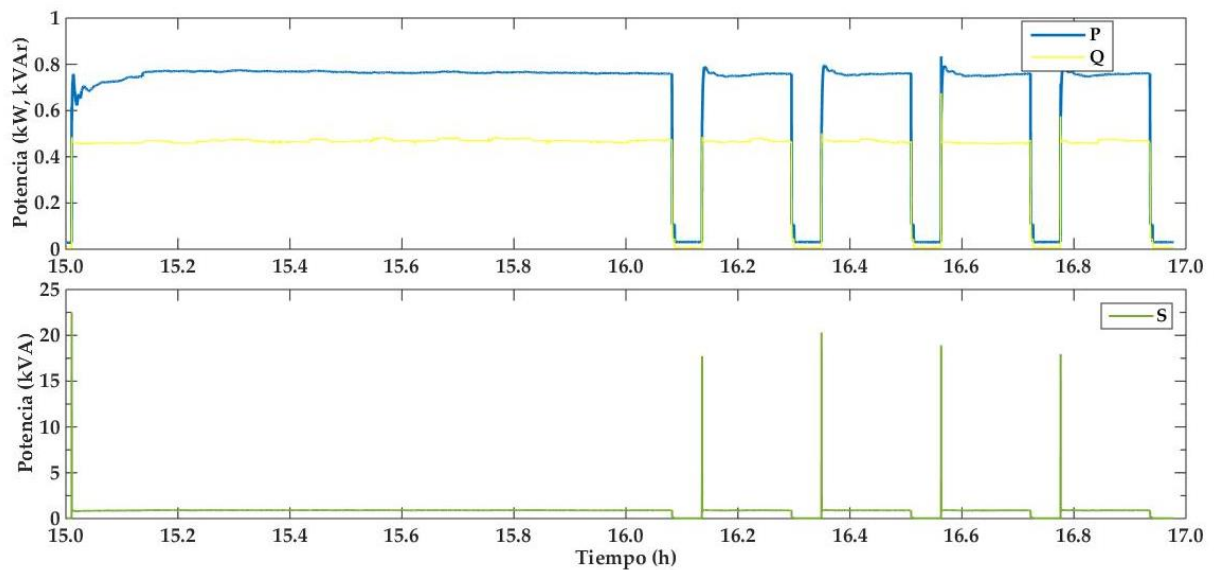


Figura 37. Evolución de la potencia activa, reactiva y aparente del climatizador. Funcionamiento en régimen de refrigeración

La Figura 38 contiene la evolución del factor de potencia. Se observa que, a diferencia del régimen de calefacción, el factor de potencia aumenta en los períodos de stand-by. No obstante, su valor en los períodos de funcionamiento sigue siendo 0.8.

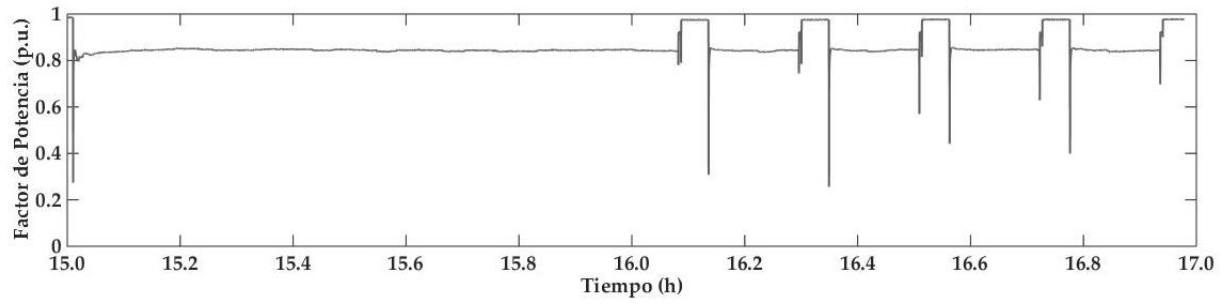


Figura 38. Evolución del factor de potencia del climatizador. Funcionamiento en régimen de refrigeración



# 5 CONSUMO DIARIO

En este capítulo se pretende reproducir el perfil de consumo de la potencia activa y la potencia reactiva a lo largo de un día típico de primavera, verano, otoño e invierno de un hogar medio de la ciudad de Sevilla. En un principio se propuso la obtención de los consumos diarios mediante el uso del analizador de red para el conjunto del hogar accediendo al cuadro eléctrico. Sin embargo, esta opción no fue posible por lo que, en segundo lugar, se optó por distribuir, mediante la herramienta Matlab, el consumo de los diferentes electrodomésticos a lo largo de las veinticuatro horas. Esta opción presenta la posibilidad de establecer estrategias de ahorro energético, como averiguar dónde es más conveniente el uso de ZeroCap, si bien a nivel del hogar o si, por el contrario, es más eficiente la compensación de potencia de los electrodomésticos de mayor consumo. Por otro lado, la distribución del consumo de los electrodomésticos es diferente dependiendo de la estación del año. El resultado se representa en forma de gráficas en las cuales se muestran los diferentes consumos de potencia activa y reactiva a lo largo del día. Además, se sumaron estos consumos y se presentan de igual manera en forma de gráficas.

## 5.1. Primavera

Para el día típico de primavera el frigorífico se mantuvo encendido las veinticuatro horas, la televisión se encendió desde las 14:00 horas hasta las 16:30 horas y posteriormente desde las 20:30 horas hasta las 00:30 horas. La lavadora se utilizó a las 17:00 y no se hizo uso de la secadora. El lavavajillas se activó a las 22:30 horas y su funcionamiento duró hasta las 00:30 horas. En la Figura 39 se muestra el consumo de potencia activa y reactiva de los diferentes dispositivos mencionados a lo largo del día. Con respecto al consumo de reactiva, el frigorífico y la lavadora destacan como principales consumidores.

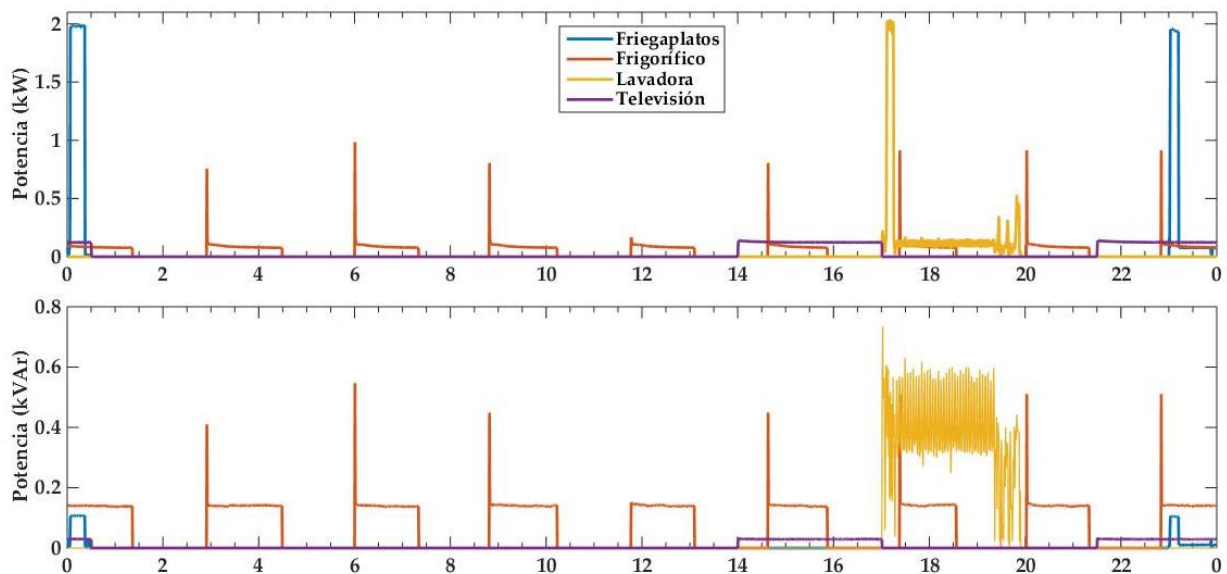


Figura 39. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de primavera

Una vez sumados los consumos se obtiene la Figura 40, en ella se muestran las gráficas con los perfiles de consumo diario. En primavera, las horas de más consumo van desde las 14:00 horas hasta las 00:30 horas, coincidiendo con el uso de la lavadora.

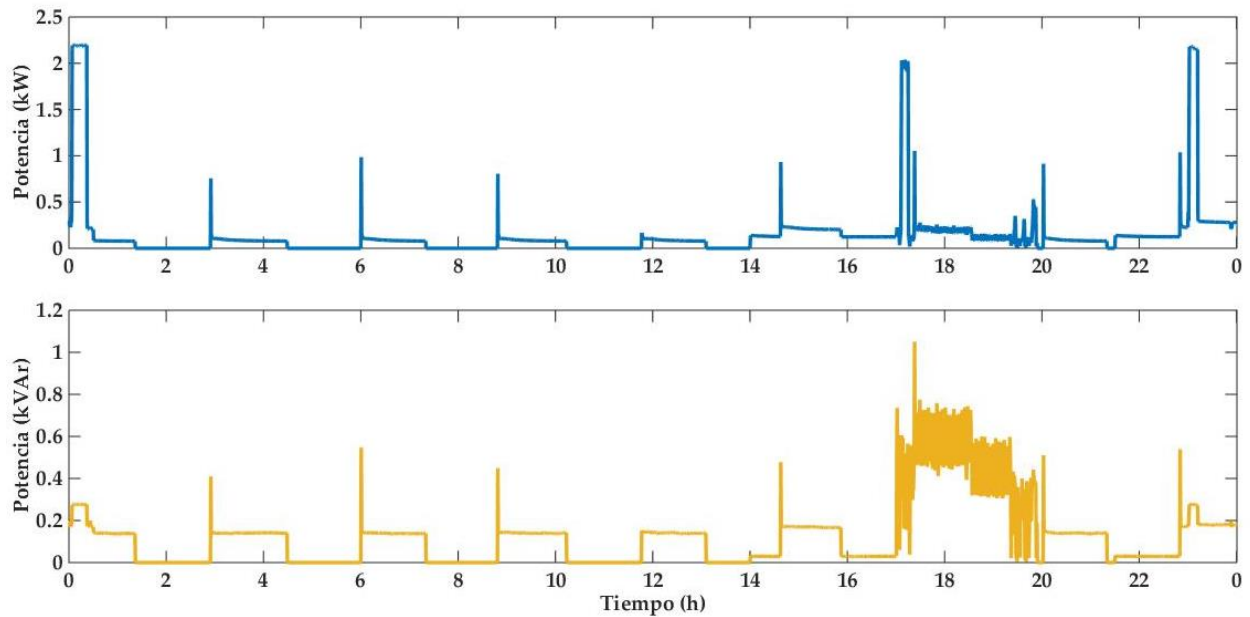


Figura 40. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de primavera

La Figura 41 ilustra el nivel de consumo de potencia reactiva con respecto al consumo de potencia activa. Se observa que, durante la tarde, desde 17:00 horas a las 19:30 horas, el consumo de potencia reactiva supera al de potencia activa. Estas horas coinciden con el uso de la lavadora.

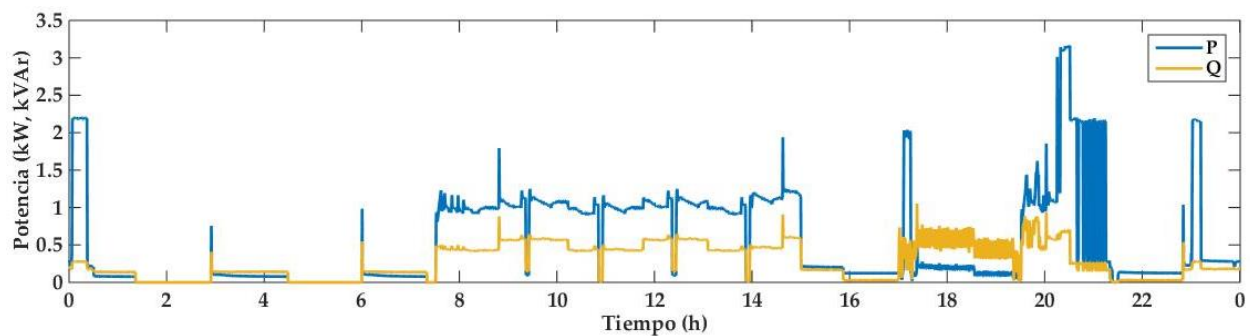


Figura 41. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de primavera

El factor de potencia, mostrado en la Figura 42, oscila intercalando fases de valor de 1 durante aproximadamente una hora y media y posteriormente baja a valores de 0.5 durante el mismo periodo. Desde las 17:00 horas a las 20:00 horas el factor de potencia presenta los valores más bajos, coincidiendo con las horas de mayor consumo de potencia reactiva observado en la Figura 41.

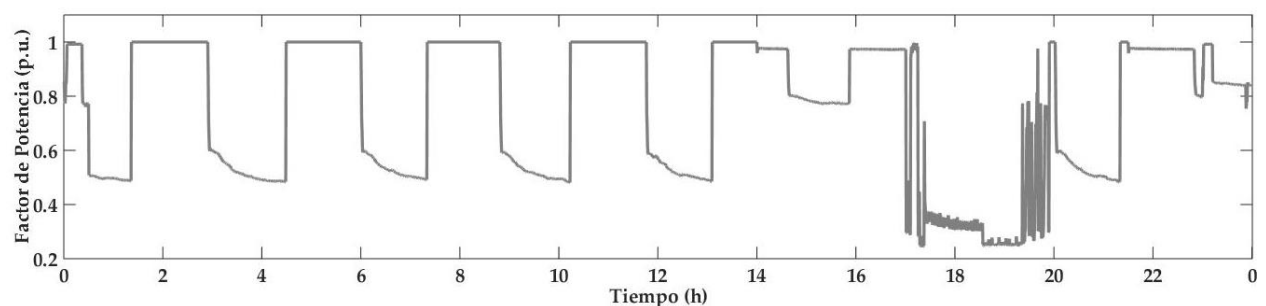


Figura 42. Factor de potencia en el hogar durante un día de primavera

## 5.2. Verano

El día de verano, representado en la Figura 43, se diferencia del anterior en el uso de climatización. Por ser el

clima de Sevilla extremo en verano el aire acondicionado se mantuvo activo desde las 10:30 horas hasta las 16:00 horas y desde las 17:30 horas hasta las 19:30 horas.

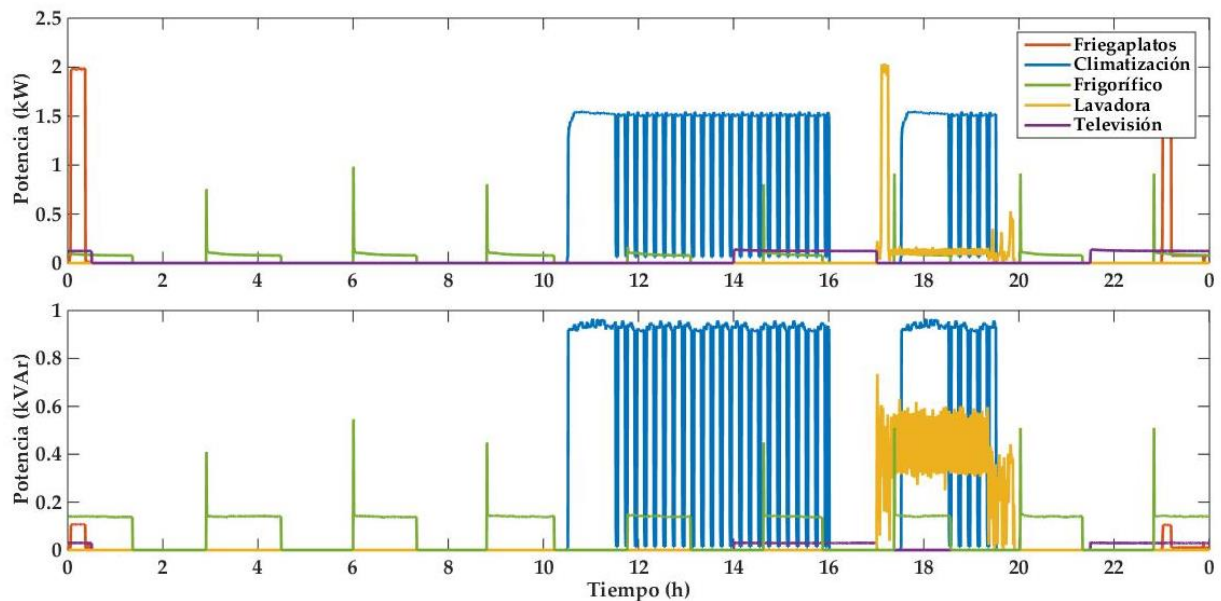


Figura 43. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de verano  
El perfil de consumo de la vivienda en su conjunto, durante el día típico de verano, se muestra en la Figura 44. Las horas de mayor consumo, tanto de potencia activa como reactiva, van desde las 10:30 horas hasta las 16:00 horas y desde las 17:00 hasta las 20:00 aproximadamente. Estas horas coinciden con el uso de la climatización, siendo éste el electrodoméstico que más consume en los días de verano.

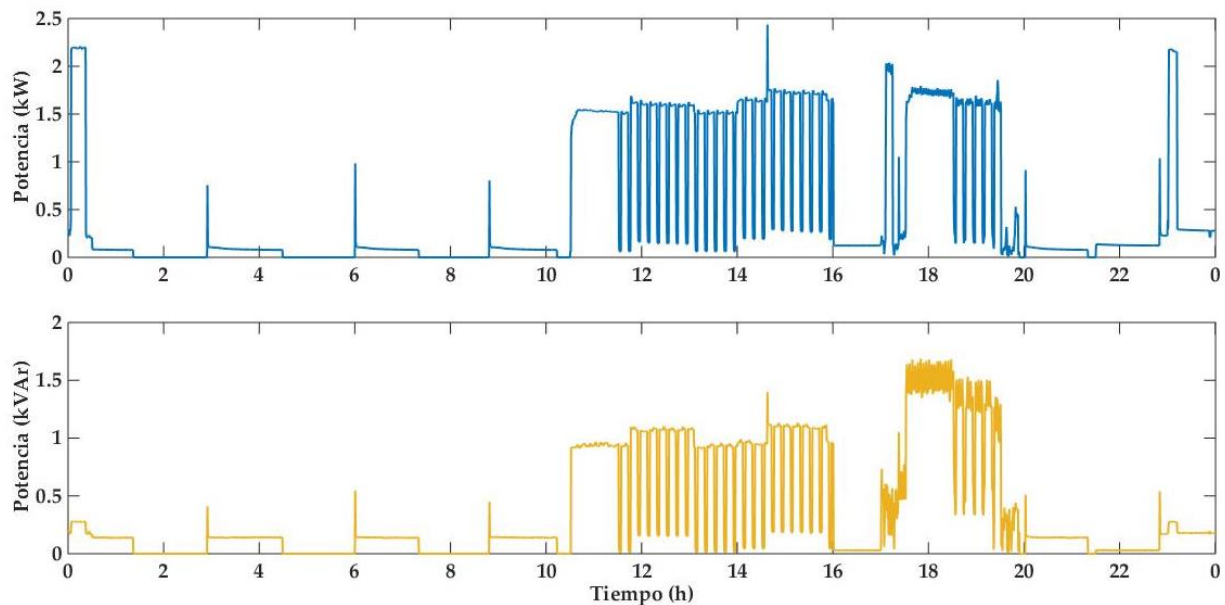


Figura 44. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de verano

Si comparamos el consumo de potencia activa con el consumo de potencia reactiva obtenemos la Figura 45, en la cual, durante el uso de la climatización, la potencia reactiva sube a valores por encima del 50% del consumo de potencia activa. El uso de la lavadora también contribuye a que, durante las horas de la tarde, este nivel aumente aún más.

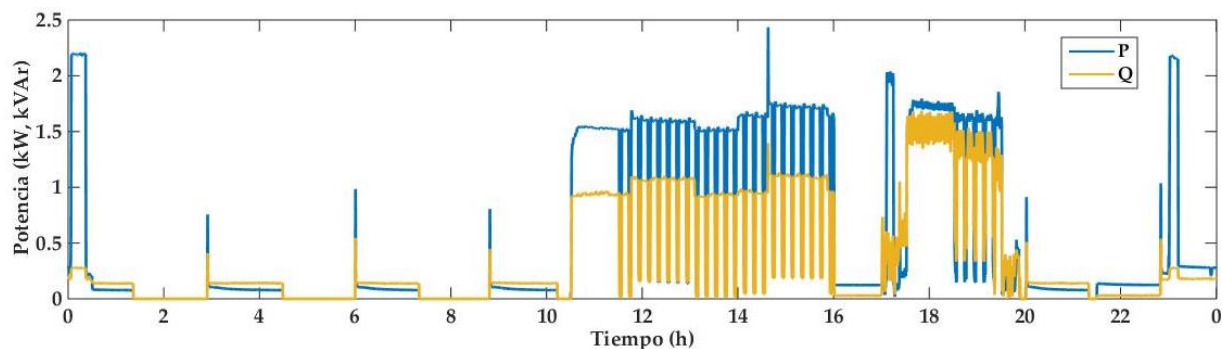


Figura 45. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de verano

El factor de potencia, representado en la Figura 46, durante un día típico de verano disminuye significativamente en las primeras horas de madrugada de manera cíclica. La causa puede ser referida al uso del frigorífico. Durante la tarde, el uso de la lavadora y la climatización en conjunto hace que el factor de potencia oscile repetidamente y alcance valores mínimos.

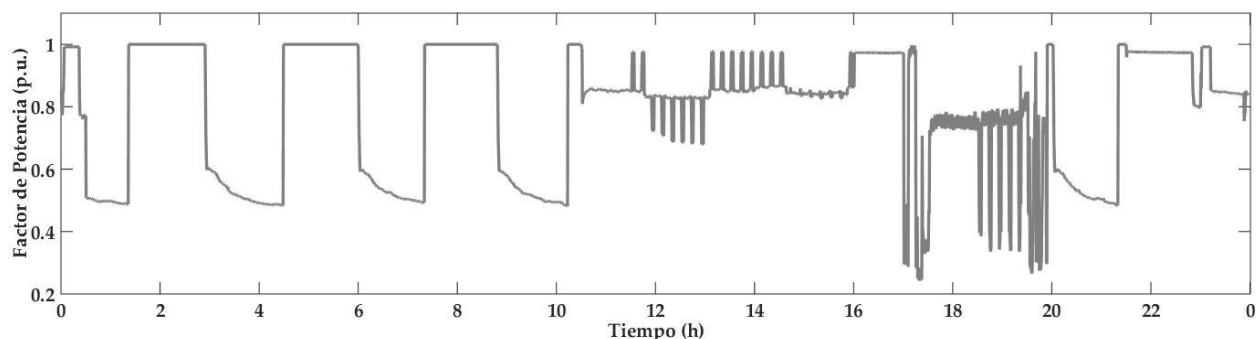


Figura 46. Factor de potencia en el hogar durante un día de verano

### 5.3. Otoño

En otoño no se hizo uso de la climatización pero, al ser una estación con probabilidad de lluvia alta, se empleó la secadora a continuación de la lavadora, a las 20:00 horas. La Figura 47 muestra la distribución de los electrodomésticos a lo largo del día típico de otoño. En esta estación del año, al igual que en primavera, los electrodomésticos que presentan mayor consumo de potencia reactiva son el frigorífico y la lavadora. No obstante, la secadora destaca por su gran consumo de potencia activa.

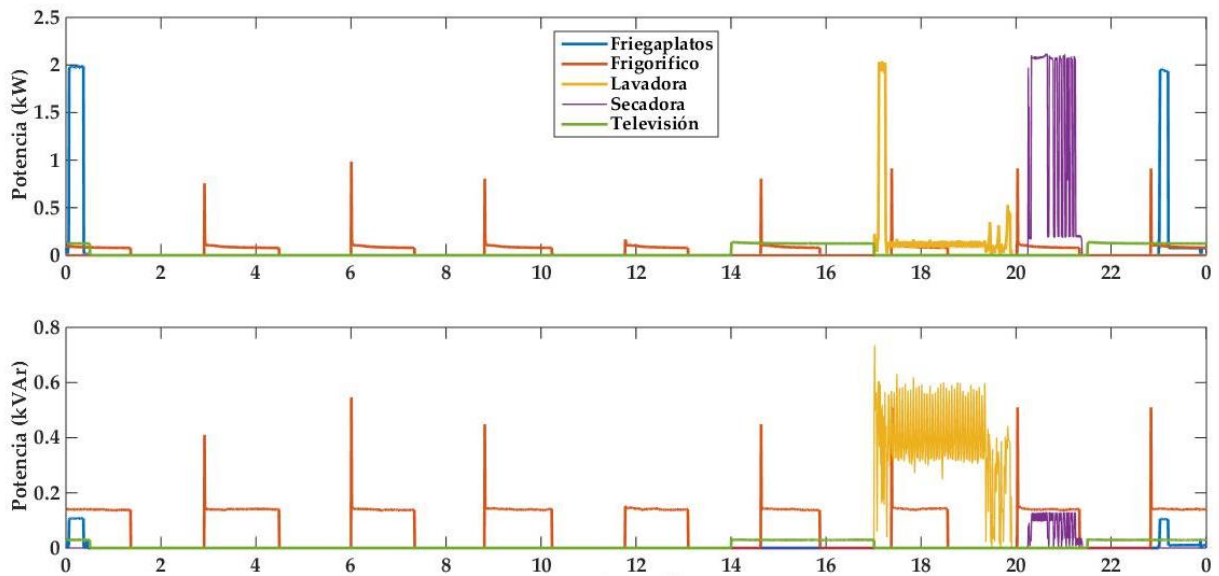


Figura 47. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de otoño

Según la Figura 48, en la cuál se muestra el consumo total en el hogar de potencia activa y reactiva, una vez más y de manera similar al día típico de primavera, el día de otoño reúne las horas de más consumo entre las 14:00 horas y las 00:30 horas.

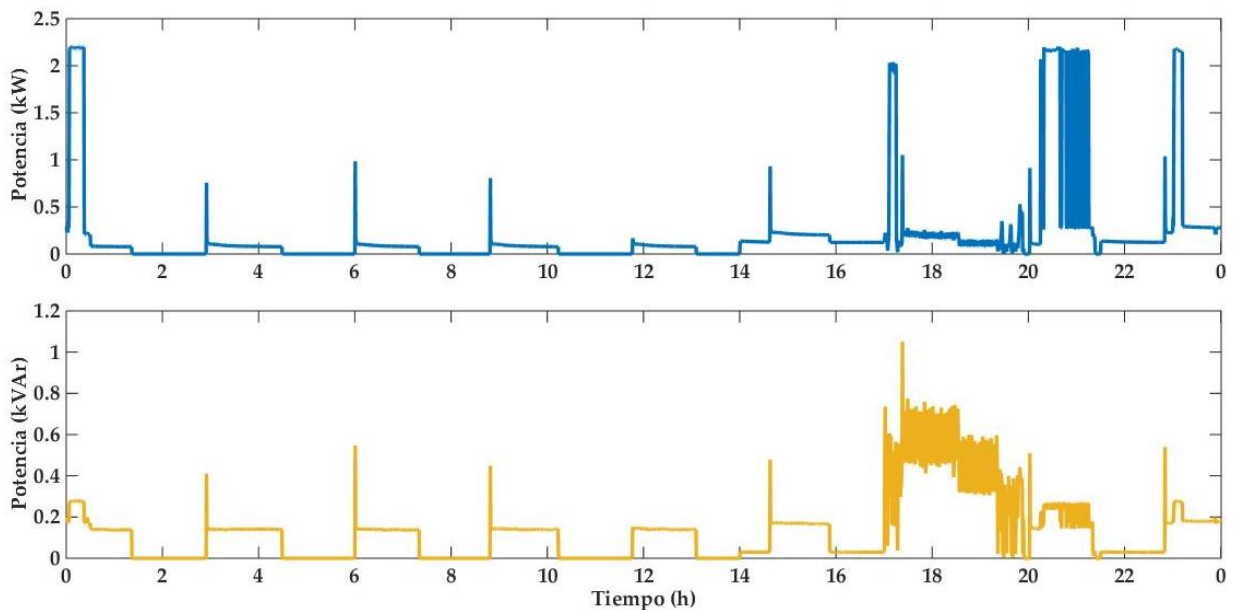


Figura 48. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de otoño

Si comparamos el consumo de las dos potencias observamos, en la Figura 49, que durante el tiempo en el que se utilizó la lavadora, es decir, desde las 17:00 hasta las 20:00 aproximadamente, el consumo de reactiva supera al consumo de potencia activa. De igual manera ocurre durante los ciclos de funcionamiento del frigorífico.

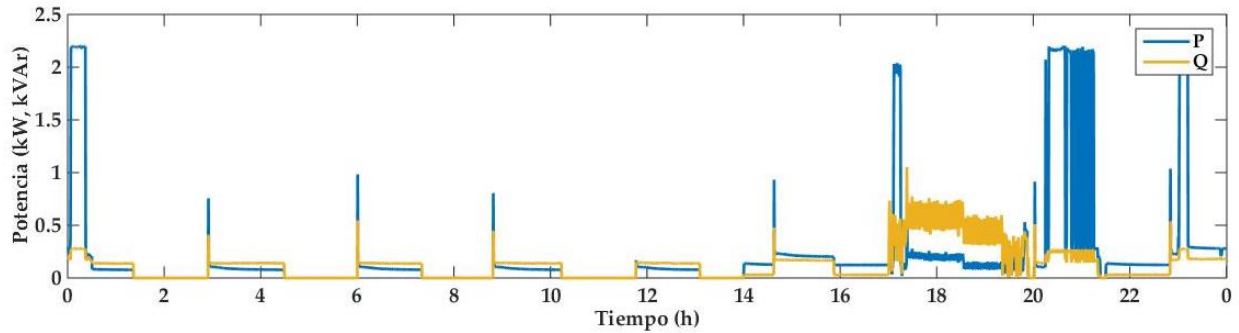


Figura 49. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de otoño

Los niveles de potencia reactiva en comparación con los de potencia activa observados anteriormente se reflejan también en el factor de potencia, mostrado en la Figura 50. En esta gráfica los niveles disminuyen hasta 0,5 aproximadamente durante los ciclos de funcionamiento del frigorífico y toma valores mínimos, de 0,25 aproximadamente, durante el funcionamiento de la lavadora. El resto del tiempo el factor de potencia se mantiene prácticamente en la unidad.

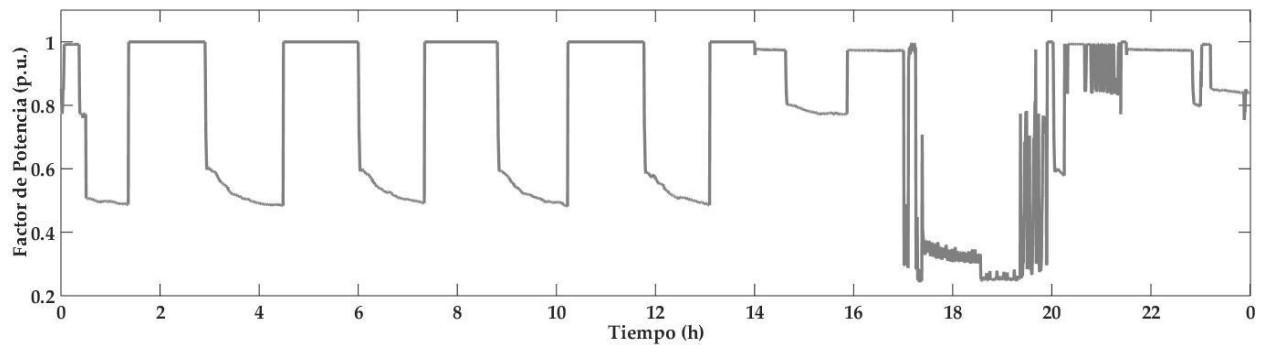


Figura 50. Factor de potencia en el hogar durante un día de otoño

## 5.4. Invierno

En invierno se utilizaron todos los electrodomésticos. El consumo de éstos se muestra en la Figura 51. La diferencia con respecto al caso anterior es el uso de calefacción desde las 7:30 horas hasta las 10:30 horas y posteriormente desde las 19:30 horas hasta las 22:30 horas. Con respecto al consumo de potencia reactiva, destacan los consumos de la calefacción, el frigorífico y la lavadora. Por otra parte, la secadora y la calefacción son los electrodomésticos de mayor consumo de potencia activa.

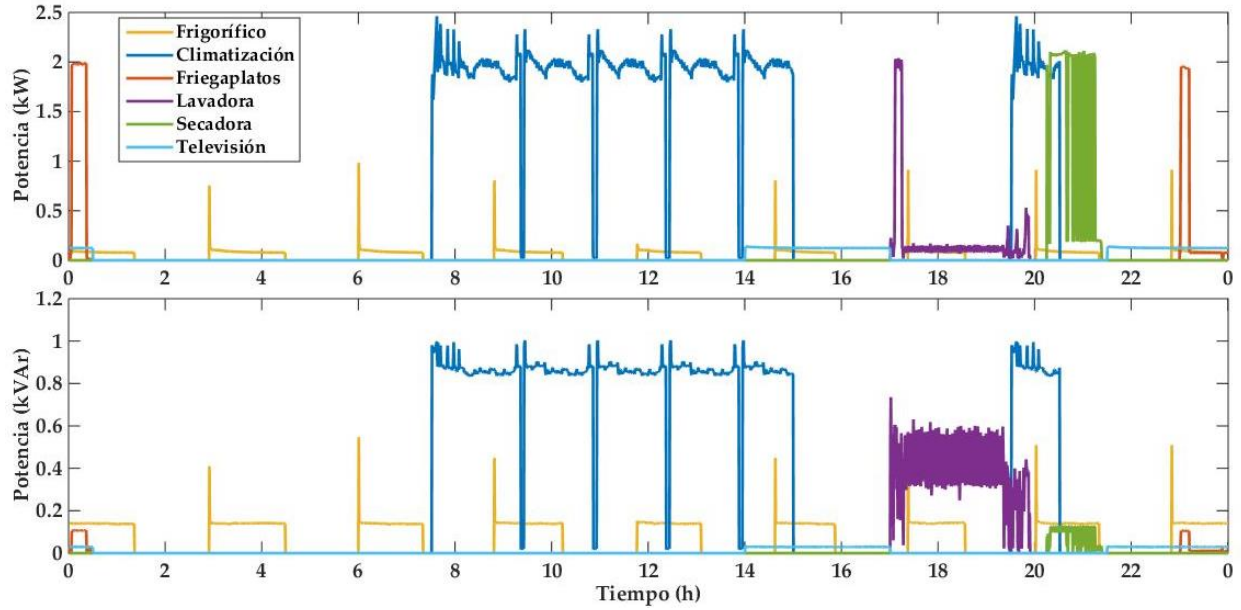


Figura 51. Consumo de potencia activa y reactiva de electrodomésticos distribuidos en un día típico de invierno

El invierno es la estación en la que más potencia se consume. En la Figura 52, en la cual se representa el perfil de consumo de potencia activa y reactiva del hogar, observamos que el consumo se concentra en las horas de la mañana, es decir, de 7:30 a 15:00, y durante las últimas horas de la tarde, en la que hay un pico en el consumo. Esto es debido al uso de la calefacción y la secadora de forma simultánea.

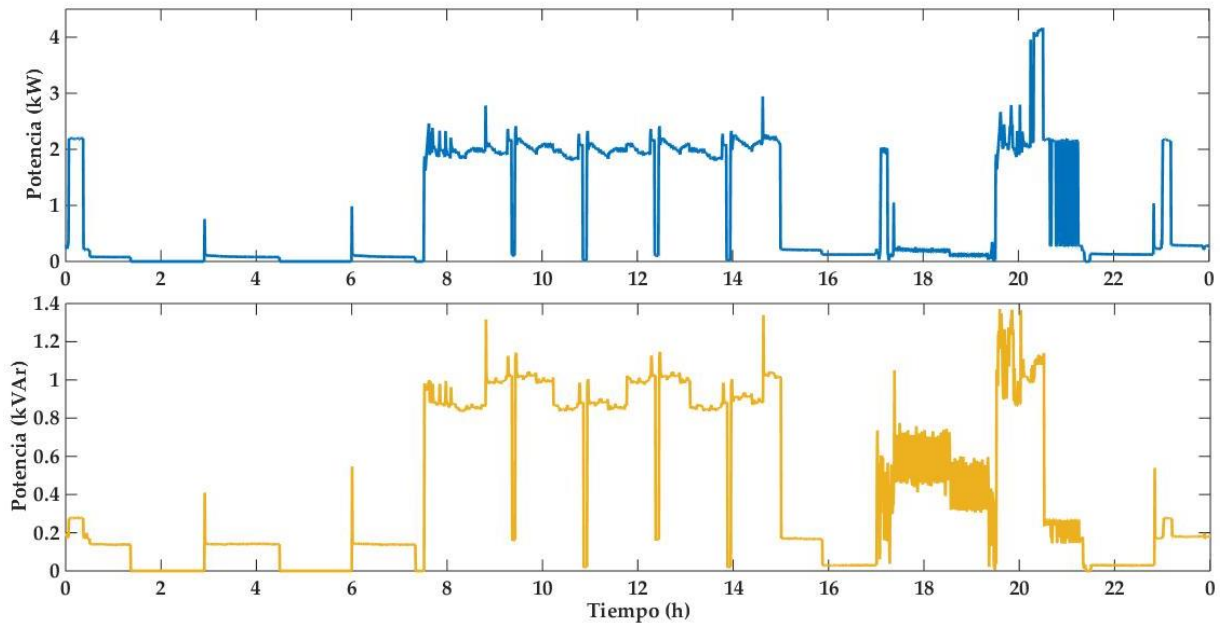


Figura 52. Potencia activa y reactiva total consumida en un día típico de invierno

En la gráfica de la comparación de las dos potencias o Figura 53, se observa que, una vez más, durante las horas de madrugada, en las que el frigorífico es el único electrodoméstico en uso, la potencia reactiva supera a la activa de manera cíclica. No obstante, este consumo es despreciable si se compara con el consumo de potencia durante la mañana y la tarde. En el caso de la tarde, la potencia reactiva supera los niveles de consumo de potencia activa.

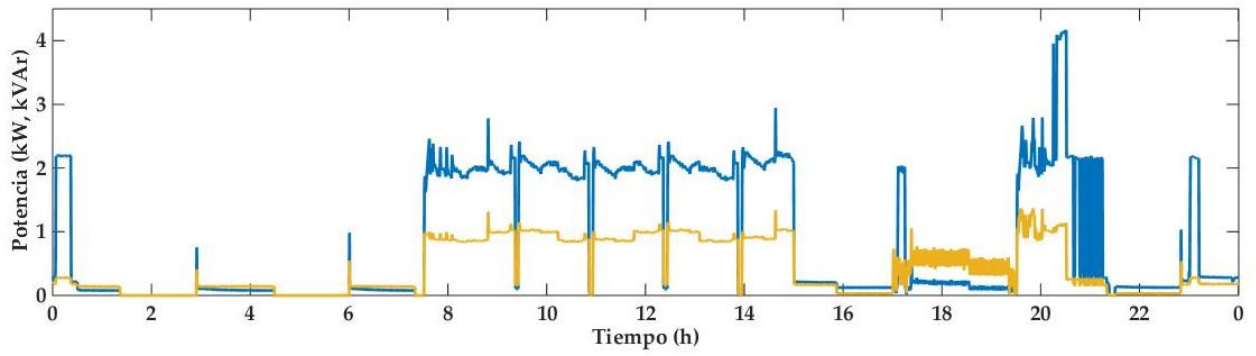


Figura 53. Gráfica combinada de la potencia activa y reactiva de un día de invierno

El factor de potencia, representado en la Figura 54, describe lo descrito anteriormente. Aquellos momentos del día en los que la potencia activa supera a la reactiva, el factor de potencia disminuye su valor.

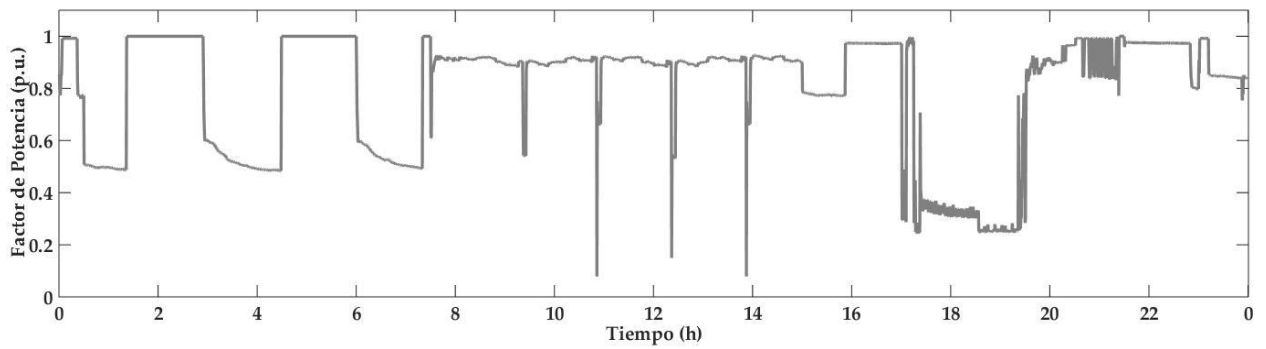


Figura 54. Factor de potencia en el hogar durante un día de invierno



# 6 COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN LA VIVIENDA

A partir de los datos de consumo del capítulo anterior se pretende modelar un compensador de potencia, al que se le denomina ZeroCap. ZeroCap es una pequeña batería de condensadores con diferentes escalones. Se trata de un dispositivo electrónico que se conecta a la red eléctrica del hogar con la finalidad de que éste compense parte de la potencia reactiva consumida por los electrodomésticos presentes en dicho hogar. En este capítulo se analizará el efecto de su uso, evaluando el nuevo consumo de potencia activa y reactiva del hogar y la mejora del factor de potencia. Además, se calculará el ahorro energético en pérdidas de Joule que se obtendría, tanto desde el punto de vista del consumidor como desde el punto de vista de la compañía eléctrica.

## 6.1. Configuración de ZeroCap

Puesto que se precisa de un compensador que opere durante todo el año, para su configuración, se toma el valor más alto de potencia reactiva que se haya registrado en los cuatro días y de igual manera se toma el valor más bajo. La Tabla 3 indica que el valor más alto registrado es 1,6878 kVAr y el valor más bajo 0,00227 kVAr, así como el valor medio que la potencia reactiva ha tomado a lo largo de los cuatro días.

Tabla 3. Valor máximo, mínimo y media del consumo de potencia reactiva durante un año típico

Demanda	Potencia
Máxima	1,6878 kVAr
Mínima	0,00227 kVAr
Media	0,26259 kVAr

Entre estos valores se establecen cuatro estaciones para la compensación de valores de potencia intermedios. Los escalones del compensador ZeroCap resultan de la siguiente manera:

Tabla 4. Estaciones del compensador ZeroCap

Estación	Potencia
$Q_{M\acute{a}x}$	1,6 kVAr
$Q_4$	1,2 kVAr
$Q_3$	0,9 kVAr
$Q_2$	0,6 kVAr
$Q_1$	0,3 kVAr
$Q_{M\acute{i}n}$	0,15 kVAr

## 6.2. ZeroCap en el sistema eléctrico

Cuando no existe compensación de potencia reactiva, en la red doméstica, el contador registra la potencia reactiva consumida por los electrodomésticos, es decir, registra los datos obtenidos y mostrados en las figuras

de los apartados anteriores, de tal manera que:

$$Q_{Cont} = Q_E \quad (6-1)$$

Donde  $Q_{Cont}$  corresponde a la potencia reactiva medida por el contador y  $Q_E$  a la potencia reactiva consumida por los electrodomésticos.

Si en el sistema se instala el compensador, según la configuración que muestra la Figura 55, éste comienza a inyectar potencia reactiva a la red, supliendo parte del consumo de reactiva de los electrodomésticos.

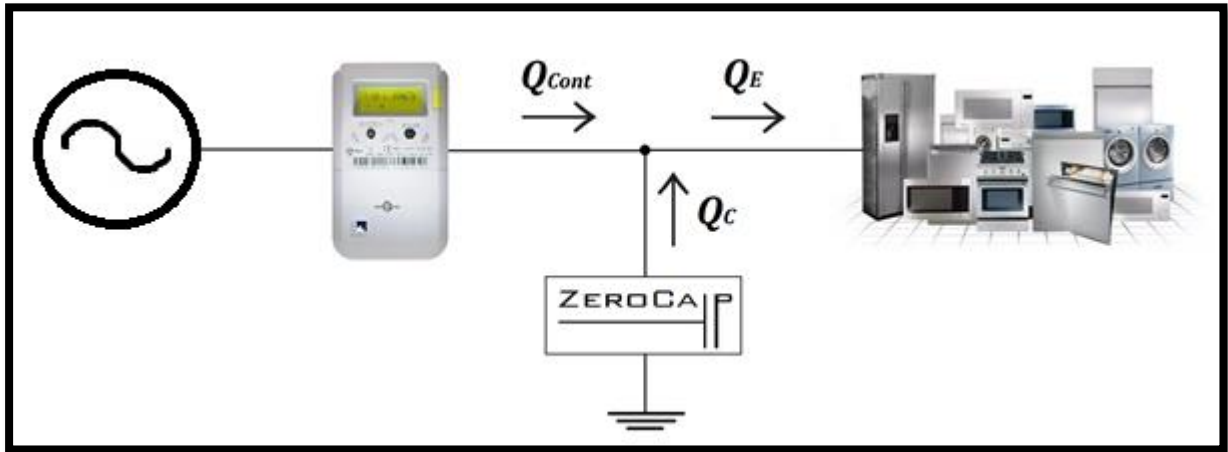


Figura 55. ZeroCap en el sistema eléctrico residencial

Con el uso de ZeroCap se pretende disminuir  $Q_{Cont}$ , de manera que la mayor parte posible de  $Q_E$  sea suplida por el compensador y no por la compañía eléctrica. El consumo de potencia reactiva que se registra en el contador con el uso de ZeroCap es por tanto igual a la diferencia entre el consumo de los electrodomésticos y la potencia del compensador, tal y como se muestra en la ecuación 6-2.

$$Q'_{Cont} = Q_E - Q_C \quad (6-2)$$

El valor de  $Q'_{Cont}$  es la potencia reactiva medida por el contador una vez se ha instalado el compensador ZeroCap y  $Q_C$  toma los diferentes valores mostrados con anterioridad en la Tabla 3 en función del valor de  $Q_E$ . La Tabla 5 recoge los rangos de  $Q_E$  con su respectiva estación de funcionamiento del compesador. Los rangos de  $Q_E$  se establecieron de manera que en ningún momento hubiera sobrecompensación y teniendo en cuenta el perfil de consumo de este caso en particular para que el ahorro fuera el máximo posible dado el número de escalones establecido.

Tabla 5. Valores de  $Q_C$  en función de  $Q_E$

$Q_E$	$Q_C$	Estación
$\geq 1,6$ kVAr	1,6 kVAr	$Q_{M\acute{a}x}$
1,20000-1,59999 kVAr	1,2 kVAr	$Q_4$
0,90000-1,19999 kVAr	0,9 kVAr	$Q_3$
0,60000-0,89999 kVAr	0,6 kVAr	$Q_2$
0,30000-0,59999 kVAr	0,3 kVAr	$Q_1$
0,15000-0,29999 kVAr	0,15 kVAr	$Q_{M\acute{i}n}$

### 6.3. Ahorro energético

En este apartado se analiza y calcula el ahorro provocado por la instalación de ZeroCap. Primero se analiza desde el punto de vista del consumidor y, posteriormente, desde el punto de vista de la compañía eléctrica.

### 6.3.1. A nivel de consumidor

Para analizar el ahorro a nivel de consumidor se analiza el consumo de potencia activa, reactiva y factor de potencia registrado por el contador una vez se ha instalado ZeroCap en el sistema eléctrico del hogar. Este nuevo consumo se compara con el consumo anterior a la instalación. Posteriormente se calcula el ahorro obtenido en pérdidas Joule y, por último, se analiza la mejora en el factor de potencia en la vivienda.

#### 6.3.1.1. Ahorro en consumo de potencia reactiva

Tras la instalación de ZeroCap, el nuevo consumo,  $Q'_{cont}$ , frente al consumo anterior a la instalación durante los cuatro días típicos se muestra en las siguientes figuras. En las figuras, el consumo de potencia en color amarillo se corresponde con el consumo registrado por el contador eléctrico después de instalar ZeroCap ( $Q'_{cont}$ ). El consumo que aparece en verde es el consumo de potencia reactiva registrado por el contador antes de la instalación de ZeroCap, coincide con el valor de  $Q_E$ .

En el día de primavera, mostrado en la Figura 56, se observa que el uso de ZeroCap elimina prácticamente todo el consumo de potencia reactiva debido al frigorífico y, además, reduce a la prácticamente la mitad el consumo en las horas de más gasto. En un día de primavera el consumo de potencia reactiva medio es de 3,1367 kVAr antes de la instalación de ZeroCap. El consumo diario de potencia reactiva medio en la vivienda con ZeroCap instalado es de 0,6557 kVAr. Se trata de un ahorro del 79% al día.

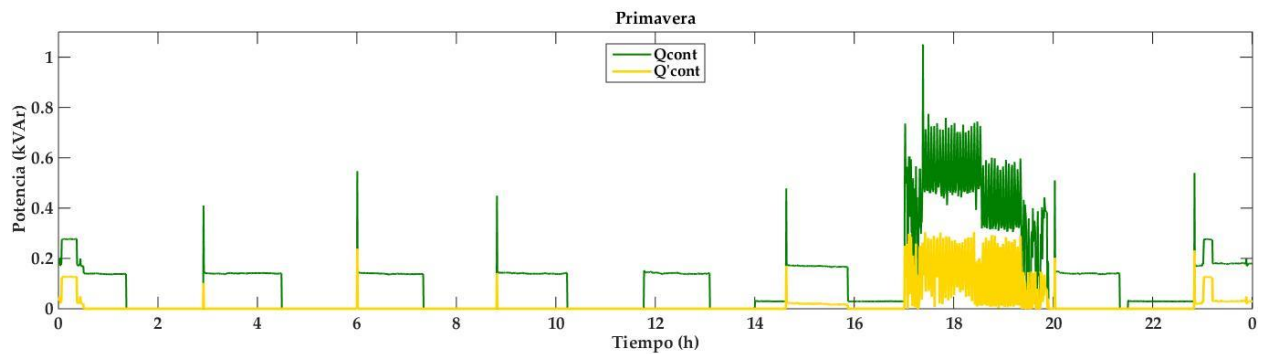


Figura 56. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de primavera

En el día de verano, mostrado en la Figura 57, ZeroCap ha reducido notablemente los grandes consumos del día, debidos en mayor parte por la climatización. En un día de verano típico el consumo de potencia reactiva en la vivienda es 9,0649 kVAr. Después de la instalación de ZeroCap el consumo medio de potencia reactiva es 1,1950 kVAr. Se trata de un ahorro del 87% al día.

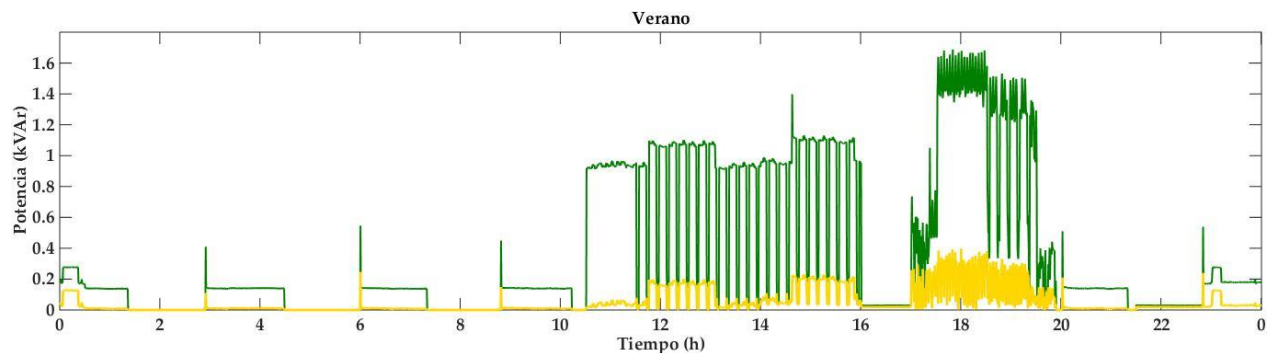


Figura 57. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de verano

En el día de otoño, mostrado en la Figura 58, se observa que el uso de ZeroCap elimina prácticamente todo el consumo de potencia reactiva debido al frigorífico y reduce a la prácticamente la mitad el consumo en las horas de más gasto, debidas al uso de la lavadora y la secadora, principalmente. En un día de otoño el consumo de potencia reactiva medio es de 3,2361 kVAr antes de la instalación de ZeroCap. El consumo diario de potencia reactiva medio en la vivienda con ZeroCap instalado es de 0,7338 kVAr. Se trata de un ahorro del 77% al día.

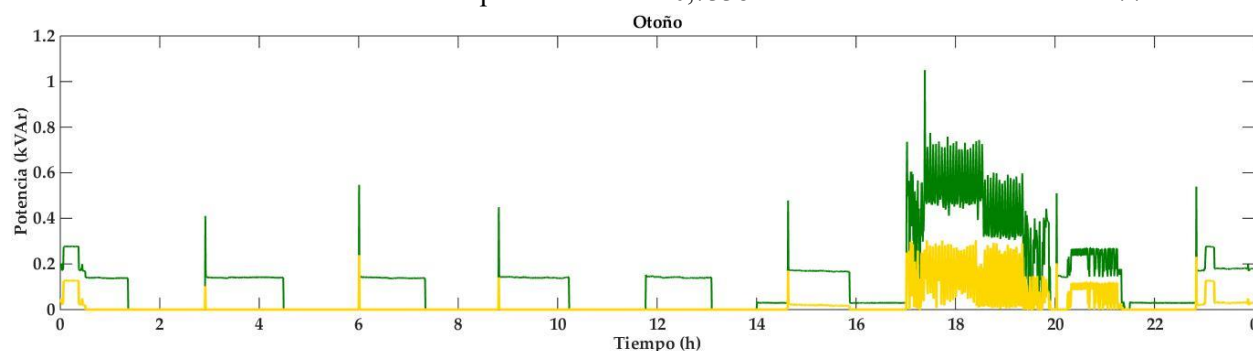


Figura 58. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de otoño

En el día de invierno, mostrado en la Figura 59, se observa que el uso de ZeroCap reduce elimina prácticamente todo el consumo de potencia reactiva debido al frigorífico y reduce a la prácticamente la mitad el consumo en las horas de más gasto, debidas al uso de la climatización, la lavadora y la secadora, principalmente. En un día de invierno el consumo de potencia reactiva medio es de 10,6111 kVAr antes de la instalación de ZeroCap. Es, por tanto, el día de mayor consumo. Por otra parte, el consumo diario de potencia reactiva medio en la vivienda con ZeroCap instalado es de 2,1087 kVAr. Se trata de un ahorro del 80% al día.

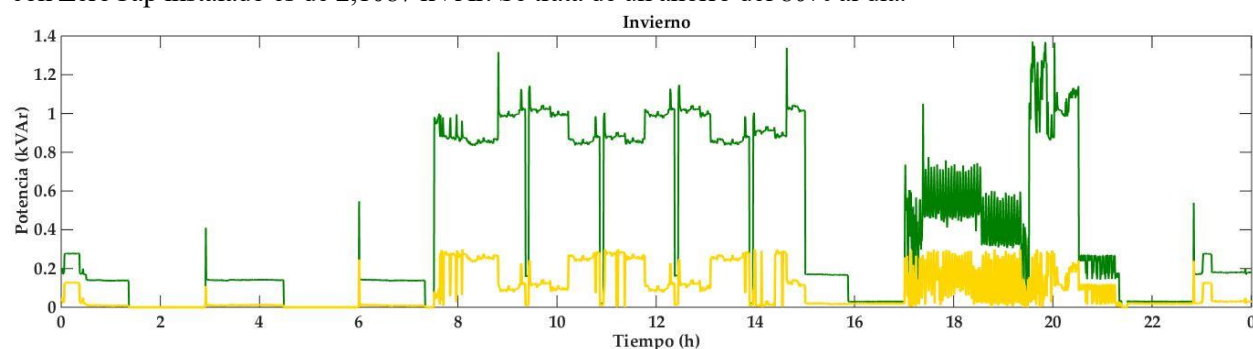


Figura 59. Potencia reactiva antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de invierno

De las cuatro estaciones, invierno es la estación en la que más potencia reactiva se consume de media. Sin embargo, la estación en la que mayor eficiencia tiene ZeroCap es verano. Por otra parte, a partir de los datos de todo el año se obtiene que el consumo medio de potencia reactiva es de 0,2626 kVAr. Con ZeroCap el consumo medio se reduce a 0,0473 kVAr. La media de consumo ha disminuído 0,2153 kVAr. Para evaluar la eficiencia del compensador se consideran únicamente los periodos en los que el consumo es distinto a cero, por ser éstos los tiempos en los que el compensador está actuando. Como resultado, el consumo de potencia reactiva ha disminuído de media 0,28 kVAr con la instalación de ZeroCap. Se puede afirmar que ZeroCap ha conseguido descargar la red y que el porcentaje medio de descarga de la red al año es del 76,4%. Esto quiere decir que, de media, por cada kilovoltio-amperio reactivo que consumen los electrodomésticos, el contador registra 0,236 kVAr y el compensador aporta 0,764 kVAr.

### 6.3.1.2. Ahorro en pérdidas

El consumo de potencia reactiva genera pérdidas en forma de calor a través del cableado, las llamas pérdidas por efecto Joule. La disminución de potencia reactiva supone un ahorro en estas pérdidas. Para el cálculo de este ahorro se supusieron 50 metros de longitud para el cableado de la red doméstica. Los parámetros del cableado se seleccionaron del Catálogo Prysmian: Cables y Accesorios de Baja Tensión [22] suponiendo las condiciones estándar de instalación según la norma UNE 20.460-5-523 (Tabla 6).

Tabla 6. Datos cuantitativos de la instalación

Parámetro	Valor
Temperatura ambiente	40 °C
Temperatura instalaciones soterradas	25 °C
Intensidad máxima	30 A
Voltaje	230 V (Monofásica)
Frecuencia	50 Hz
Reactancia <sup>1</sup>	0,08 Ω/km
Longitud	50 m

Se seleccionó el modelo para instalaciones interiores o receptoras Afumex DUO unipolar de cobre y con aislamiento PVC. Para el cálculo de la sección se tuvo como criterio limitante el criterio de densidad de corriente, por tratarse de una línea corta y de alta utilización. La sección del cable indicada en el catálogo, según los parámetros considerados, es de 4 mm<sup>2</sup>.

El valor de la resistividad ( $\rho$ ) del cobre se estima empleando la fórmula de la UNE 20003 (IEC 28):

$$\rho_{Cu(T)} = \frac{1}{58} \cdot (1 + 0,00393 \cdot (T - 20)) \quad (6-3)$$

Donde T es la temperatura del conductor. Se ha considerado T=25 °C. La resistividad resulta 0,0176 Ω·mm<sup>2</sup>/m. A partir de este dato, en la ecuación 6-4, se calcula la resistencia del cable.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} = 0,0176 \Omega \cdot \frac{mm^2}{m} \cdot \frac{50 m}{4 mm^2} = 0,22 \Omega \quad (6-4)$$

Hallada la resistencia del cable se calcula la potencia disipada por efecto Joule (ecuación 6-5) antes y después de la instalación de ZeroCap. La resistencia se multiplica por dos ya que la corriente va hacia el electrodoméstico a través del cable de fase y retorna por el de neutro.

$$P = 2R \cdot I^2 \quad (6-5)$$

La I toma los valores de corriente de la red doméstica. Su valor se estima trigonométricamente a partir del triángulo de potencias según las siguientes ecuaciones:

$$S_{Cont}^2 = P_{Cont}^2 + Q_{Cont}^2 \quad (6-6)$$

$$S'_{Cont}^2 = P_{Cont}^2 + Q'_{Cont}^2 \quad (6-7)$$

$$S_{Cont} = V \cdot I \quad (6-8)$$

<sup>1</sup> Con carácter general y salvo una indicación más exacta podemos considerar 0,08 Ω/km para circuitos monofásicos o trifásicos con conductores aislados sin cubierta o cables con cubierta unipolares o con cubierta multipolares en los que sus conductores estén en contacto, independientemente de la sección, naturaleza del conductor (Cu o Al), disposición y sistema de instalación. Esta aproximación está contemplada en la norma francesa UTE C 15-105.

$$S'_{cont} = V \cdot I' \quad (6-9)$$

$S'_{cont}$ ,  $Q'_{cont}$  y  $I'$  se corresponden con los valores de la potencia aparente, potencia reactiva e intensidad, respectivamente, después de la instalación de ZeroCap. Las intensidades antes y después del compensador se despejan de las ecuaciones 6-8 y 6-9, y se obtiene la potencia disipada por efecto Joule según la ecuación 6-5.

En las siguientes figuras se exponen los resultados. Se observa la intensidad y la potencia disipada por efecto Joule antes y después de ZeroCap en cada uno de los días típicos.

Durante la primavera, el uso de ZeroCap hizo disminuir la intensidad de corriente un 30%. Esta disminución se ilustra en la Figura 60. La disminución es mayor durante los periodos en los cuales el consumo de potencia reactiva se ha conseguido disminuir notablemente. Esto es, durante los ciclos de funcionamiento estacionario del frigorífico y el uso de la lavadora.

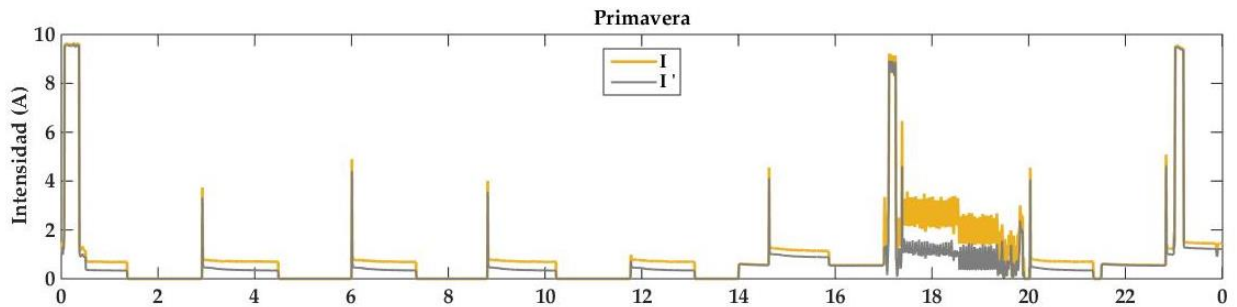


Figura 60. Intensidad consumida antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de primavera

Gracias a la reducción de corriente, las pérdidas por efecto Joule disminuyeron, tal y como muestra la Figura 61. En primavera el consumo de energía, en kilovatios-hora, debido al efecto Joule es de 0,0557 kWh al día y 5,0687 kWh durante los 91 días que dura la estación. Después de la instalación de ZeroCap, el consumo por disipación de calor pasa a ser 0,0446 kWh al día y 4,0586 kWh durante la estación completa. El ahorro se produce principalmente durante el uso de la lavadora. Al día el ahorro es de 0,0111 kWh y, considerando la duración completa de la primavera, el ahorro es de 1,0101 kWh.

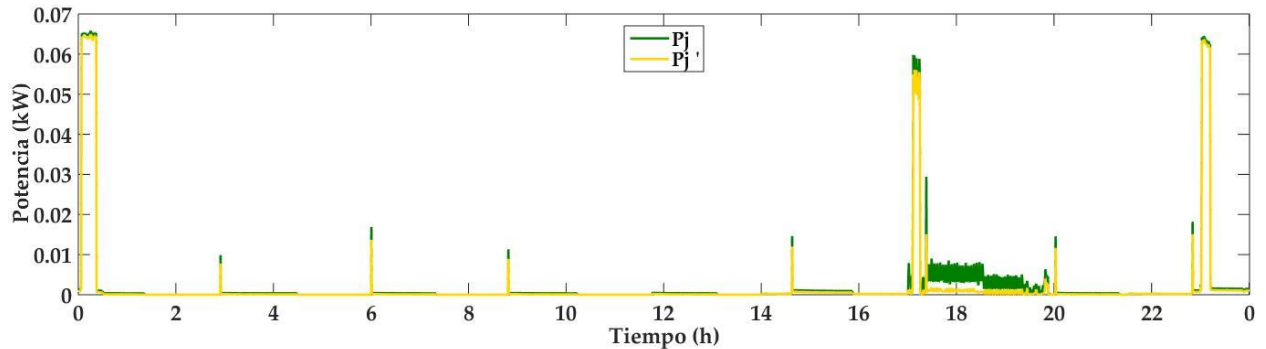


Figura 61. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de primavera

El verano es la estación en la que el consumo por efecto Joule es mayor. En este período, ZeroCap resulta tener una eficiencia del 20% en la disminución de la corriente. Durante los tiempos de más consumos, es decir, durante el uso simultáneo de la lavadora y la climatización, la disminución de intensidad es más efectiva. La Figura 62 muestra la intensidad de corriente en la vivienda antes y después de ZeroCap durante la estación de verano.

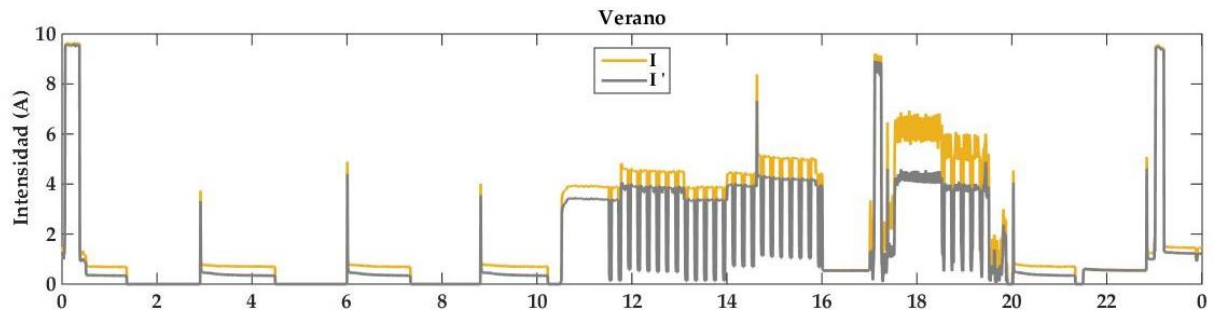


Figura 62. Intensidad consumida antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de verano

La disminución de pérdidas por efecto Joule durante la estación de verano se muestra en la Figura 63. La disminución en este caso vuelve a ser más notable durante los altos consumos diarios. Estos son el uso de la climatización y la lavadora. Durante el verano el consumo diario debido al efecto Joule es de 0,3691 kWh y de 33,9572 kWh durante la estación completa. El consumo de la vivienda causado por pérdidas de calor una vez instalado ZeroCap se reduce a 0,2593 kWh diarios y 23,8556 kWh considerando la estación de verano. El ahorro, por tanto, es de 0,1098 kWh al día y de 10,1016 kWh durante la duración del verano completa.

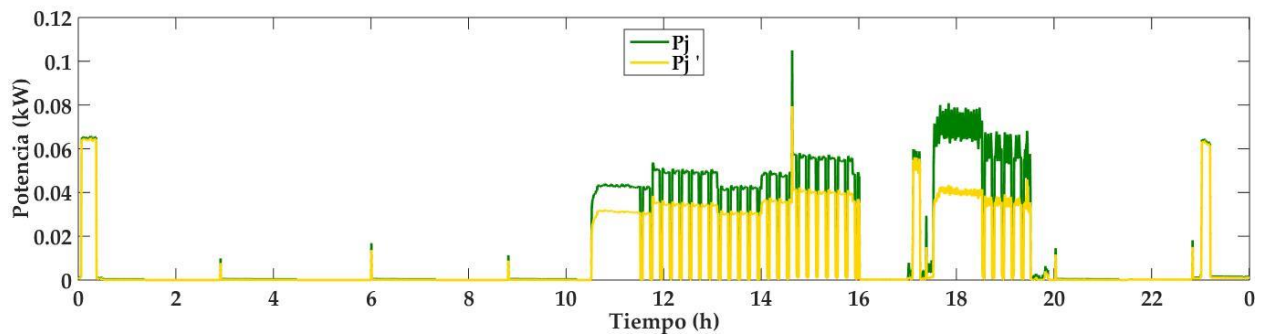


Figura 63. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de verano

En otoño, el consumo de intensidad medio disminuyó un 21,5% con el uso de ZeroCap. La disminución se hace más evidente en los casos en los que la potencia reactiva se ha conseguido disminuir de manera más eficiente. Esto es durante los ciclos estacionarios del frigorífico y el funcionamiento de la lavadora. En la Figura 64 se observa el consumo de intensidad antes y después de la instalación de ZeroCap en la vivienda.

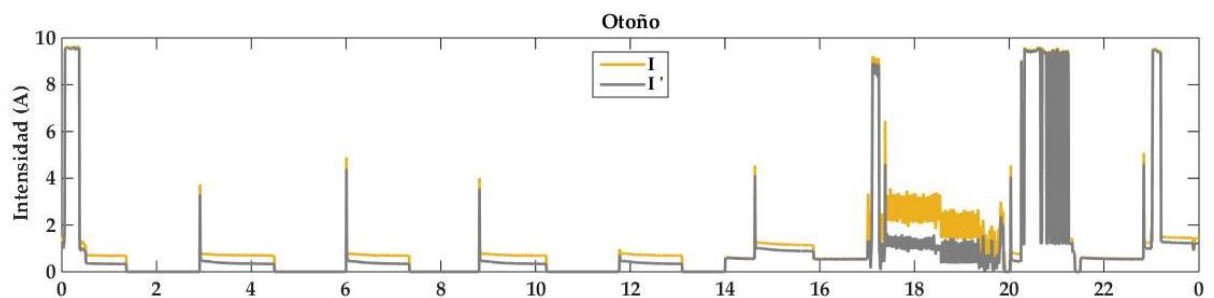


Figura 64. Intensidad consumida antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de otoño

La disminución en el consumo de intensidad da como resultado un ahorro en pérdidas Joule que se refleja en la Figura 65, para la estación de otoño. En la figura se observa que el ahorro en pérdidas se produce principalmente durante el uso de la lavadora. Durante el otoño, el consumo de energía debido a este tipo de pérdidas es de 0,1004 kWh al día y de 9,1364 kWh durante la estación completa. Después de la instalación de ZeroCap, el consumo se redujo a 0,0888 kWh diarios y 8,0808 kWh durante la estación completa. El ahorro, por tanto, es de 0,0116 kWh al día y 1,0556 kWh durante el otoño.

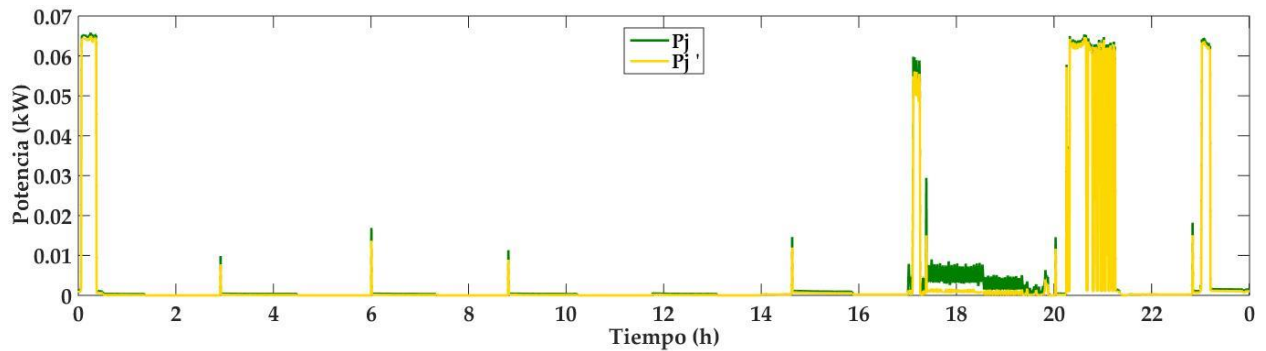


Figura 65. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de otoño

Para el caso del invierno, la diferencia entre la intensidad consumida antes y después de ZeroCap se muestra en la Figura 66. En este caso, una vez más el ahorro es mayor durante el uso de la lavadora y la climatización. Durante el invierno, el uso de ZeroCap permitió un ahorro en la intensidad de corriente del 11,6%.

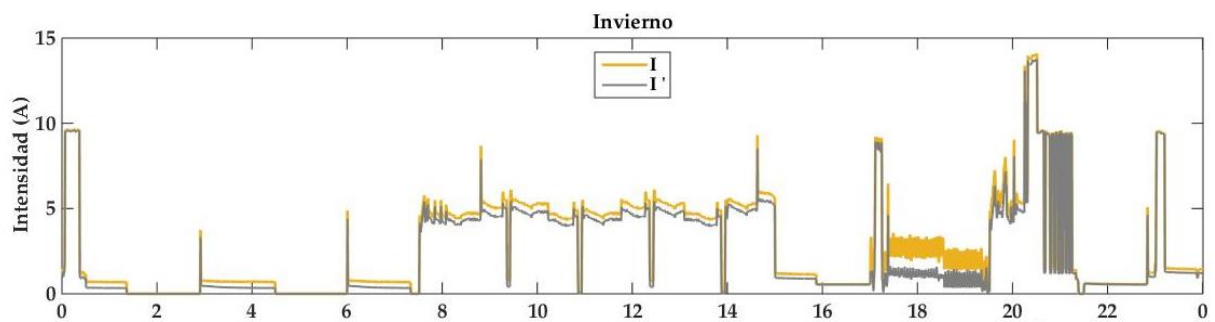


Figura 66. Intensidad y potencia consumidas antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de invierno

En términos de energía, el ahorro es mayor durante el uso de la climatización, tal y como se observa en la Figura 67. En ella se observa el consumo de potencia Joule antes y después de la instalación de ZeroCap durante un día de invierno. El consumo diario de este tipo de pérdidas es de 0,6698 kWh y de 60,9518 kWh durante el invierno completo. Una vez instalado ZeroCap, las pérdidas se reducen a 0,5645 kWh al día y 51,3695 kWh durante la estación. Esto supone, por tanto, un ahorro de 0,1053 kWh diarios y 9,5823 kWh durante el invierno completo.

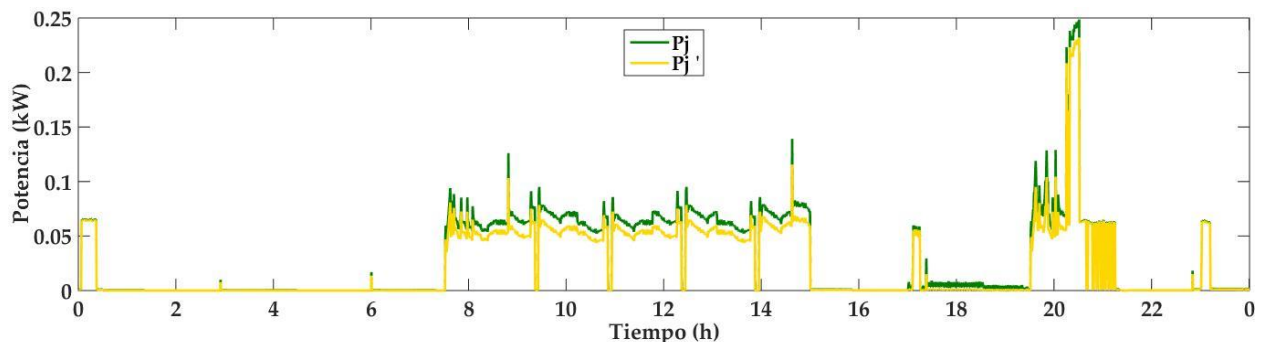


Figura 67. Potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en un día típico de invierno

A partir de los datos, se obtiene que, como consecuencia de la disipación por efecto Joule causado por la potencia reactiva, la vivienda consume al año 109,1141 kWh. Tras la instalación de ZeroCap este consumo se reduce a 87,2645 kWh. El ahorro de energía disipada por efecto joule a lo largo un año en un hogar resulta ser de 21,7496 kWh. El ahorro mayor se da en verano e invierno, con un ahorro de 10,1016 kWh y 9,5823 kWh respectivamente. Además, la climatización y el uso de la lavadora resultan ser los consumidores principales en aquellas estaciones del año en las que han sido empleados. Por otra parte, las estaciones en las que menos ahorro se consigue son la primavera y el otoño, donde el ahorro es de 1,0101 kWh y 1,0556 kWh respectivamente. Los datos citados aparecen en la Tabla 7.



Tabla 7. Pérdidas por efecto Joule durante un año en la vivienda

	Potencia media (kW)	Energía (kWh)
Sin ZeroCap	0,01244	109,1141
Con ZeroCap	0,00996	87,2645
Ahorro	0,00247	21,7496

### 6.3.1.3. Mejora del factor de potencia

El uso del compensador ZeroCap mejora el factor de potencia del sistema eléctrico. Para estimar esta mejora del factor de potencia se emplean los datos obtenidos en el apartado anterior:  $S_{Cont}$  y  $S'_{Cont}$ . Estos datos se igualan, conforme al triángulo de potencias, a la potencia activa que registra el contador, tal y como se muestra en las ecuaciones 6-10 y 6-11:

$$P_{Cont} = S_{Cont} \cdot \cos\varphi \quad (6-10)$$

$$P_{Cont} = S'_{Cont} \cdot \cos\varphi' \quad (6-11)$$

De las ecuaciones se despeja el factor de potencia antes y después de la instalación del compensador. El factor de potencia, antes y después de la instalación del compensador, a lo largo de las veinticuatro horas de cada día típico se muestra en las siguientes figuras.

La Figura 68, en concreto, representa el factor de potencia en un día de primavera. La gráfica amarilla reprenta  $\cos\varphi$  antes de ZeroCap, mientras la gráfica verde lo representa con ZeroCap instalado. El factor de potencia se consigue mejorar hasta prácticamente la unidad en todo momento salvo el caso de la lavadora, en el que el factor de potencia aumenta desde 0,3 hasta 0,8 aproximadamente.

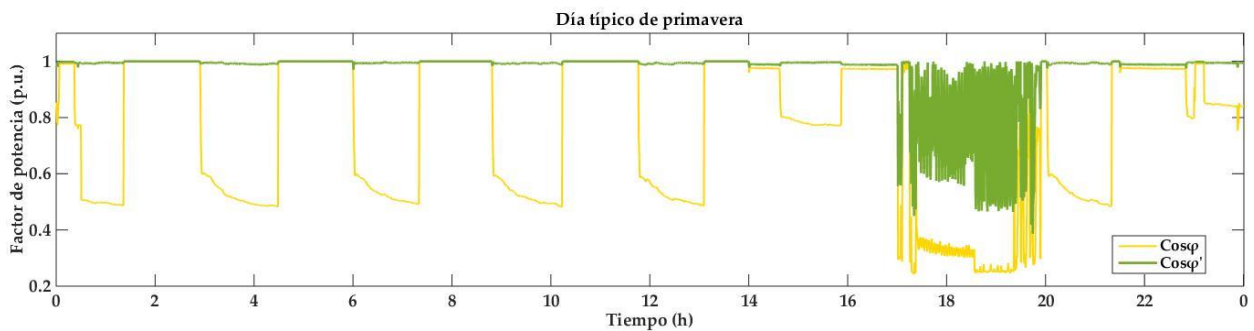


Figura 68. Factor de potencia durante un día típico de primavera, antes y después de ZeroCap

La Figura 69 muestra el factor de potencia en un día de verano antes y después de la instalación de ZeroCap en el hogar. El factor de potencia mejora hasta prácticamente la unidad. Una vez más, durante el uso de la lavadora el  $\cos\varphi$  no consigue alcanzar la unidad. No obstante, si se comparan el factor de potencia en primavera (Figura 68) y verano (Figura 69) durante las 17:00 y las 20:00, cabe destacar que el uso de la lavadora y la climatización simultáneamente parece mejorar el factor de potencia.

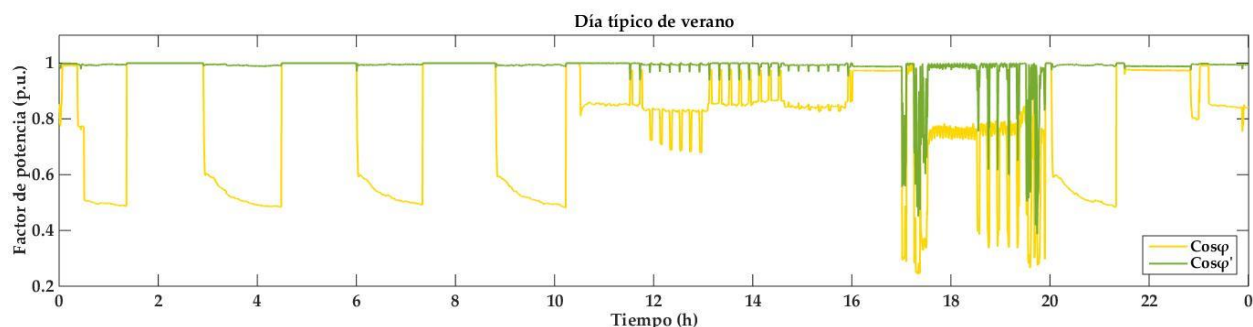


Figura 69. Factor de potencia durante un día típico de verano, antes y después de ZeroCap

El perfil del factor de potencia durante el día típico de otoño, mostrado en la Figura 70, es similar al del día de primavera. La única diferencia es el uso de la secadora alrededor de las 20:30, cuyo factor de potencia se consigue mejorar prácticamente hasta la unidad.

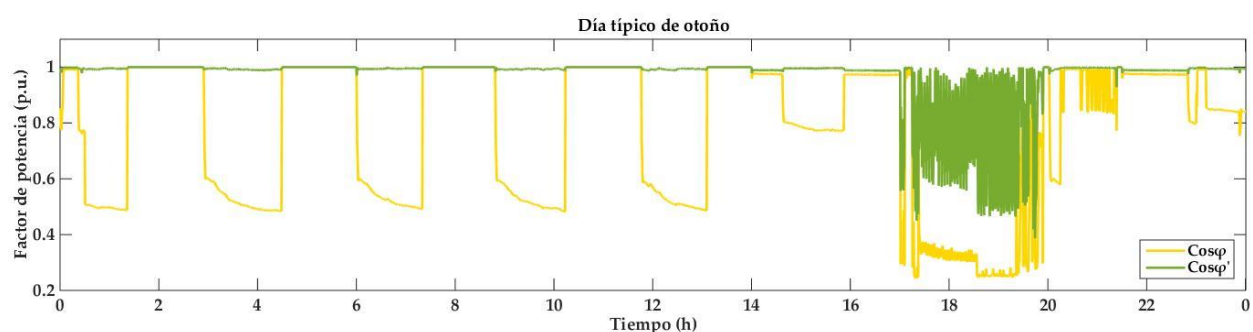


Figura 70. Factor de potencia durante un día típico de otoño, antes y después de ZeroCap

El factor de potencia durante el día de invierno, antes y después de la instalación de ZeroCap, se muestra en la Figura 71. En esta figura se observa que el factor de potencia se consigue mejorar una vez más hasta prácticamente la unidad durante todo el día, salvo durante el uso de la lavadora y la climatización, donde el factor mejora de 0,4 hasta 0,8 aproximadamente.

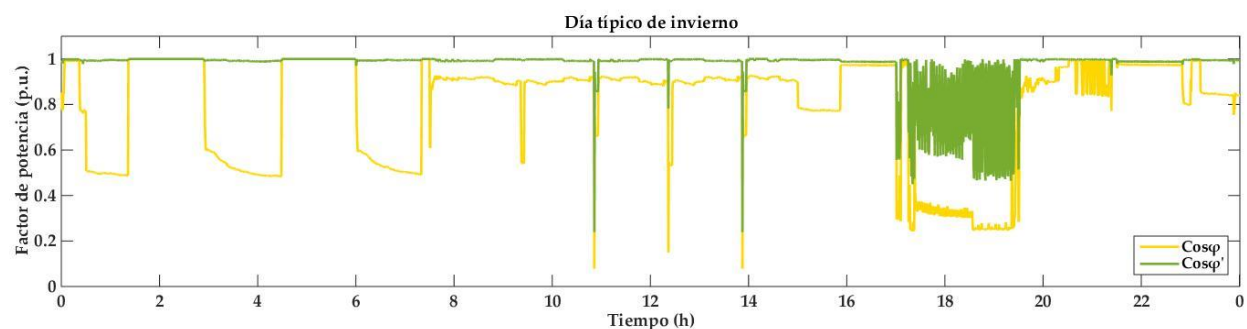


Figura 71. Factor de potencia durante un día típico de invierno, antes y después de ZeroCap

### 6.3.2. Ahorro a nivel de compañía eléctrica

Para evaluar el ahorro que supondría para la compañía eléctrica la compensación de potencia reactiva en el sector residencial en primer lugar se considera un edificio destinado principalmente a viviendas. El edificio se compone de diez plantas y cuatro viviendas en cada planta. Posteriormente, a partir del ahorro energético obtenido en el edificio se extrapola el ahorro energético en cuatro edificios y el correspondiente transformador MT/BT, suponiendo el uso generalizado de ZeroCap en las viviendas.

Según la ITC-BT-25, la carga total correspondiente a un edificio destinado a viviendas resulta de la suma de la carga correspondiente al conjunto de viviendas, de los servicios generales del edificio, de la correspondiente a los locales comerciales y de los garajes que forman parte del mismo. Puesto que el objetivo en este caso es el de evaluar el ahorro de potencia en la vivienda, se tiene en cuenta únicamente el conjunto de viviendas. La Figura

72 muestra un esquema del edificio a tener en cuenta.

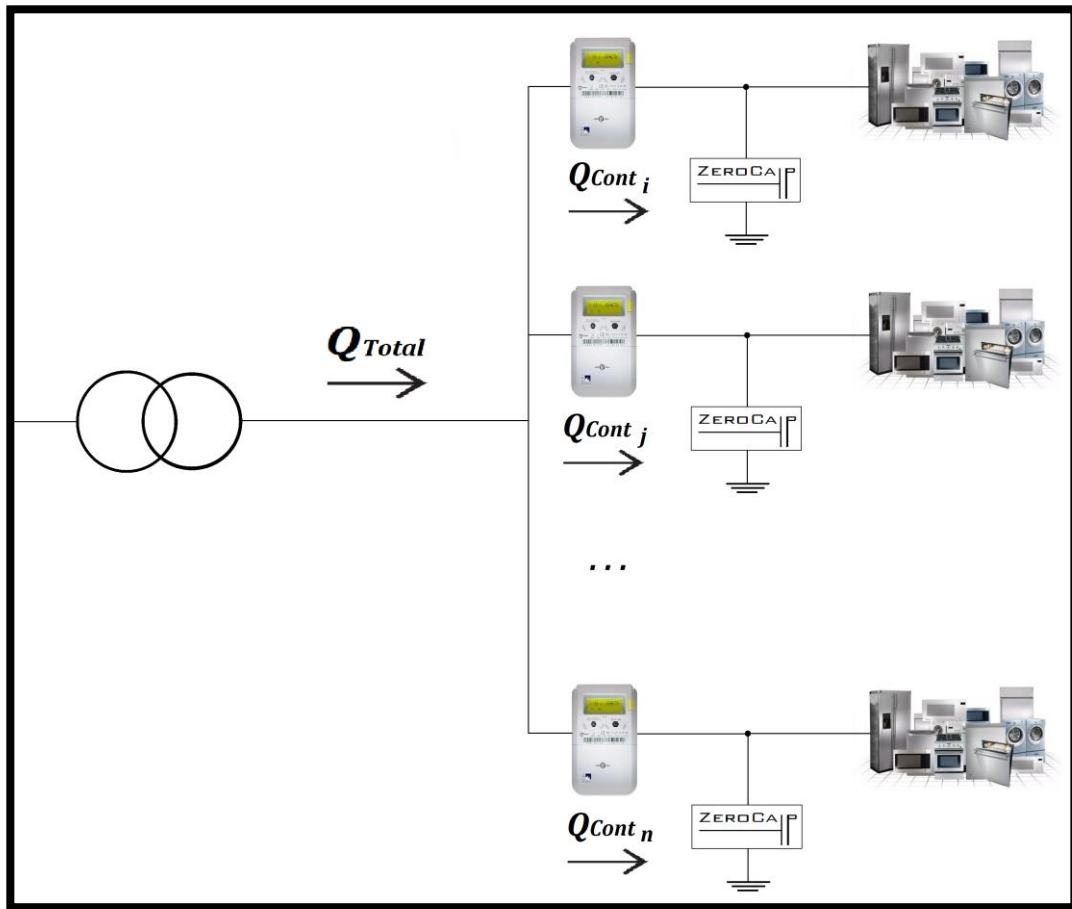


Figura 72. Esquema de red para bloque de viviendas

La previsión de carga del edificio se obtiene multiplicando la media aritmética de las potencias máximas previstas en cada vivienda, por el coeficiente de simultaneidad indicado en la Tabla 8, según el número de viviendas. En este caso, el número de viviendas en el edificio es 40. Se considera que todas las viviendas tienen el mismo perfil de consumo y que éste es igual al obtenido en el apartado anterior. Por tanto, la media aritmética de las potencias máximas previstas en cada vivienda se considerará igual a la potencia máxima en el caso anterior, esto es  $\bar{Q}_{M\acute{a}x}=1,6878$  kVAr. El coeficiente de simultaneidad resulta ser 24,8. Según lo anterior, la previsión de carga para el edificio es 41,857 kVAr.

Tabla 8. Coeficiente de simultaneidad, según el número de viviendas

Nº Viviendas (n)	Coeficiente de Simultaneidad
1	1
2	2
3	3
4	3,8
5	4,6
6	5,4
7	6,2
8	7
9	7,8
10	8,5
11	9,2
12	9,9
13	10,6
14	11,3
15	11,9
16	12,5
17	13,1
18	13,7
19	14,3
20	14,8
21	15,3
n>21	$15,3+(n-21)\cdot 0,5$

A continuación, para obtener los perfiles de consumo del edificio, se multiplican los consumos de potencia activa (P) y potencia reactiva antes (Q) y después (Q') de la instalación del compensador en la vivienda tenida en cuenta en los apartados anteriores por el coeficiente de simultaneidad. Los niveles de intensidad y la mejora en el factor de potencia se obtienen mediante el mismo procedimiento llevado a cabo en el caso de la vivienda unifamiliar. Las pérdidas Joule producidas en el edificio también se obtienen multiplicando las pérdidas que se producen en una vivienda y el factor de simultaneidad. Además, para el caso del cálculo del ahorro energético de la compañía distribuidora se tiene en cuenta el ahorro en pérdidas Joule que se produce en el transformador MT/BT. En este trabajo se eligió el Transformador hermético de llenado integral de Ormazabal [23] de 630 kVA. Se trata de un transformador que cumple con las normas UNE 21428, EN 50464 y IEC 60076. Las pérdidas que se producen en el cableado que une los edificios y el transformador se consideran despreciables.

Para determinar la intensidad que recorre el bobinado del transformador se considera que existe un transformador por cada cuatro edificios, de manera que la suma de las intensidades que consumen los cuatro edificios es la intensidad que recorrerá el devanado secundario del transformador en cuestión. Se calculan las pérdidas únicamente para el segundo devanado, ya que la intensidad que recorre el primer devanado es despreciable respecto a la que recorre el segundo. La resistencia del cobre que conforma el devanado se obtiene a partir de las características eléctricas del transformador, mostradas en la Tabla 9.

Tabla 9. Características eléctricas transformador MT/BT Ormazabal [23]

Características eléctricas	
Voltaje (kV)	24
Potencia asignada (kVA)	630
Pérdidas en Vacío – Po (W)	1030
Pérdidas en Carga – Pk (W)	6500

En primer lugar, a partir de la potencia y el voltaje nominal obtenemos la intensidad nominal mediante la ecuación 6-12.

$$P_n = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_n \quad (6-12)$$

En esta ecuación  $P_n$  se corresponde con la potencia nominal, medida en kilovoltio-amperios;  $V_n$  representa el voltaje, medido en kilovoltios, e  $I_n$  es la intensidad nominal en el circuito primario del transformador. Despejando la intensidad nominal, ésta resulta tener un valor de 15,1554 A. Las pérdidas en carga constituyen el total de las pérdidas del transformador cuando se aplica una carga, incluidas las pérdidas en el hierro o pérdidas en vacío. Para obtener la potencia consumida por efecto Joule calculamos la diferencia entre las pérdidas en carga y las pérdidas en vacío. Por tanto, las pérdidas por efecto Joule tienen un valor de 5470 W. A partir de este dato y la intensidad nominal, se calcula la resistencia del transformador en el bobinado primario mediante la ecuación 6-14.

$$P = 3 \cdot R \cdot I^2 \quad (6-14)$$

De la ecuación se obtiene que la resistencia del circuito primario transformador tiene un valor de 7,9384  $\Omega$ . Por tratarse de la resistencia del bobinado primario, se obtiene la resistencia del secundario mediante el cociente entre la resistencia calculada y la relación de transformación (24 kV/420 V) al cuadrado. La resistencia del bobinado secundario es 0,00243  $\Omega$ . Una vez el valor de la resistencia del transformador es conocido podemos calcular las pérdidas de Joule que se producen cuando por el transformador atraviesa la intensidad proveniente de los cuatro edificios de viviendas. En este caso la intensidad en la ecuación 6-14 toma los valores que resultan de la suma de intensidades de los cuatro edificios de viviendas. Una vez obtenida la potencia Joule en el transformador ésta se suma a las pérdidas que se producen en la red de los edificios.

### 6.3.2.1. Ahorro en consumo de potencia reactiva

En este apartado se muestran las figuras con el consumo de potencia reactiva en la red de cuatro edificios de viviendas durante un día típico de primavera, verano, otoño e invierno; antes y después de la instalación de ZeroCap en cada una de las viviendas que componen los edificios. La línea verde representa el consumo de potencia reactiva antes de la instalación (Q) y la línea azul representa el consumo después de ésta (Q').

El caso del día de primavera se muestra en la Figura 73. En esta estación el consumo medio de potencia reactiva es de 12,55 kVAr. Después de la instalación de ZeroCap, este consumo disminuye a 2,62 kVAr de media. Esto significa un ahorro del 79%.

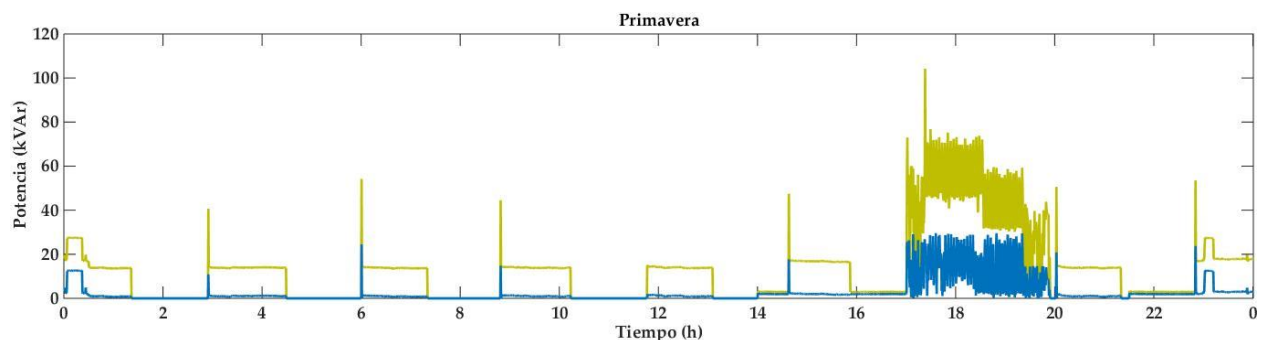


Figura 73. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de primavera

La Figura 74 muestra el ahorro en verano. Durante un día de esta estación del año, el consumo medio de potencia reactiva es de 36,26 kVAr, que se consiguen reducir a un consumo medio de 4,78 kVAr. Esto supone un ahorro del 87%. El ahorro mayor se consigue durante las horas centrales del día y la tarde.

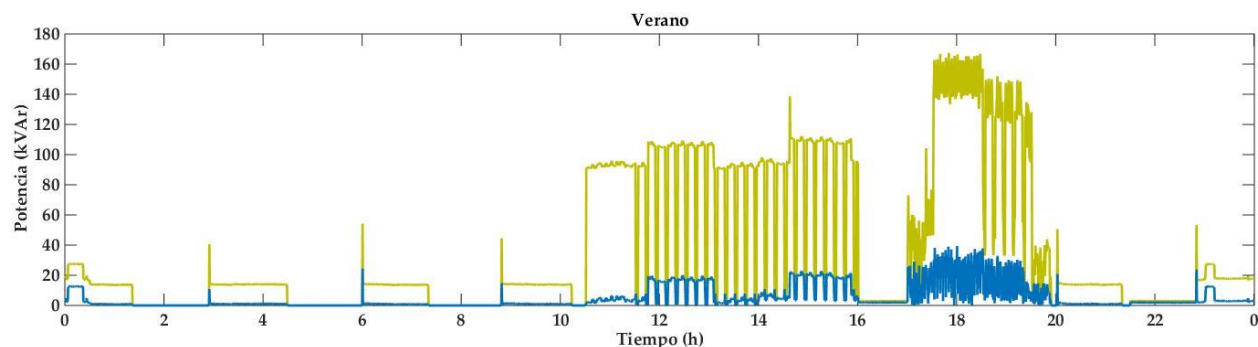


Figura 74. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de verano

El consumo durante el otoño, representado en la Figura 75, tiene un valor medio de 12,94 kVAr. Este consumo medio se reduce hasta 2,94 kVAr. Se trata de un ahorro del 77%.

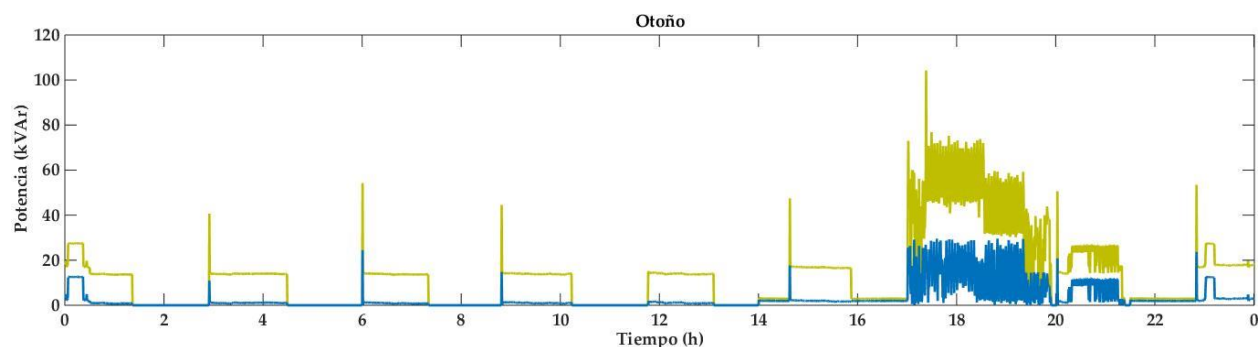


Figura 75. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de otoño

Durante el invierno, el consumo medio antes de la instalación de ZeroCap es de 42,44 kVAr. La Figura 76 muestra que, durante el invierno, los mayores consumos alcanzan los 100 kVAr. Después de la instalación de ZeroCap el consumo medio se reduce a 8,43 kVAr, lo que significa un ahorro del 80%.

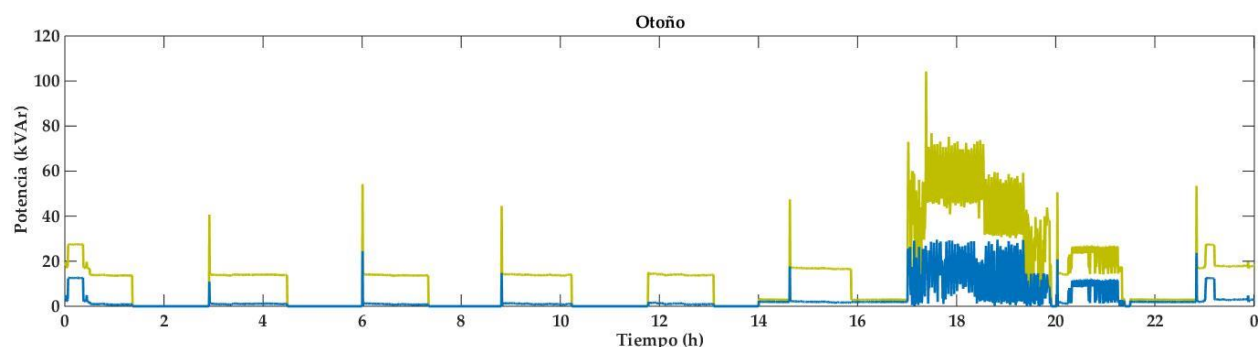


Figura 76. Consumo de potencia reactiva en las totalidad de viviendas de cuatro edificios, antes y después de la instalación de ZeroCap. Día típico de invierno

Según los datos, el consumo de reactiva durante todo el año, sin ZeroCap, es 26 kVAr de media. Con ZeroCap el consumo medio anual disminuye a 4,7 kVAr. Para evaluar la eficiencia de ZeroCap, se calcula el ahorro medio en los períodos en los que hay consumo, que es el tiempo en el que actúa el compensador. Se obtiene que el consumo de reactiva disminuye de media 22 kVAr con la instalación del compensador. Esto significa que la eficiencia del compensador es del 76,4%. Por otra parte, de todas las estaciones del año, en la ciudad de Sevilla el verano resulta ser la estación de mayor consumo, a la vez que la estación en la que se consigue un mayor ahorro.

### 6.3.2.2. Ahorro en pérdidas

En este apartado se incluyen las pérdidas que se producen en el transformador BT/MT. Las gráficas de este apartado muestran los niveles de intensidad que demandan los cuatro edificios de viviendas considerados, así como la potencia disipada por efecto Joule antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas. La línea naranja representa la intensidad antes de la instalación ( $I$ ) y la línea gris la intensidad después de ésta ( $I'$ ). En el gráfico de la potencia disipada por efecto Joule, la línea verde corresponde al consumo antes de la instalación ( $P_j$ ) y la línea amarilla el consumo después de ésta ( $P'_j$ )

El comportamiento del consumo de intensidad en los edificios durante primavera se refleja en la Figura 77. De media durante esta estación se consumen 92 A. El uso de ZeroCap supone un ahorro del 30% del consumo de intensidad y la intensidad media consumida disminuye a 65,5 A.

El ahorro en intensidad que recorre la red provoca un ahorro en consumo de potencia por efecto Joule. Antes de la instalación de ZeroCap el consumo medio de potencia disipada en la red eléctrica de los edificios y el transformador BT/MT es de 0,2539 kW. Tras la instalación de ZeroCap, la potencia media disipada disminuye a 0,2031 kW. En un día de primavera la energía consumida debido a la disipación es de 6,1 kWh. Una vez considerada la instalación generalizada de ZeroCap, la energía consumida al día es de 4,87 kWh. Se trata de un ahorro de 1,23 kWh al día. El ahorro energético es del 20%.

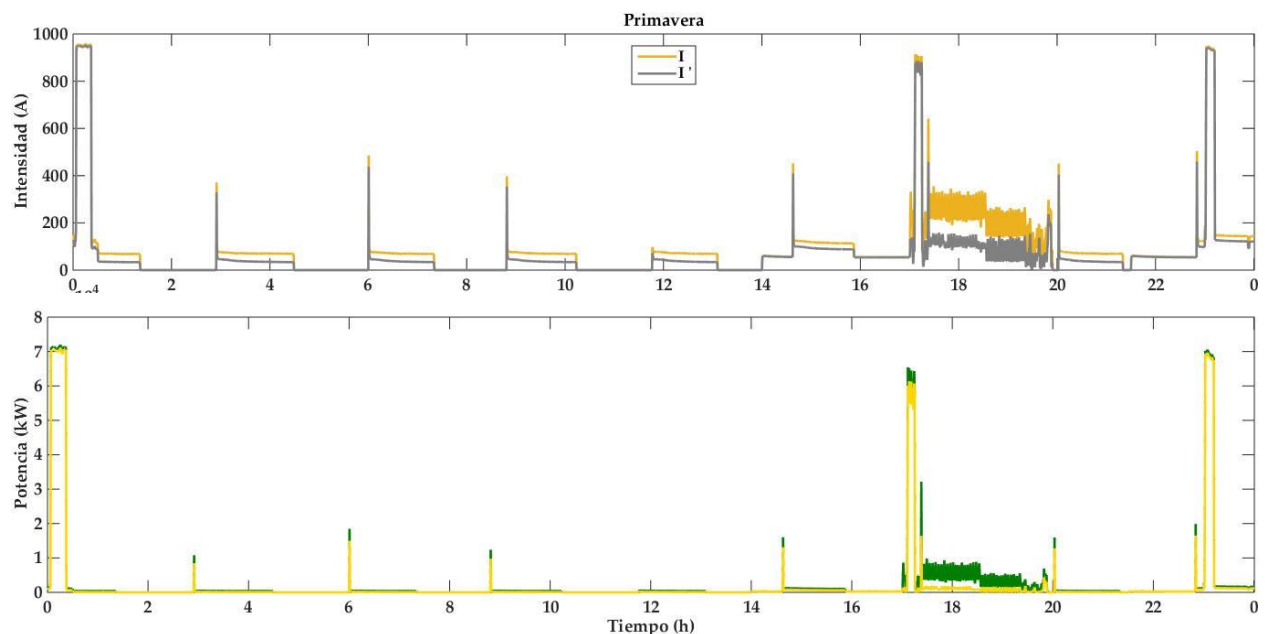


Figura 77. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de primavera

En el caso del verano, mostrado en la Figura 78, la intensidad media consumida es de 286 A. Este consumo se reduce a 233 A de media tras la instalación de ZeroCap. El ahorro medio es, por tanto, del 20%.

En verano, la potencia media disipada asciende a 1,68 kW. Con ZeroCap el consumo medio disminuye a 1,18 kW. En términos de energía, al día, la red consume 40,38 kWh. Considerando el uso de ZeroCap el consumo se reduce a 28,37 kWh al día, lo que supone un ahorro del 30%. El ahorro más significativo se alcanza durante las horas centrales del día y la tarde.

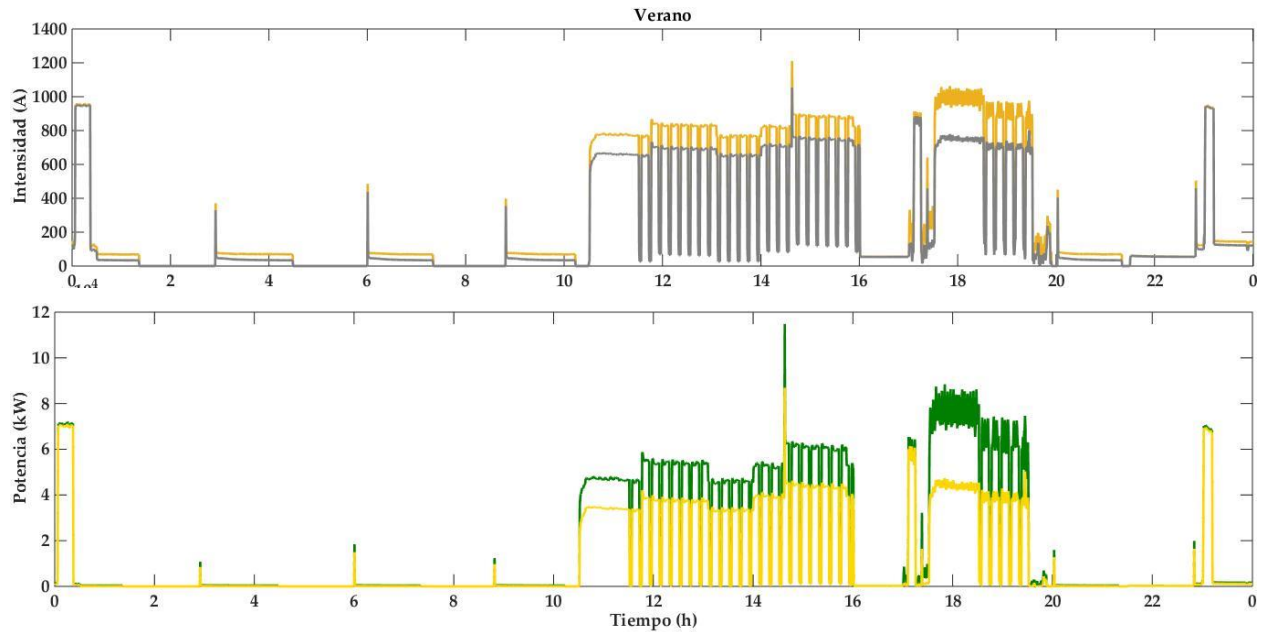


Figura 78. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de verano

En otoño, las viviendas de los cuatro edificios consumen una media de 119 A. La Figura 79 muestra cómo el uso de ZeroCap hace disminuir la intensidad media a 93,4 A. Esto significa un ahorro del 21,5%.

En términos de potencia disipada por efecto Joule, en otoño esta potencia es de media 0,46 kW. Con el uso del compensador de potencia el consumo medio diario disminuye a 0,40 kW. En términos de energía, las viviendas consideradas consumen al día 10,98 kWh por efecto Joule. Tras suponer el uso generalizado de ZeroCap este consumo se reduce a 9,72 kWh. En porcentaje, el ahorro es del 11,5%.

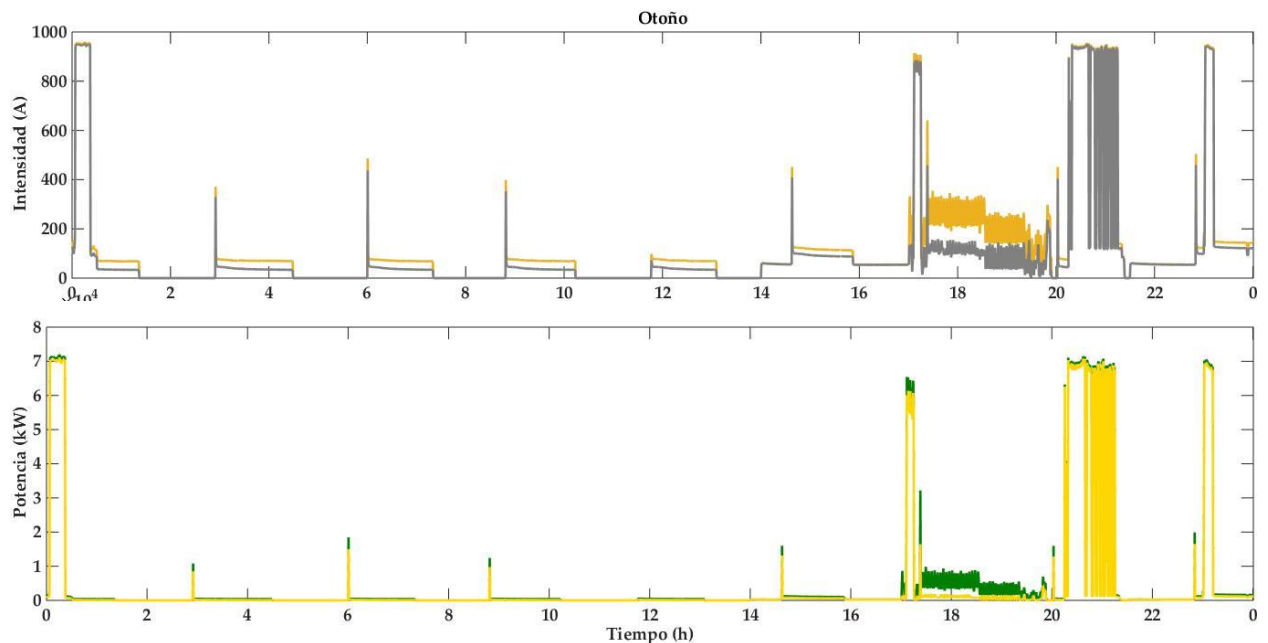


Figura 79. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de otoño

La Figura 80 muestra en la primera gráfica el consumo de intensidad del conjunto de viviendas durante un día típico de invierno. En esta estación, el consumo medio es de 433,1 A. Tras la instalación de ZeroCap este consumo disminuye a 383,2 A. Esto supone un ahorro del 11,52%.

Durante el invierno, la potencia media disipada por efecto Joule es de 5,61 kW antes de la instalación de ZeroCap y de 4,73 kW después de la instalación generalizada de ZeroCap. En el caso de la energía consumida por efecto Joule, en un día de invierno, ésta resulta ser de 134,69 kWh. Tras la instalación de ZeroCap este consumo se



reduce a 113,53 kWh al día. Se trata de un ahorro de 21,16 kWh al día, esto es, un ahorro del 16%.

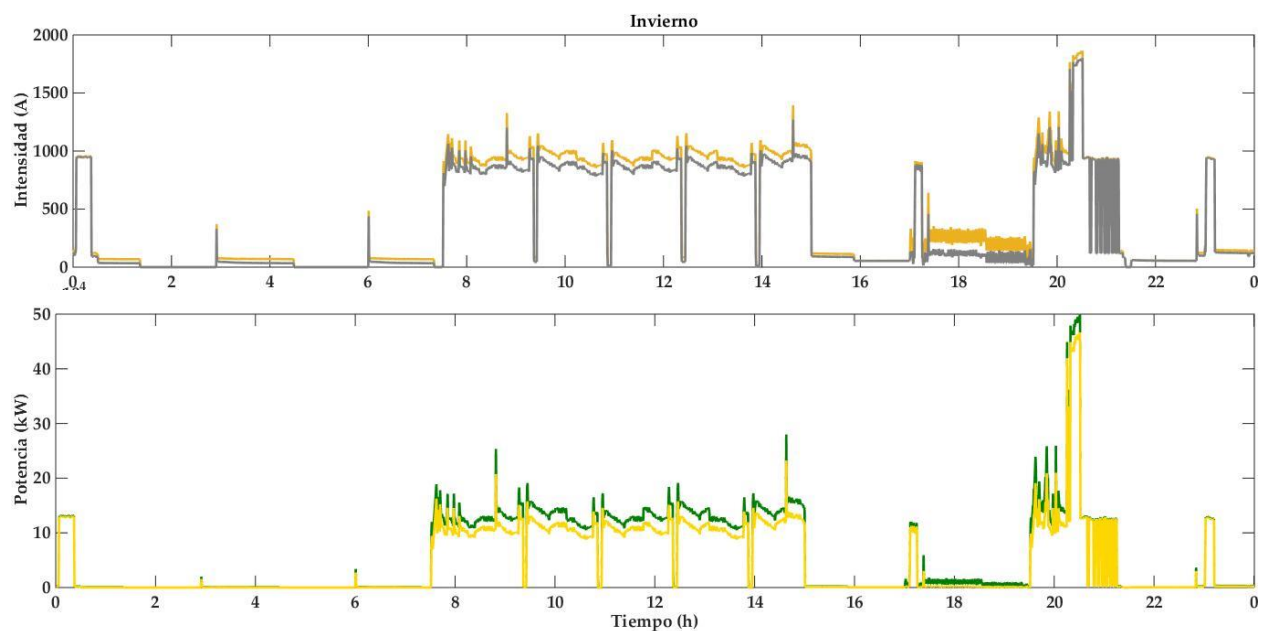


Figura 80. Intensidad consumida y potencia Joule disipada antes y después de la instalación de ZeroCap en las viviendas de cuatro edificios residenciales. Día típico de invierno

Según los datos, los cuatro edificios considerados disipan de media 2 kW, teniendo en cuenta todas las estaciones del año. Con ZeroCap la potencia media disipada es 1,63 kW. En términos de energía, el ahorro de energía disipada por efecto Joule a lo largo del año es 3,27 MWh, siendo la energía disipada 17,53 MWh antes de la instalación de ZeroCap y 14,26 MWh después. La estación del año en la que más ahorro se consigue es en verano (30%), en concreto durante las horas centrales del día. La estación del año en la que menos ahorro supone el uso de ZeroCap es el otoño (11,5%). La Tabla 10 recoge los datos expuestos.

Tabla 10. Pérdidas por efecto Joule durante un año en cuatro edificios de viviendas

	Potencia Media (kW)	Energía (MWh)
Sin ZeroCap	2	17,53
Con ZeroCap	1,63	14,26
Ahorro	0,37	3,27

### 6.3.2.3. Mejora del factor de potencia

Las figuras mostradas en este apartado muestran el factor de potencia en la red BT de cuatro edificios de viviendas y un transformador MT/BT durante los cuatro días típicos del año antes y después de la instalación del compensador. En amarillo se muestra el factor de potencia antes de la instalación. La gráfica verde se corresponde con el factor de potencia después de la instalación.

La Figura 81, en concreto, representa el factor de potencia en un día de primavera. En esta estación del año el factor de potencia se consigue mejorar hasta prácticamente la unidad en todo momento salvo en las horas de la tarde, en las que el factor de potencia aumenta desde una media de 0,3 hasta 0,8 aproximadamente.

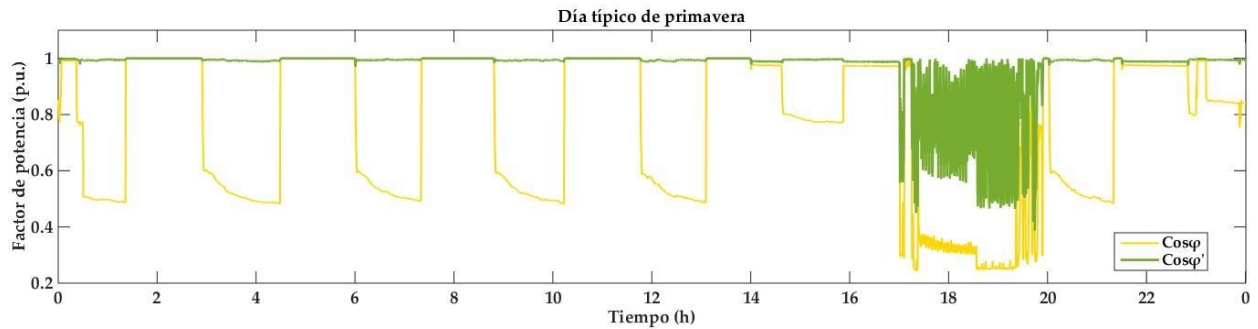


Figura 81. Factor de potencia durante un día típico de primavera en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap

La Figura 82 muestra el factor de potencia en un día de verano antes y después de la instalación de ZeroCap en los cuatro edificios. El factor de potencia mejora hasta prácticamente la unidad. Una vez más, durante la tarde el  $\cos\phi$  presenta mayores oscilaciones.

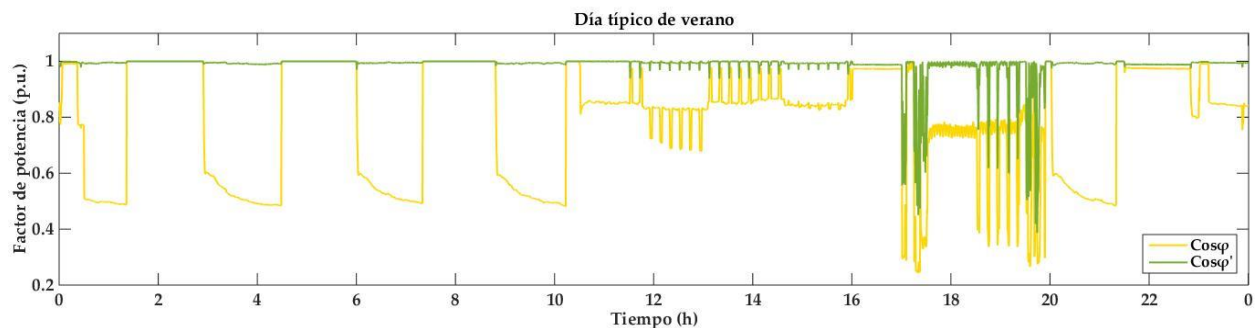


Figura 82. Factor de potencia durante un día típico de verano en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap

El perfil del factor de potencia durante el día típico de otoño, mostrado en la Figura 83, es similar al del día de primavera. El factor de potencia se mantiene en la unidad gracias al uso de ZeroCap durante prácticamente la gran mayoría del día.

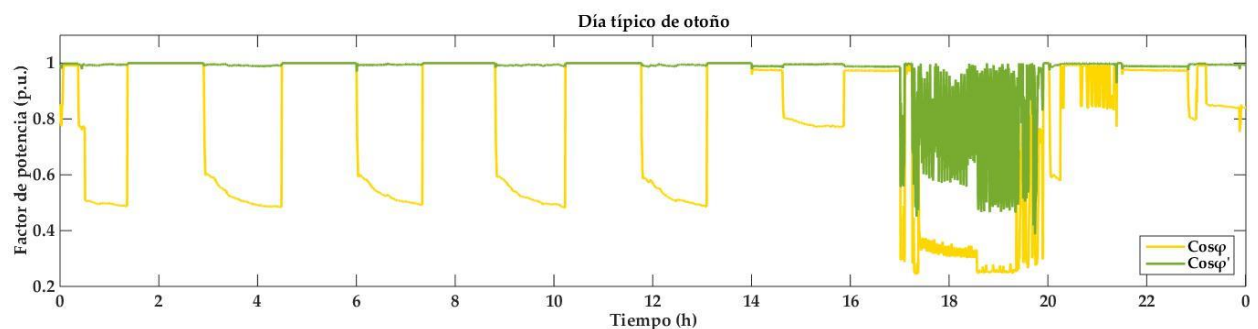


Figura 83. Factor de potencia durante un día típico de otoño en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap

El factor de potencia durante el día de invierno, antes y después de la instalación de ZeroCap, se muestra en la Figura 84. En esta figura se observa que el factor de potencia se consigue mejorar una vez más hasta prácticamente la unidad durante todo el día, salvo durante la tarde, donde el factor mejora de 0,4 hasta 0,8 aproximadamente. Durante las horas de la mañana pueden existir algunas oscilaciones.

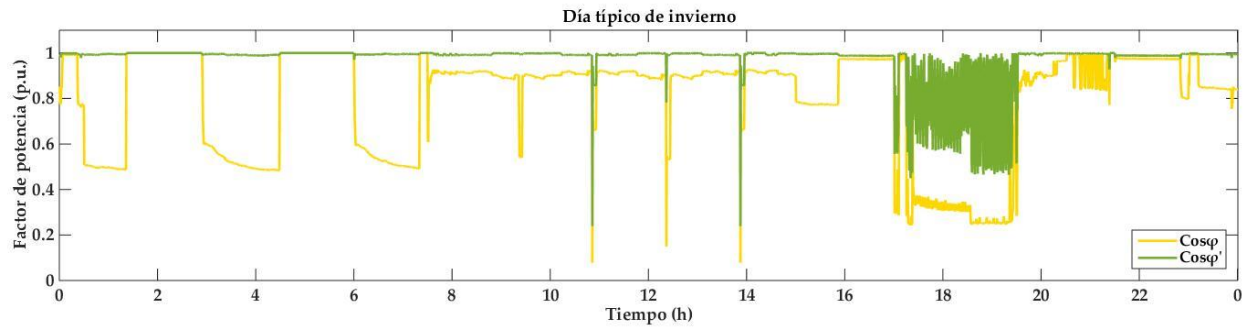


Figura 84. Factor de potencia durante un día típico de invierno en la red de cuatro edificios de viviendas, antes y después de ZeroCap

# 7 CONCLUSIONES

---

En este trabajo se ha tratado de evaluar el efecto de usar un compensador en un sistema de red doméstica. Los resultados aquí expuestos lejos de ser datos exactos, pretenden brindar un orden de magnitud del ahorro que supondría la compensación.

En el caso de la vivienda unifamiliar, de las cuatro estaciones, invierno es la estación en la que más potencia reactiva se consume de media (10,6111 kVAr antes de ZeroCap y 2,1087 kVAr después de ZeroCap). Sin embargo, el verano es la segunda estación con más consumo de este tipo de potencia y en la que mayor eficiencia presenta el uso de ZeroCap (87%), por lo que el ahorro mayor se produce en verano. Por otra parte, a partir de los datos de todo el año se obtiene que el consumo medio de potencia reactiva es de 0,2626 kVAr. Con ZeroCap el consumo medio se reduce a 0,0473 kVAr. La media de consumo ha disminuído 0,2153 kVAr.

Para evaluar la eficiencia del compensador se consideran únicamente los periodos en los que el consumo es distinto a cero, por ser éstos los tiempos en los que el compensador está actuando. Como resultado, el consumo de potencia reactiva ha disminuído de media 0,28 kVAr con la instalación de ZeroCap. Se puede afirmar que ZeroCap ha conseguido descargar la red y que el porcentaje medio de descarga de la red al año es del 76,4%. Esto quiere decir que, de media, por cada kilovoltio-amperio reactivo que consumen los electrodomésticos, el contador registra 0,236 kVAr y el compensador aporta 0,764 kVAr. A partir de estos datos, se aprecia que ZeroCap consigue eliminar el consumo de este tipo de potencia en la vivienda de manera notable.

Este ahorro en consumo de potencia reactiva en la vivienda unifamiliar provoca una reducción en la intensidad de corriente que supone un ahorro en potencia disipada por efecto Joule. A partir de los datos, se obtiene que, la vivienda consume al año 109,1141 kWh en concepto de este tipo de pérdidas. Tras la instalación de ZeroCap este consumo se reduce a 87,2645 kWh. El ahorro de energía disipada por efecto joule a lo largo un año en un hogar resulta ser de 21,7496 kWh, esto es un ahorro del 20%. El ahorro mayor se da en verano e invierno, con un ahorro de 10,1016 kWh y 9,5823 kWh respectivamente, lo que significa que durante estas dos estaciones se produce prácticamente el ahorro anual total.

A partir de los resultados se observa que en el presente y con la tarificación de potencia reactiva actual, a nivel de consumidor o vivienda unifamiliar, el efecto es poco apreciable. Por una parte, el ahorro en pérdidas por efecto Joule conseguido es del 20%. Por otra parte, si bien el ahorro en consumo de potencia reactiva es considerable, los niveles de consumo de la vivienda considerada no alcanzan los niveles a los cuales esta potencia se penaliza y, por tanto, el ahorro no se ve reflejado en la factura del usuario.

Se debe tener en cuenta que en la vivienda objeto de estudio existe un gran número de dispositivos que no se han tenido en cuenta, por imposibilidades técnicas, tales como la vitrocerámica, ordenadores, cargadores, iluminaria, dispositivos de audio, horno, microondas, etc., y, por otra parte, se deben mencionar mejoras en el trabajo tales como el uso de algunos electrodomésticos durante la adquisición de datos, los cuales presentan un consumo menor del habitual, como el caso del frigorífico, que no contenía carga en su interior ni fue abierto durante el experimento. Además, en el caso de la climatización se refleja el uso de un único split.

Se plantea un escenario futuro en el que la digitalización y un nuevo pararigma en la producción de energía en las viviendas está completamente desarrollada. En este escenario el sector residencial requiere un mayor consumo de potencia reactiva debido al uso masivo de dispositivos electrónicos. Además, se prevé un uso más generalizado de instalaciones fotovoltaicas, que fomentan la sobretensión en la red. Las consecuencias de este supuesto desarrollo de la digitalización y generación distribuída son los desajustes y pérdida de eficiencia en la red eléctrica, lo que podría provocar un cambio en la legislación que suponga una tarificación más estricta en el consumo de este tipo de potencia o bien que se alcancen los límites establecidos en la actualidad.

Con respecto al consumo de los electrodomésticos por separado, la climatización y la lavadora son los consumidores principales de potencia reactiva en aquellas estaciones del año en las que han sido empleados. Esto puede sugerir el uso de la compensación en estos electrodomésticos de mayor consumo de forma individual.

Una posibilidad ventajosa de esta opción planteada es la configuración del compensador para el perfil de consumo específico de cada electrodoméstico en concreto, de manera que la eliminación del consumo de potencia reactiva sea prácticamente del 100%. Sin embargo, esta aplicación implica de forma directa a los fabricantes de electrodomésticos y dispositivos, los cuales verían un coste adicional en la producción aun cuando no se ven afectados por el posterior ahorro energético. En la práctica, por tanto, este modo de compensación es de difícil aplicación.

En el estudio del ahorro en la compañía eléctrica, el uso de compensadores de manera generalizada supone un efecto mucho más considerable. Para la evaluación de este ahorro se tuvieron en cuenta cuatro edificios de 40 viviendas cada uno y un transformador MT/BT. Según los datos, el consumo de reactiva durante todo el año, sin ZeroCap, es 26 kVAr de media. Con ZeroCap el consumo medio anual disminuye a 4,7 kVAr. La eficiencia del compensador es del 82%. Por otra parte, de todas las estaciones del año, en Sevilla el verano resulta ser la estación de mayor consumo, a la vez que la estación en la que se consigue un mayor ahorro.

En términos de potencia disipada por efecto Joule, el conjunto de viviendas considerado disipa de media 2 kW, considerando todas las estaciones del año. Con ZeroCap la potencia media disipada es 1,63 kW. En términos de energía, el ahorro de energía disipada por efecto Joule a lo largo del año es 3,27 MWh, siendo la energía disipada 17,53 MWh antes de la instalación de ZeroCap y 14,26 MWh después. La estación del año en la que más ahorro se consigue es en verano (30%), en concreto durante las horas centrales del día. En este caso, aunque ZeroCap consigue una eficiencia máxima del 30%, el ahorro energético es importante y a considerar por parte de la compañía eléctrica.

ZeroCap también mejora del factor de potencia de manera notable. La mejora del factor de potencia provoca beneficios en la red tales como evitar caídas de tensión, evitar transformadores más recargados y dotar a la red de más capacidad. A largo plazo, esto supone un desgaste menor de la red y un menor coste en mantenimiento.

Como mejoras a implantar en el trabajo si éste se llega a desarrollar, se establecen varias opciones. Una de ellas es el aumento en la eficiencia del compensador, estableciendo más escalones de compensación. Otra mejora es el estudio del comportamiento de consumo de diferentes viviendas reales, teniendo en cuenta una muestra de viviendas de diferentes niveles de consumo, puesto que cabe la posibilidad de que la compensación de potencia en una ciudad sea más eficiente sólo a partir de un cierto nivel de consumo. Además, se debe estudiar el consumo incluyendo todos los electrodomésticos y hacer una estimación del consumo futuro en el sector residencial.

La vivienda ha experimentado una creciente demanda energética en los últimos años y las previsiones plantean que este aumento continuará. Ante la previsión de continuo crecimiento en la demanda de energía eléctrica y el aumento de la digitalización en este sector surge la necesidad de introducir medidas de eficiencia energética en el sistema eléctrico del hogar. En este Trabajo se ha planteado el análisis de la compensación de potencia reactiva en el sector residencial como posible medida de eficiencia y ésta ha demostrado tener un impacto positivo y beneficios para red. Aunque en la actualidad ZeroCap requiere de mejoras en eficiencia, los nuevos acontecimientos sugieren un futuro en el cuál la compensación de potencia reactiva sea beneficioso también en la vivienda.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1]. ANTUNES, Amaro F., et al. Study of harmonic distortion in a residential and commercial LV power system. En *Electrical Power Quality and Utilisation (EPQU)*, 2011 11th International Conference on. IEEE, 2011. p. 1-7.
- [2]. GASTIARENA, M., et al. Uso de la energía en el sector residencial.
- [3]. ENERGY, I. E. A.; World Energy Outlook Special Report (2017). C) *OECD/IEA*, 2017, p. 37.
- [4]. CAMARENA FLORES, Alberto. Análisis de la corrección del factor de potencia por acoplamiento magnético. 2008.
- [5]. VASCONCELLOS, Davel Borges; MARTÍNEZ, Vicente León. Evolución y desarrollo de los dispositivos compensadores de potencia reactiva. *Ingeniería Energética*, 2005, vol. 26, no 2, p. 48-52.
- [6]. Fundación de la Innovación Bankinter. *El Internet de las Cosas. En un mundo conectado de objetos inteligentes*, 2011. Recuperado de [http://boletines.prisadigital.com/El\\_internet\\_de\\_las\\_cosas.pdf](http://boletines.prisadigital.com/El_internet_de_las_cosas.pdf)
- [7]. Botelho, B.: ¿qué es la internet de las cosas? Recuperado de <http://searchdatacenter.techtarget.com/es/cronica/Explicacion-Que-es-la-internet-de-las-cosas>, 2013
- [6]. IDAE; Análisis del consumo energético del sector residencial en España. Proyecto SECH-SPAHOUSEC, 2011.
- [7]. España. Ley 24/2013, de 26 de diciembre, del Sector Eléctrico. Jefatura del Estado, núm. 310, de 27 de diciembre de 2013.
- [8]. CHACÓN JARAMILLO, Paúl Andrés. *Caracterización de curvas de las cargas de alto consumo en el hogar*. 2016. Tesis de Licenciatura.
- [9]. BARRANGÁN VILLAREJO, Manuel. Caracterización del consumo de varios electrodomésticos con estados de funcionamiento diferentes.
- [10]. TORRES, Luis Manuel Rojas, et al. Identificación de variables que impactan en la Eficiencia Energética de Secadoras de ropa.
- [11]. RUIZ, Luis Alberto, et al. Modelo teórico para cuantificar la eficiencia térmica del calentador eléctrico en una secadora doméstica de ropa. 2015.
- [12]. SALINAS, Alfonso Thompson, et al. Mejora de diseño de suspensión de lavadora automática de carga vertical. En *MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 23 al 25 DE SEPTIEMBRE*. 2009.
- [13]. ALCARAZ, Marcelo. Internet de las Cosas. *Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción*, 2014, p. 2-3.
- [14]. INNOVATING IN THE EXPONENTIAL ECONOMY: Digital Disruption and Bridging the New Innovation-Execution Gap. London: VMWare. Li, F. 2018.
- [15]. EVANS, Dave. Internet de las cosas. *Cómo la próxima evolución de Internet lo cambia todo*. Cisco Internet Business Solutions Group-IBSG, 2011, vol. 11, no 1, p. 4-11.
- [18]. REE, Red Eléctrica de España; *El sistema eléctrico español*, 2017
- [19]. PAYÁN, Manuel Burgos. AHORRO ENERGÉTICO: ESTIMACIÓN DE CARGA EN MOTORES DE INDUCCIÓN.
- [20]. "MATLAB." - Mathworks. N.p., n.d. Web. <http://es.mathworks.com/products/matlab/>
- [21]. Dranetz.com; <http://dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/PX5-UsersGuide-RevJ.pdf>
- [22]. PRYSMIAN SPAIN, S.A., Cables y Accesorios para Baja Tensión. Barcelona, 2014.
- [23]. ORMAZABAL velatia, *Transformadores de distribución*, 2001

