

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño y evaluación de un dispositivo de control para el aprovechamiento de los excedentes de una instalación fotovoltaica de autoconsumo en sistemas de ACS

Autor: Álvaro Caballero Novoa

Tutores: Carlos Bordons Alba

Isidoro Lillo Bravo

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

**Diseño y evaluación de un dispositivo de control
para el aprovechamiento de los excedentes de una
instalación fotovoltaica de autoconsumo en sistemas
de ACS**

Autor:

Álvaro Caballero Novoa

Tutores:

Carlos Bordons Alba

Isidoro Lillo Bravo

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Trabajo Fin de Grado: Diseño y evaluación de un dispositivo de control para el aprovechamiento de los excedentes de una instalación fotovoltaica de autoconsumo en sistemas de ACS

Autor: Álvaro Caballero Novoa

Tutores: Carlos Bordons Alba
Isidoro Lillo Bravo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mis padres y a mi hermana

Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer a mis padres su apoyo y su ayuda, no solo en este proyecto, sino también en otros muchos aspectos de mi carrera y de mi vida.

Mi agradecimiento también a los tutores de este proyecto, Carlos Bordons e Isidoro Lillo, por su dedicación y sus consejos.

Álvaro Caballero Novoa

Sevilla, 2021

Resumen

Cada vez son más los hogares que poco a poco deciden pasarse al autoconsumo fotovoltaico. Esta alternativa de abastecimiento de energía, aunque costosa inicialmente, suele ser rentable a largo plazo y responsable con el medioambiente. No obstante, no siempre se consigue un aprovechamiento completo de la energía producida, por lo que suele quedar un excedente de energía.

Como este excedente normalmente acaba vertiéndose a la red eléctrica, una posible solución es usarlo para la generación de ACS. El ACS (Agua Caliente Sanitaria) es agua destinada principalmente para consumo humano (aseo personal, limpieza, etc.) que ha sido previamente calentada. De este modo, se logra un mejor aprovechamiento energético.

Aunque ya existen en el mercado dispositivos capaces de aprovechar dicho excedente energético para este y otros fines, suele ser caro para un consumidor doméstico. Por ello, en este proyecto se persigue desarrollar, programar y evaluar un dispositivo de bajo coste en Arduino para emplear el excedente de energía en una resistencia en un depósito para la generación de ACS.

Abstract

More and more households are gradually deciding to switch to photovoltaic self-consumption. This alternative energy supply, although initially expensive, is profitable in the long term and responsible with the environment. However, full use of the energy produced is not always achieved, so there is usually a surplus of energy.

As this surplus normally ends up being discharged into the electricity grid, a possible solution is to use it for the generation of DHW. DHW (Domestic Hot Water) is water intended mainly for human consumption (personal hygiene, cleaning, etc.) that has been previously heated. In this way, a better energy use is achieved.

Although there are already devices on the market capable of taking advantage of this energy surplus for this and other purposes, it is usually expensive for a normal consumer. Therefore, this project aims to develop, program and evaluate a low-cost device in Arduino to use the surplus energy in a resistance in a tank for the generation of DHW.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract.....	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas.....	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación.....	xx
1 Introducción.....	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivo.....	1
2 Estado del Arte.....	3
2.1. Descripción e interés del problema.....	6
2.1.1 Inyección en la red eléctrica	7
2.1.2 Aprovechamiento del excedente mediante derivadores.....	8
2.2. Soluciones existentes	8
2.2.1 Ejemplo de proyecto existente	8
2.2.2 Ejemplos de productos comerciales existentes.....	9
2.2.2.1 Fronius Ohmpilot.....	9
2.2.2.2 Carlotrón	10
3 Desarrollo	13
3.1 Descripción del sistema.....	13
3.1.1 Arduino UNO	13
3.1.2 Placas fotovoltaicas	13
3.1.3 Inversor Sunny Boy.....	14
3.1.4 Sensores de corriente ACS712	15
3.1.5 Relé de estado sólido	15
3.1.6 Sensor de corriente SCT-013-000.....	16
3.1.7 Resistencia calefactora	17
3.1.8 Cargas de prueba.....	18
3.2 Diseño.....	18
3.3 Montaje.....	20
3.4 Programación	23
4 Pruebas y Resultados	27
4.1 Primera prueba. Comprobación de medidas de corriente y de derivación de excedente a la resistencia	27
4.2 Segunda prueba. Comprobación del comportamiento del dispositivo en una simulación de consumo real	29

5 Conclusiones y Trabajos Futuros	33
5.1 <i>Trabajos futuros</i>	33
Referencias	35
Glosario	39
Anexos	41
<i>Anexo A. Códigos de Arduino</i>	41
Anexo A.1. Código de Arduino para el funcionamiento del dispositivo	41
Anexo A.2. Código de Arduino para la medición de corriente derivada a la resistencia	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Valores de un ejemplo de instalación fotovoltaica para autoconsumo	7
Tabla 2-2. Valor económico de la energía en el periodo	7
Tabla 2-3. Resultados de ahorro económico	8

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Panel fotovoltaico	4
Figura 2-2. Optimizador	4
Figura 2-3. Inversor	5
Figura 2-4. Baterías	5
Figura 2-5. Fronius Ohmpilot	9
Figura 2-6. Configuración del esquema del Fronius Ohmpilot con el resto de componentes	10
Figura 2-7. Carlotrón 6.0	11
Figura 3-1. Arduino UNO	13
Figura 3-2. Conjunto de placas fotovoltaicas	14
Figura 3-3. Sunny Boy	14
Figura 3-4. Sensor de corriente ACS712	15
Figura 3-5. Relé de estado sólido	15
Figura 3-6. Sensor de corriente SCT-013-000	16
Figura 3-7. Transformador de corriente	16
Figura 3-8. Resistencia calefactora	18
Figura 3-9. Foco 1	18
Figura 3-10. Foco 2	18
Figura 3-11. Esquema del sistema completo	19
Figura 3-12. Esquema del subsistema de medida de corriente derivada a la resistencia	20
Figura 3-13. Montaje del dispositivo	20
Figura 3-14. Montaje de los sensores ACS712	21
Figura 3-15. Detalle del conexionado en la primera placa Arduino para los sensores ACS712	21
Figura 3-16. Montaje del relé y del sensor SCT-013	22
Figura 3-17. Detalle del conexionado en la segunda placa Arduino para el sensor SCT-013	22
Figura 3-18. Montaje de las dos placas Arduino con sus placas de prueba	22
Figura 3-19. Diagrama de flujo del programa de funcionamiento del dispositivo	23
Figura 3-20. Diferentes valores de tensión promedio en función del ciclo de trabajo	24
Figura 4-1. Representación de las corrientes de producción, consumo y excedente	28
Figura 4-2. Representación de la corriente excedente derivada al relé	28
Figura 4-3. Ampliación de una región de la Figura 4-2	29
Figura 4-4. Representación de las corrientes de producción, consumo y excedente durante el primer día	30
Figura 4-5. Representación de la corriente excedente derivada al relé durante el primer día	30
Figura 4-6. Representación de las corrientes de producción, consumo y excedente durante el segundo día	31
Figura 4-7. Representación de la corriente excedente derivada al relé durante el segundo día	32

Notación

A	Amperio
I	Intensidad de corriente
kg	Kilogramo
kWh	Kilovatio hora
MHz	Megahercio
mm	Milímetro
ms	Milisegundo
N	Número de espiras o de vueltas
V	Tensión; voltio
W	Vatio
μ F	Microfaradio
Ω	Ohmio
€	Euro

1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto, aunque está principalmente enmarcado en áreas de la Ingeniería tales como el Control Automático o la Electrónica, también abarca otras áreas, como la Termodinámica o la Teoría de Circuitos Eléctricos. En este primer capítulo, se expondrán la motivación y el objetivo principal del desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

1.1. Motivación

Actualmente, son cada vez más los hogares que poco a poco deciden pasarse al autoconsumo energético, concretamente al autoconsumo fotovoltaico. Aunque es una solución que implica un desembolso inicial costoso, resulta bastante rentable a largo plazo, con el consiguiente ahorro en la factura de la luz. Además, es un método de autoabastecimiento responsable con el medioambiente.

Sin embargo, no siempre es fácil aprovechar completamente toda la energía producida debido a que no hay necesidad en ese momento de consumirla, por lo que suele quedar un excedente de energía que, salvo que se dispongan de baterías para almacenarlo, se acaba vertiendo a la red eléctrica.

Una de las mejores soluciones a este problema es aprovechar el excedente de energía en forma de calor, concretamente para calentar agua. Dado que el ACS es, como se verá más adelante en el apartado 2.1, la que presenta una mayor demanda de energía en una vivienda convencional, es una buena solución para un aprovechamiento óptimo de todo ese excedente.

Ya existen en el mercado algunos dispositivos capaces de aprovechar el excedente energético para calentar el agua de un depósito, generar calefacción por infrarrojos e incluso cargar las baterías de un coche eléctrico, todo ello mediante un control y una regulación inteligentes del consumo energético. No obstante, resultan caros para el consumidor doméstico.

La principal motivación es conseguir controlar los flujos de excedente de energía de un sistema fotovoltaico doméstico hacia varias cargas para minimizar su intercambio con la red, en este caso hacia una resistencia calefactora en un depósito de agua, mediante un dispositivo económicamente asequible.

1.2. Objetivo

Como ya se ha explicado, los dispositivos que existen en el mercado para el aprovechamiento de excedente fotovoltaico para la generación de ACS resultan caros para un consumidor doméstico, por lo que en la mayoría de los casos, se acaba vertiendo a la red. Este hecho deja de manifiesto que no resulta fácil poder aprovechar completamente toda la energía.

Lo que se persigue con este proyecto es desarrollar y programar un dispositivo de bajo coste en Arduino para controlar el excedente de energía fotovoltaica que será usado para alimentar una resistencia en un depósito para la generación de ACS en lugar de verterlo a la red eléctrica, logrando así mayor eficiencia del sistema en su conjunto.

Para alcanzar dicho objetivo, se seguirán una serie de pasos, que serán expuestos detalladamente a lo largo de esta memoria:

- En primer lugar, se explicarán las nociones básicas más importantes para el desarrollo del dispositivo. Además, se deberá realizar un estudio previo de soluciones existentes, en caso de que existan, tanto en forma de proyectos como de productos comerciales. En el capítulo 2, se expondrán cada uno de estos aspectos.

- Después, se podrá pasar al diseño y el montaje del dispositivo, así como la programación del mismo en Arduino. Todo ello, junto con la explicación de cada uno de los materiales usados, se detallará en el capítulo 3.
- A continuación, se deberá comprobar que el dispositivo funcione correctamente mediante la simulación de los diferentes casos que pudiesen presentarse, evaluando las capacidades del dispositivo en función de los resultados obtenidos. Esto será comentado en el capítulo 4.
- Finalmente, en el capítulo 5 se obtendrán conclusiones sobre el dispositivo junto con posibles modificaciones o ampliaciones futuras.

2 ESTADO DEL ARTE

Desde hace varios años, el concepto de autoconsumo energético ha ido paulatinamente abriéndose paso como una forma alternativa de consumo energético. El autoconsumo energético consiste esencialmente en el uso de la energía eléctrica generada por quien la utiliza, mediante la transformación de la energía proveniente de algún recurso natural en energía eléctrica para el abastecimiento y consumo propios en una vivienda o industria [20]. Además, en 2018 se reconoció en España el derecho al autoconsumo solar, lo que significaba la eliminación del impuesto al sol con la consiguiente opción de que cualquiera pudiese instalar su propio sistema fotovoltaico para abastecerse de energía eléctrica [8].

Para comprender bien en qué consiste el autoconsumo, es necesario definir los dos siguientes conceptos clave [20]:

- Autoabastecimiento energético. Significa generar la energía para consumo propio. Para aumentar el autoabastecimiento es importante desplazar el máximo posible de usos de energía hacia las horas de producción de energía. Por ejemplo, en el caso de autoproducción fotovoltaica, esto se podría hacer programando una lavadora o un lavavajillas en momentos de máxima producción, es decir, en las horas centrales del día. En caso de no disponer de baterías o de algún otro sistema de almacenamiento para aprovechar la energía generada, será necesario utilizarla exactamente en el mismo momento en que se genere.
- Excedente energético. Se refiere a aquella energía que no se puede almacenar ni utilizar en el mismo momento en que se genera. Excepto en los casos en los que haya un sistema antivertido, esta energía pasa a través del contador y se vuelca a la red eléctrica para que otras personas puedan hacer uso de ella.

Actualmente, existen muchas formas de autoconsumo energético, de entre las que destacan las siguientes [1]:

- Autoconsumo con energía solar fotovoltaica. La energía solar se transforma en energía eléctrica mediante placas fotovoltaicas que captan la luz solar que incide sobre ellas. La corriente continua producida por las placas es transformada en corriente alterna con la ayuda de un inversor. Esta es la electricidad que abastece toda la vivienda o industria, que se puede emplear, entre otros fines, para la obtención de ACS en un depósito, generar la calefacción necesaria para una vivienda o incluso cargar las baterías de un coche eléctrico.
- Autoconsumo con energía solar térmica. La energía solar térmica funciona bastante similar a la solar fotovoltaica, solo que en vez de producir electricidad, produce calor. El calor se capta con la ayuda de las placas solares térmicas y se utiliza con varios fines, tales como obtención de ACS, calefacción de una vivienda o climatización de una piscina.
- Autoconsumo a partir de biomasa. Es un tipo de autoconsumo bastante más común de lo pensado. Consiste en utilizar residuos orgánicos para transformarlos en energía mediante la combustión de los mismos. El ejemplo más común es la utilización de madera para la calefacción o para agua sanitaria.
- Autoconsumo minieólico. Por último, pero menos común en España, está el autoconsumo minieólico. La energía eléctrica se obtiene con la ayuda de aerogeneradores terrestres. Estos aprovechan el viento para moverse y así producir energía eléctrica. El modo mediante el cual se emplea la energía es similar a la fotovoltaica. De hecho, es posible encontrar los aparatos juntos, formando el sistema de autoconsumo: los paneles fotovoltaicos y el aerogenerador.

De entre todos los métodos de autoconsumo expuestos arriba, el más común es, con diferencia, el autoconsumo fotovoltaico. Este consta de los siguientes elementos [24]:

- Placas o paneles fotovoltaicos. Son los elementos principales de la instalación, que captan la luz solar a

través de las células fotovoltaicas y la transforman en electricidad en forma de corriente continua a través del efecto fotoeléctrico¹. Estas células se agrupan en dos capas contenidas entre una lámina de cristal y un polímero termoplástico que a veces se sustituye por otra lámina de vidrio. Todo ello se rodea de una moldura de aluminio anodizado² que potencia la resistencia mecánica y mejora el anclaje de la placa solar al soporte. El número de células fotovoltaicas varía en función de cada tipo de panel solar.

La mayoría de estas células son de silicio, siendo las monocristalinas las que presentan mejor rendimiento al estar constituidas por un único cristal de silicio de color azul oscuro. Los otros dos tipos de células (las policristalinas y las amorfas) son menos eficientes pero más económicas.



Figura 2-1. Panel fotovoltaico

- Optimizadores. Son los componentes de una instalación fotovoltaica situados entre los paneles fotovoltaicos y el inversor que permiten mejorar el rendimiento al potenciar que cada módulo funcione en su punto de potencia máxima.

El uso principal de los optimizadores se aplica cuando un conjunto de paneles en serie ofrece problemas de rendimiento, arrastrando al resto de módulos a funcionar a la misma potencia limitada que el panel dañado. Es en este caso cuando el optimizador permite la independencia de paneles sin afectar al rendimiento general de la instalación.



Figura 2-2. Optimizador

¹ El efecto fotoeléctrico es un fenómeno por el que un material (sólidos metálicos y no metálicos, líquidos o gases) emite electrones al absorber fotones (partículas de energía electromagnética) [22].

² La anodización es un proceso electrolítico de pasivación por el cual se da a diversos metales un recubrimiento protector incrementando el espesor de la capa natural de óxido sobre su superficie [23].

- Inversor de corriente. Es un aparato electrónico que convierte la corriente continua en corriente alterna. El panel solar fotovoltaico genera electricidad en forma de corriente continua que se puede transformar en corriente alterna gracias al inversor de corriente siguiendo el siguiente proceso:
 - Energía en corriente continua a baja tensión (entre 380 y 800 V).
 - Se transforma en el inverso de corriente alterna.
 - Se transfiere esta energía directamente a la red en plantas de baja tensión o en transformadores para plantas con potencia superiores a los 100 kW.



Figura 2-3. Inversor

- Baterías. En este caso, este componente solo pertenece a las instalaciones fotovoltaicas que permiten el almacenamiento de la energía generada que no se haya utilizado. Las baterías de los paneles solares permiten disponer de electricidad cuando no haya suficiente luz. Su capacidad de almacenamiento se mide en amperios.



Figura 2-4. Baterías

- Cableado eléctrico. En esencia, el cableado eléctrico sirve para conectar la generación de energía en su inicio con su uso final. Es cierto que, en función del tipo de instalación, el tamaño del cableado puede variar. En instalaciones fotovoltaicas aisladas, los cables se limitan a transportar la electricidad hasta las

baterías de almacenamiento. En cambio, en instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red, la cantidad de cableado eléctrico aumenta considerablemente.

Existen asimismo diferentes tipos de autoconsumo fotovoltaico en función de factores como la conexión o no a la red eléctrica o la cantidad de usuarios de la instalación [1]:

- Autoconsumo residencial conectado o aislado. El autoconsumo residencial se divide en conectado a la red o desconectado (también conocido como aislado). También se puede hablar de autoconsumo con o sin excedentes vertidos a la red.

En el caso del autoconsumo conectado a la red, la instalación cuenta con dos conexiones: una conectada al sistema eléctrico de la vivienda y otra a la red de distribución, propiedad de una compañía eléctrica.

Por otro lado, el autoconsumo aislado supone la desconexión total de la red eléctrica. Esta segunda opción implica que, si no se disponen de baterías o alguna otra forma de almacenamiento de energía, la vivienda no tendrá energía eléctrica. De hecho, muchas veces las baterías no son suficientes y en estos casos se deberá contar con un generador eléctrico. Todo esto supone una mayor inversión para el consumidor y un mayor riesgo de quedarse sin electricidad, frente a la de permanecer conectado a la red.

- Autoconsumo individual o compartido. El autoconsumo individual, como su nombre indica, es el que abastece las viviendas unifamiliares. Suele ser el tipo de autoconsumo más usado.

Por otro lado, el autoconsumo compartido es aquel en el que varias viviendas o una comunidad de vecinos están conectados a la misma instalación. Sin embargo, es menos común puesto que la medición del consumo de cada vivienda resulta complicada.

En las comunidades de vecinos donde hay un sistema instalado, se suele usar para zonas comunes como los pasillos del edificio, garajes o motores para la piscina.

En este proyecto, el caso que nos concierne es el de una vivienda con autoconsumo fotovoltaico individual conectado a la red y con excedentes de energía que, en lugar de verterlos a la red, serán aprovechados para la generación de ACS.

2.1. Descripción e interés del problema

Como ya se ha comentado, en muchas ocasiones se desperdicia parte de la energía que se produce en una instalación fotovoltaica para autoconsumo. Esto significa que los paneles fotovoltaicos son capaces de generar más electricidad de la que la vivienda puede aprovechar, lo cual reduce su eficiencia [25].

Cuando eso ocurre, tenemos tres opciones:

- Desaprovecharlo, es decir, tener el antivertido activado y enviar la orden al inversor solar para que no genere más producción, puesto que no es necesaria.
- Inyectarla en la red. Toda aquella energía producida que no sea necesaria para el consumo en un instante dado se inyecta en la red eléctrica.
- Aprovechar ese excedente derivándolo a un punto de carga de vehículo eléctrico o electrodomésticos con carga resistiva. Para ello, se debe disponer de algún modo del dato exacto en todo momento de la potencia sobrante para inyectarla en el coche eléctrico (siempre y cuando ese excedente sea superior a los 5-6 A que admite como mínimo el coche para cargar) o en un electrodoméstico que pueda absorber energía de manera irregular (las resistencias pueden captar tanto 1kW como 500W). Es precisamente aquí donde entran en juego los derivadores de excedentes, que se pasará a explicar.

Se expondrán a continuación las dos últimas opciones, dado que la primera no resulta interesante desde el punto de vista de la eficiencia. Tanto en un caso como en el otro, se persigue conseguir un ahorro económico que, por un lado, reduzca notablemente el precio a pagar en la factura de la luz y, por el otro, ayude a agilizar la recuperación de la costosa inversión inicial de la instalación fotovoltaica.

2.1.1 Inyección en la red eléctrica

Una de las opciones expuestas antes es la inyección del excedente energético en la red eléctrica. Este excedente es contabilizado por el contador en tramos de una hora, y puede computar a través de dos mecanismos diferentes (según el consumo eléctrico que se ha realizado en cada hora):

- El balance neto horario. Es el saldo neto entre la energía generada vertida en la red y la energía utilizada de red en el tramo de una hora; es decir, cada kWh de energía vertida en la red descuenta cada kWh de energía utilizada de red durante esa hora. Si hay más energía vertida en la red que la que se consume, la diferencia pasa al mecanismo de compensación, mientras que si en un tramo horario el consumo es mayor que la generación, no hay energía destinada a la compensación y los kWh de consumo por encima de los kWh de generación se contabilizan al precio habitual de consumo.
- La compensación simplificada. Este mecanismo establece que la energía generada no utilizada instantáneamente ni descontada fruto del balance horario se registra en el contador reglamentario y se traduce en un valor económico a un precio establecido por la empresa comercializadora. Este valor revierte directamente en la factura eléctrica de la siguiente manera:
 - El valor económico de excedente de energía se descuenta del valor económico de la energía utilizada de la red.
 - Si el valor resultante anterior es negativo (es decir, si el valor de la energía excedente es mayor que la energía utilizada de la red), queda un valor económico del término de energía de 0 euros, ya que la ley marca que como mucho se compense el valor de la energía utilizada de la red.
 - En todos los casos hay que añadir a la factura de la luz, como mínimo, los costes habituales: parte fija de la potencia, alquiler del contador e impuestos asociados a estos conceptos.
 - La compensación es mensual y no acumulable.

Además, la compensación simplificada de excedentes en autoproducción es un mecanismo regulado por ley (Real Decreto 244/2019) al que solo se pueden acoger los puntos de suministro con autoconsumo cuya energía generada sea de origen renovable y cuya potencia instalada sea igual o inferior a 100 kW.

Para comprender mejor el funcionamiento de este último mecanismo, se ilustrará con un ejemplo. Supóngase que la autoproducción individual con excedentes y compensación en una vivienda en el periodo de facturación de 30 días es el que se muestra en la tabla:

Energía total generada por los paneles fotovoltaicos	Autoproducción directa: energía generada utilizada de forma instantánea o computada en el balance neto horario	Excedente energético	Energía utilizada de la red
400 kWh	210 kWh	190 kWh	185 kWh

Tabla 2-1. Valores de un ejemplo de instalación fotovoltaica para autoconsumo [26]

Supóngase el siguiente valor económico de la energía en ese periodo:

Energía utilizada de red a 0,162 € el kWh (impuestos incluidos)	$185 * 0,162 = 29,97 \text{ €}$
Excedente energético Compensación simplificada a 0,0636 €/kWh (impuestos incluidos)	$190 * 0,0636 = 12,08 \text{ €}$
Valor económico que facturar en el término de energía (impuestos incluidos)	$29,97 - 12,08 = 17,89 \text{ €}$

Tabla 2-2. Valor económico de la energía en el periodo [26]

En este caso, durante este mes, el ahorro económico habría sido el siguiente:

Autoproducción directa a 0,162 € el kWh (impuestos incluidos)	$210 * 0,162 = 34,02 \text{ €}$
Energía excedentaria Compensación simplificada a 0,0636 €/kWh (impuestos incluidos)	$190 * 0,0636 = 12,08 \text{ €}$
Valor económico total ahorrado en estos 30 días (impuestos incluidos)	$34,02 + 12,08 = 46,10 \text{ €}$

Tabla 2-3. Resultados de ahorro económico [26]

Como se puede observar en el ejemplo, el ahorro generado por cada kWh de autoproducción directa (o fruto del balance neto horario) es el triple de lo que ahorra un kWh compensado. Es así porque un kWh autoproducido directamente ni siquiera pasa por el contador. Así, cuanto más uso energético se haga en horas de generación, más aprovechamiento económico se conseguirá con la instalación [26].

2.1.2 Aprovechamiento del excedente mediante derivadores

Los derivadores de excedente son dispositivos que se conectan a un enchufe entre un radiador, un acumulador, un termo o similar, y la vivienda. Estos conocen en todo momento cuánta energía solar está disponible y la reconduce a lo que se le conecte. Puede disponer de datos conectado tanto a inversores como a controladores de consumo.

Además, los derivadores pueden funcionar en cascada. Por ejemplo, supóngase que se tiene un derivador conectado a un termo de 2000W. Si hoy hace mucho sol y la vivienda no tiene necesidad energética en ese instante, el derivador estará inyectando 2000W al termo. Si sigue sobrando energía, se activará el segundo derivador y aprovechará esa energía para un segundo radiador, un acumulador de calor, etc.

Por otro lado, si el tiempo comenzase a nublar, la vivienda no haría uso de la red eléctrica, ya que el derivador captaría esa bajada de producción y limitaría su consumo también, para oscilar siempre en consumos que puedan estar dentro del margen de la producción solar. De este modo, se aprovecha al 100% la energía fotovoltaica evitando desperdiciarla y se evita que el ACS y/o la calefacción consuman energía eléctrica de la red para sus funciones [25].

También cabe destacar el papel que la domótica está jugando cada vez más en la eficiencia energética. En la actualidad, existen distintas alternativas para domotizar una vivienda a un precio muy económico. Al igual que las instalaciones fotovoltaicas, los artículos de domótica han avanzado tanto que sus precios han caído en picado y lo que antes requería una inversión de cientos de euros ahora se consigue por menos de una cuarta parte de ese valor. Existen opciones de código libre y gratuito como Domoticz o Home Assistant, que permiten la integración de multitud de dispositivos en el sistema para interactuar entre ellos manual o automáticamente [25].

2.2. Soluciones existentes

2.2.1 Ejemplo de proyecto existente

Existen algunos proyectos relacionados con el aprovechamiento de los excedentes de energía fotovoltaica de autoconsumo en hogares, entre los que cabe destacar uno titulado *Aprovechamiento de excedentes de fotovoltaica de autoconsumo para la producción de Agua Caliente Sanitaria en una vivienda de consumo casi nulo* [6].

En dicho proyecto, se presenta la implementación de una instalación fotovoltaica de autoconsumo en una vivienda unifamiliar con certificación Passivhaus Classic, donde se desvían los excedentes de la producción fotovoltaica a una resistencia eléctrica en un depósito de ACS. Dadas las trabas burocráticas para el autoconsumo con balance neto en España y la necesidad de reducir el tiempo de amortización de una

instalación fotovoltaica, en el proyecto se muestran el diseño y la instalación de un sistema que permite convertir la energía eléctrica que no se autoconsume en la vivienda en energía térmica en el depósito de ACS para su uso posterior. Ya que los consumos de ACS son casi siempre superiores a los de climatización en una casa pasiva³, una solución de este tipo reduce la factura energética y aprovecha una fuente de energía renovable para producir agua caliente, evitando muchos de los problemas de mantenimiento que suelen sufrir los sistemas de energía solar térmica.

2.2.2 Ejemplos de productos comerciales existentes

2.2.2.1 Fronius Ohmpilot

En 2017, la empresa austriaca Fronius International GmbH lanzó al mercado su nuevo producto llamado Fronius Ohmpilot. El Fronius Ohmpilot es un regulador de consumo diseñado con el fin de utilizar el exceso de energía solar para calentar agua. Gracias a la regulación ajustable de 0 a 9 kW, el excedente de energía fotovoltaica se emplea de forma muy eficiente para abastecer parte del consumo del hogar.

El Fronius Ohmpilot sirve principalmente para el control inteligente de elementos térmicos para el suministro de agua caliente en calderas y tanques de almacenamiento intermedio, pero también para la calefacción por infrarrojos o radiadores de toallas. De este modo, la energía solar proporciona a una vivienda unifamiliar la mayor parte de la energía necesaria para el abastecimiento del agua caliente. El resultado es la maximización de la cuota de autoconsumo, conseguir una reducción notable de emisiones CO₂ del hogar y un menor desgaste del sistema de calefacción principal del edificio durante los meses de verano [2].



Figura 2-5. Fronius Ohmpilot

Entre sus ventajas, se pueden enumerar las siguientes [4]:

- Regulación continua ajustable de 0 a 9 kW.
- Fácil de instalar.
- Limitación de alimentación dinámica $\geq 50\%$.
- Ajuste de la temperatura mínima.
- Acoplamiento de otras fuentes de calor, p. ej. calentadores de agua a gas.
- Combinación con bombas de calor.

³ Una casa pasiva es aquella en la que se utilizan los recursos de la arquitectura bioclimática combinados con una eficiencia energética superior a la construcción tradicional. Se denominan *pasivas* porque no se usan otros dispositivos electromecánicos para recircular el calor por la vivienda [7].

Junto con el resto de componentes necesarios para el funcionamiento del sistema, la configuración del conjunto sería la siguiente [4]:

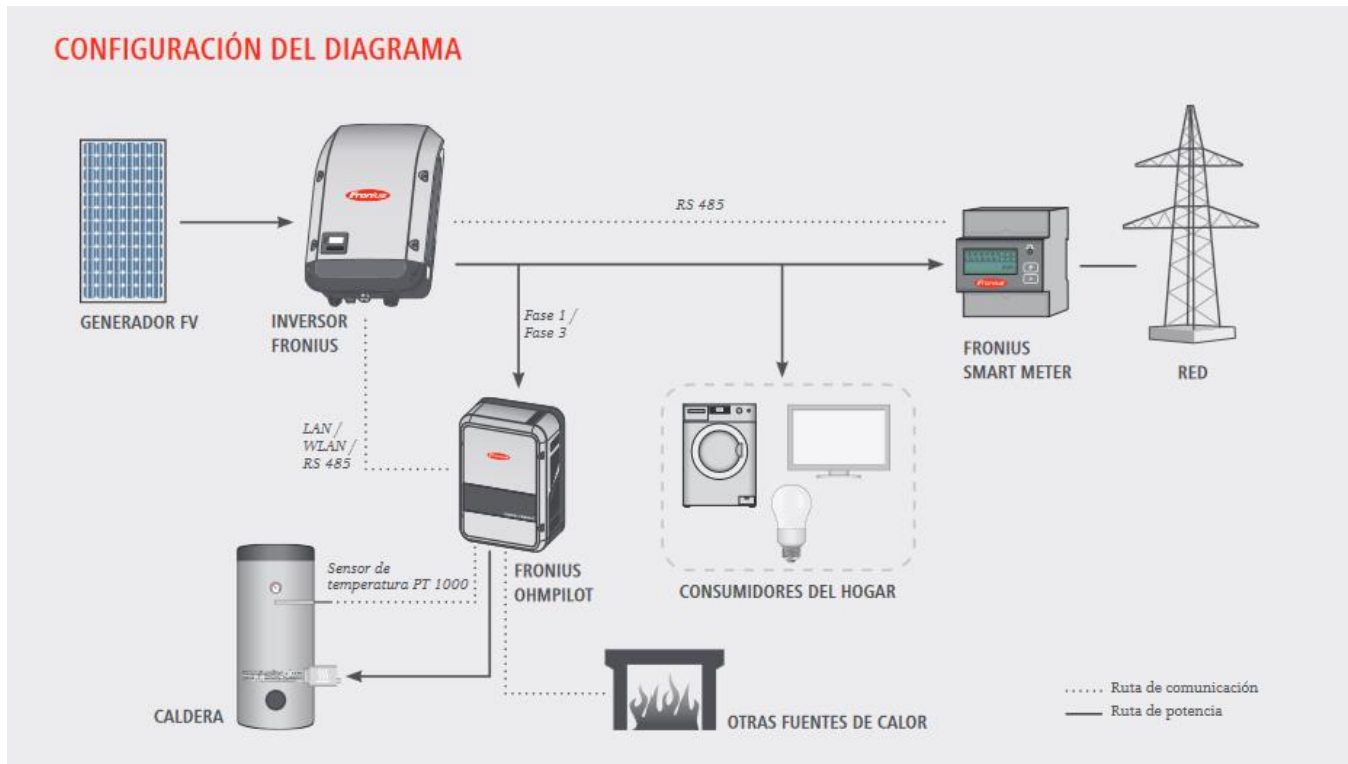


Figura 2-6. Configuración del esquema del Fronius Ohmpilot con el resto de componentes

No obstante, el precio de este producto es muy elevado, ya que se puede encontrar en tiendas en línea desde 982,51€ [5]. Es por ello que, en este proyecto, se intentará que el dispositivo creado con Arduino sea considerablemente más económico.

2.2.2.2 Carlotrón

Carlotrón es un dispositivo para uso en instalaciones solares fotovoltaicas y eólicas con baterías, con o sin apoyo de red. Su función principal, en función de la potencia solar sobrante, es la de regular/modular la potencia de termos, estufas, radiadores, y demás dispositivos calentadores con resistencia eléctrica, sin ser necesario la sustitución de dicha resistencia en el dispositivo a utilizar. También es compatible con variadores de frecuencia con entrada de 1 a 10 V.

Monitoriza varias veces por segundo los valores de intensidad de carga y frecuencia de la red AC, etc. que afectan al funcionamiento de la instalación fotovoltaica, para regular/modular automáticamente la potencia de las cargas.

El objetivo, pues, es aprovechar la máxima energía renovable posible, manteniendo siempre la prioridad de fases de carga de las baterías desde el inicio *bulk*, hasta la absorción/ecualización.

Carlotrón es compatible con cualquier otro dispositivo o electrodoméstico conectado a la misma instalación, ya que no produce cambios de voltaje que pueda afectarlos al controlar la potencia derivada a las cargas de manera progresiva.

El tipo de batería usada en la instalación es indiferente, siempre que el regulador o inversor-cargador estén correctamente y sean compatibles con la misma, por tanto es válido para baterías de litio y de plomo.

Para una correcta y rápida visualización de su funcionamiento, dispone de una pantalla en color de 3,2", en la que de manera gráfica y con valores, se representa su funcionamiento en tiempo real.

Dispone de un registro gráfico con los kWh de los últimos 10 días en tramos horarios, aunque de manera no

gráfica se puede registrar el total en un mes, en un año y desde su primer uso.

Cada unidad puede controlar hasta 3 (según la versión) cargas a las que derivar energía sobrante. El orden de cada canal de salida es programable por el usuario. Se puede programar el inicio-apagado con la configuración del reloj que lleva incorporado para mantenerse en suspenso durante la noche.

Para motores y sistemas de bombeo, dispone de una salida modulada compatible con variadores de frecuencia, para hacer girar el motor o la bomba según la potencia sobrante disponible. También se pueden controlar cargas no modulables a través de hasta dos relés programables según múltiples condiciones [9].



Figura 2-7. Carlotrón 6.0

Sin embargo, el precio de este producto es, aunque algo menor que el del Fronius Ohmpilot, sigue siendo elevado, ya que se puede encontrar en tiendas en línea desde 305€ [10].

3 DESARROLLO

En este capítulo, se describirá el sistema que se ha desarrollado para el proyecto exponiendo cada uno de los componentes que lo forman, seguido de tres apartados en los que se detalla los aspectos del diseño, del montaje y de la programación del mismo.

3.1 Descripción del sistema

3.1.1 Arduino UNO

Arduino es una plataforma computacional física de código abierto basada en una simple tarjeta de entrada/salida y un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring. El Arduino Uno R3 puede ser utilizado para desarrollar objetos interactivos o puede ser conectado al software de un ordenador. El IDE de código abierto puede ser descargado gratuitamente (actualmente para Mac OS X, Windows y Linux) [12].

Arduino UNO es la mejor placa para comenzar con la electrónica y la programación. Es la placa más utilizada y documentada de toda la familia Arduino. Está basada en ATmega328P de 8 bits a 16 MHz con una alimentación de 5 V. Tiene 14 pines de entrada/salida digital (de los cuales 6 se pueden usar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un resonador cerámico de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. Cada uno de sus pines puede soportar corrientes de hasta 40 mA [11].

En definitiva, se ha optado por usar esta placa en el proyecto por su simplicidad tanto a nivel de software como de hardware, su manejo sencillo y accesible y su asequible precio, entre otros motivos.



Figura 3-1. Arduino UNO

3.1.2 Placas fotovoltaicas

Para las pruebas, se ha usado un sistema fotovoltaico formado por 6 placas conectadas en serie, cada una de 200 W pico. Aunque el total hace 1200 W pico, lo que supone una corriente en alterna de unos 5,2 A pico, se ha podido comprobar con los datos que muestra uno de los ordenadores instalados en la casetilla adyacente al sistema fotovoltaico, que en el momento de máxima irradiancia solar (esto es, en torno al mediodía) en un día despejado en otoño, la corriente generada no supera los 3,5 A, lo que supone una potencia máxima de unos 800 W. Esto es debido, principalmente, al envejecimiento desigual que van sufriendo los módulos

fotovoltaicos a lo largo de su vida útil y que, en el peor de los casos, hace que el rendimiento de los módulos pueda degradarse hasta un 20 % en 20 años [19]. Las microfisuras, los puntos calientes, el efecto PID⁴ o los daños causados por factores externos como tormentas o granizo son algunos de los factores causantes del envejecimiento de una placa fotovoltaica [20].



Figura 3-2. Conjunto de placas fotovoltaicas

3.1.3 Inversor Sunny Boy

El Sunny Boy 1.5/2.0/2.5, de la empresa alemana SMA Solar Technology AG, es un inversor fotovoltaico sin transformador que transforma la corriente continua del generador fotovoltaico en corriente alterna apta para la red, perfecto para una planta fotovoltaica de pequeño tamaño. Permite, entre otras cosas, aumentar la cuota de autoconsumo. Asimismo, gracias a la comunicación directa con el SMA Energy Meter, es posible la regulación al 0 %.



Figura 3-3. Sunny Boy

Este inversor solo pesa 9 kg y se puede instalar sin necesidad de usar un soporte mural adicional. La puesta en marcha es igualmente sencilla, ya que gracias a la interfaz de usuario integrada (Web UI) se pueden aplicar los ajustes necesarios sin tener que abrir la tapa.

Además, mediante la interfaz de usuario intuitiva (Web UI) es posible monitorizar los datos de la instalación en cualquier teléfono inteligente, tableta u ordenador. El usuario puede elegir una de estas opciones: monitorización local o monitorización por Internet a través de Sunny Places y Sunny Portal [13].

⁴ La degradación inducida por potencial (PID, por sus siglas en inglés) se atribuye a las fluctuaciones de voltaje que ocurren entre el voltaje generado por el panel solar y la conexión a tierra del panel solar. Esto conduce a un porcentaje variable de voltaje descargado en el circuito de alimentación principal [20].

3.1.4 Sensores de corriente ACS712

El sensor de corriente ACS712 soporta mediciones de corriente, según el modelo, de hasta 5, 20 o 30 A en AC o DC. Transforma el campo magnético surgido del paso de la corriente por un alambre de cobre interno y convierte dicho campo en un voltaje variable. Esto significa que, cuanto mayor sea la cantidad de corriente que pase por el sensor, tanto mayor será el voltaje en el pin de salida analógica. El módulo de este sensor cuenta con una bornera para conectar la línea que medir y 3 pines, dos para conectar la alimentación y un pin para la salida analógica. Concretamente, los dos modelos que se van a usar tienen un voltaje de alimentación de 5 V, un rango máximo de medición de 5 A con una sensibilidad de 185 mV/A para uno, y un rango de medición de 30 A con una sensibilidad de 66 mV/A para el otro. Además, ambos tienen un tamaño de 31 x 13 x 11,8 mm.

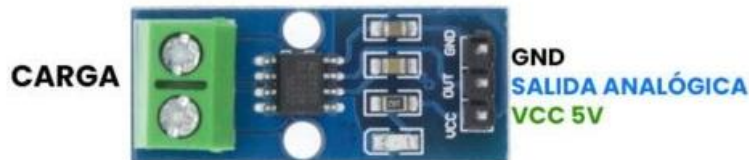


Figura 3-4. Sensor de corriente ACS712

Aunque este sensor mide corriente, lo que realmente envía a la placa de Arduino es un valor de tensión. Sin embargo, es posible calcular la corriente con una sencilla fórmula que cumple dicho sensor:

$$V = I \cdot K + \frac{V_{cc}}{2} \quad (3-1)$$

En la expresión anterior, V representa el voltaje medido por el sensor, I es la corriente que pasa por dicho sensor, K es la sensibilidad del sensor (que es un dato del fabricante) y Vcc es la tensión de alimentación del sensor (que en este caso, son los 5 V que le proporciona Arduino). Con ello, la corriente puede calcularse con la siguiente expresión, tras haberla despejado:

$$I = \frac{V - 2,5}{K} \quad (3-2)$$

3.1.5 Relé de estado sólido

Un relé (o relevador) de estado sólido de corriente directa a corriente alterna sirve para conmutar el paso de la electricidad cuando se ingresa voltaje en sus pines de entrada (en la figura 3-5, los pines de entrada son el 3 y el 4). Puede controlar cargas de corriente de hasta 10 A. A diferencia de un relé electromecánico, no emite ruido, vibraciones o interferencia eléctrica. El rango de tensión de control va desde 3 a 32 V DC, mientras que el rango de tensión de carga va desde 24 a 280 V RMS [16] [17].



Figura 3-5. Relé de estado sólido

El funcionamiento de este relé es relativamente sencillo. Funciona mediante conmutación de paso por cero, lo que significa que se activa cuando la tensión de salida pasa cerca de cero y siempre se desconecta cuando la corriente es nula. Son particularmente adecuados para conmutar cargas resistivas o capacitivas [18]. Este modelo tiene un tiempo máximo de cierre de 20 ms y un tiempo máximo de apertura de 30 ms para AC [16].

3.1.6 Sensor de corriente SCT-013-000

El sensor de corriente SCT-013 sirve para medir corriente alterna. El modelo SCT-013-000 posee una capacidad de corriente de entrada desde 0 a 100 A y una corriente de salida de 0 a 50 mA. Este sensor, a diferencia del ACS712, es no invasivo: incorpora una pinza que puede colocarse alrededor de un cable y tomar la medición de corriente [30]. El sensor cuenta con un conector Jack macho de 3,5 mm, por lo que será necesario un conector Jack hembra para poder conectarlo a Arduino, además de un pequeño circuito para la resistencia de carga y de *offset*, como se verá más adelante.



Figura 3-6. Sensor de corriente SCT-013-000

El principio de funcionamiento de este sensor está basado en el de un transformador de corriente. Un transformador de corriente consta esencialmente de tres partes: un devanado primario, un devanado secundario y un núcleo ferromagnético.

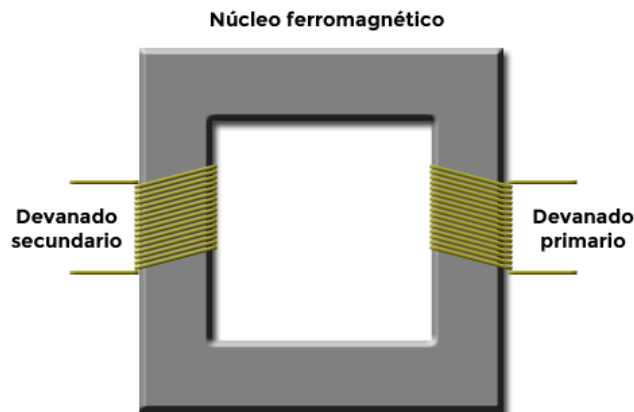


Figura 3-7. Transformador de corriente

Cuando una corriente circula por el devanado primario, se genera una corriente en el devanado secundario que es proporcional a la que circula por el primario, gracias al efecto de la inducción magnética. Esto significa que es posible calcular la corriente que circula por un devanado si se conoce la que circula por el otro. Ambas corrientes se relacionan mediante un factor que se denomina número de espiras o de vueltas, que representa el número de vueltas que da el cable de cada devanado alrededor del núcleo ferromagnético. Con ello, se obtiene una fórmula denominada relación de transformación [31]:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = \frac{V_p}{V_s} \quad (3-3)$$

La expresión anterior permite relacionar el número de espiras N , la corriente I y la tensión V de los devanados

primario (p) y secundario (s).

En el caso del sensor de corriente SCT-013, el devanado primario es el cable del aparato que se quiere medir, por el que el número de vueltas sería uno, mientras que el devanado secundario tiene 2.000 vueltas [31].

Sin embargo, para poder usar este sensor con Arduino, se necesita una resistencia de carga para poder pasar el valor de corriente a tensión, ya que Arduino solo puede leer valores de tensión por sus pines. Por otro lado, también será necesario saber el consumo aproximado del aparato que se va a medir, lo que permitirá ajustar la precisión. En este caso, la resistencia calefactora tiene una potencia máxima de 2 kW.

Para calcular la corriente de carga, primero se debe calcular la corriente que se va a medir:

$$P = V \cdot I_{RMS} \rightarrow I_{RMS} = \frac{P}{V} = \frac{2000 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 8,70 \text{ A} \quad (3-4)$$

A partir del valor de corriente eficaz, se pasa a calcular la corriente de pico:

$$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}} \rightarrow I_{pico} = I_{RMS} \cdot \sqrt{2} = 8,70 \cdot \sqrt{2} = 12,30 \text{ A} \quad (3-5)$$

Este valor sería el que circularía por el devanado primario. A partir de la relación de transformación, se puede calcular la corriente por el devanado secundario:

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \rightarrow I_s = \frac{N_p \cdot I_p}{N_s} = \frac{1 \cdot 12,30}{2000} = 0,0061 \text{ A} \quad (3-6)$$

Por último, se ajusta el valor de la resistencia con la ley de Ohm a partir de la tensión de referencia, que en el caso de Arduino UNO es de 5 V. Sin embargo, se usará la mitad de dicha tensión de referencia, dado que se tiene una onda sinusoidal que varía entre un valor positivo y otro negativo. Por tanto, se tendrá una tensión que varía entre 2,5 y -2,5 V, ya que la corriente es fija [31]:

$$R_{carga} = \frac{V_{REF}}{I_{pico}} = \frac{2,5 \text{ V}}{0,0061 \text{ A}} = 406,59 \Omega \quad (3-7)$$

Dado que 406 Ω no es un valor fácil de encontrar, se han usado en su lugar dos resistencias en serie de 220 Ω cada una, equivalente a una de 440 Ω , que es un valor próximo al que se necesita.

Con esto, se ha conseguido pasar de un valor de corriente a un valor de tensión que podría leer Arduino. Sin embargo, en la resistencia de carga habrá una señal de tensión sinusoidal que varía entre 2,5 y -2,5 V. Dado que Arduino no puede leer tensiones negativas, habrá que modificar la señal para que varíe entre 0 y 5 V. Esto se consigue con un circuito *offset* en DC [31]. Básicamente, lo que se hará es sumar 2,5 V a la señal con ayuda de un divisor de tensión de resistencias de 10 k Ω y un condensador de unos 10 μF y unos pocos cientos de voltios (en este caso, de 400 V).

3.1.7 Resistencia calefactora

La resistencia calefactora que se ha usado para realizar las pruebas de derivación de excedente de energía es de unos 2000 W de consumo máximo. Esta resistencia se encuentra en un depósito lleno de agua, ya que no puede estar en funcionamiento si no está sumergida en agua, o de lo contrario se estropearía

Cuenta asimismo con un sensor de temperatura interno que abre un interruptor para no dejar pasar corriente cuando se ha alcanzado la temperatura requerida en el depósito.



Figura 3-8. Resistencia calefactora

3.1.8 Cargas de prueba

Para la realización de las pruebas, se han usado dos focos cuyas potencias están entre los 500 y los 550 W. Durante las pruebas, se han ido encendiendo y apagando los focos de diferentes maneras para simular el consumo real en una vivienda. El primero de los focos (en adelante, foco 1) tiene una potencia en torno a 530 W (este foco no dispone de etiqueta en la que se indique cuál es su potencia nominal, así que se ha tenido que averiguar empíricamente, sabiendo que consume unos 2,3 A a 230 V).



Figura 3-9. Foco 1

El otro foco (en adelante, foco 2) sí dispone de etiqueta informativa, en la que se muestra que su potencia nominal es 500 W. No obstante, se ha comprobado durante las pruebas que consume un poco menos (unos 2,1 A a 230 V, es decir, unos 483 W).



Figura 3-10. Foco 2

3.2 Diseño

En la fase de diseño, se ha intentado buscar que el dispositivo fuese lo más pequeño y barato posible, a la vez que práctico, de manera que se pudiese cumplir con las especificaciones definidas en la sección 1. De hecho, como se verá en este apartado, el dispositivo en sí tan solo está formado por una placa Arduino UNO, un relé de estado sólido y tres sensores de corriente ACS712. Sin embargo, durante esta fase se ha tenido que redefinir el diseño y, con ello, descartar y escoger nuevos componentes para el dispositivo en más de una ocasión.

Inicialmente, se pensó en usar un contador para medir el excedente de energía. Concretamente, se estuvieron barajando dos opciones con respecto a la comunicación entre el contador y la placa Arduino: la primera de ellas consistía en que los datos de potencia fuesen transmitidos desde el contador al Arduino vía Wi-Fi, mientras que la otra lo hiciese simplemente a través de un cable que conectase ambos componentes.

Dado que no había en el mercado contadores vía Wi-Fi que fuesen compatibles con Arduino, se optó por un contador cuya lectura fuese transmitida a la placa mediante emisión de impulsos a través de un cable, en el que cada impulso representa 1 Wh y cuya anchura de impulso dura 80 ms [32].

No obstante, se hizo patente más adelante el hecho de que se sabía, en base a lo explicado arriba, cuánto iba a durar el impulso de medición, pero no el espacio que habría entre cada par de impulsos, que podía variar en función de la energía medida; es decir, cuanto mayor fuese la energía medida por el contador, mayor sería la frecuencia de emisión de los impulsos y, por tanto, menor sería el espacio entre cada par de impulsos. Esto último era algo que no se podría controlar y que afectaría el período de lectura de medida, dado que no se sabría exactamente cuándo se emitiría un impulso, porque este es, a su vez, función de la energía medida, que es un dato que no se conoce hasta haber leído la medida.

Por todo lo anterior, se descartó este componente y se escogió finalmente usar sensores de corriente ACS712 para las medidas del sistema porque eran muy fáciles de usar, instalar y calibrar. El único problema era que, para corriente alterna, estos sensores eran capaces de medir la cantidad de corriente que circulaba por un cable, pero no su sentido; es decir, dan una medida en valor absoluto. Es por ello que se han necesitado tres sensores ACS712: uno para medir la producción, otro para medir el consumo y un tercero para medir el excedente. De esta manera, comparando los valores de producción y consumo, se podría saber si se estaba cediendo corriente a la red o absorbiéndola de ella.

A continuación, se muestra el esquema correspondiente del sistema:

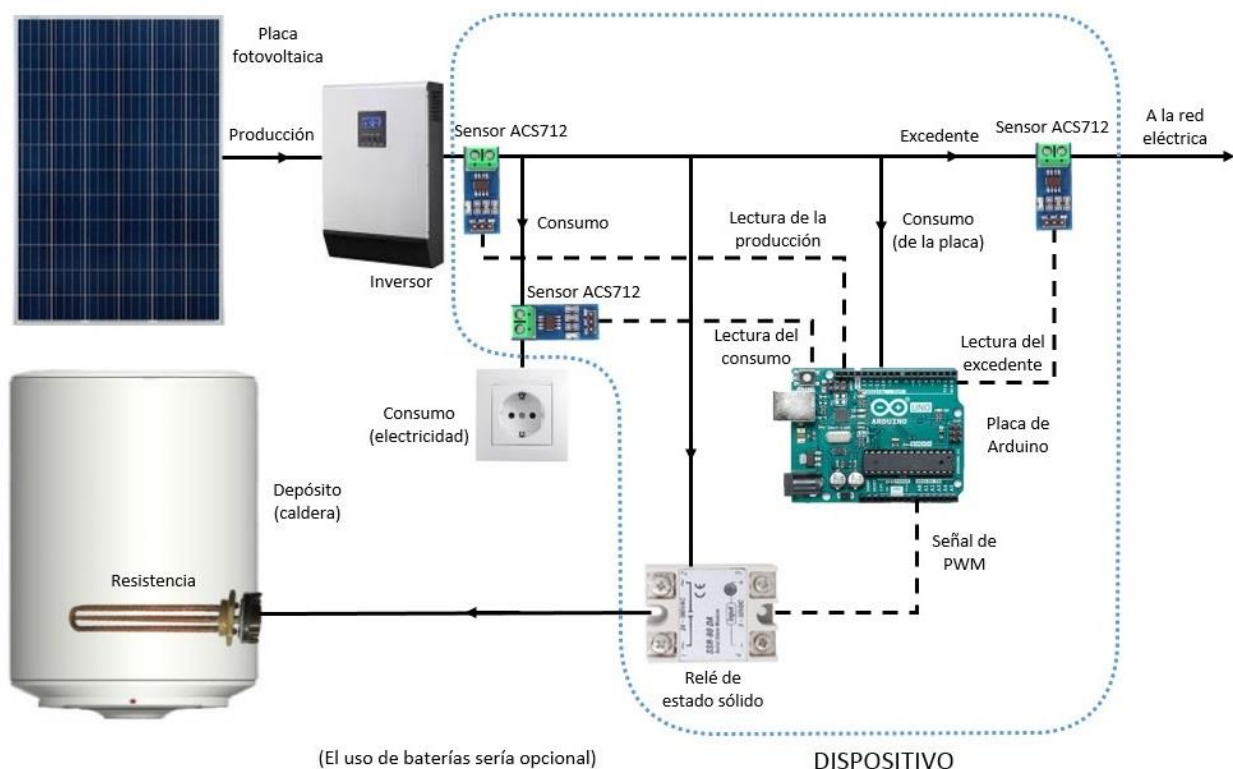


Figura 3-11. Esquema del sistema completo

Con ayuda de la Figura 3-11, se observa que cada uno de los sensores ACS712 mide la corriente que circula por los cables a los que se encuentran acoplados. Todos estos valores de corriente son transmitidos a la placa de Arduino mediante cables. Tras comparar cada uno de estos valores, y en función de la cantidad de excedente existente, el Arduino tomará la decisión de derivar o no dicho excedente a la resistencia calefactora del depósito para la generación de ACS.

A todo ello, y aunque no forma parte del dispositivo en sí, también se ha usado otra placa de Arduino y el sensor de corriente SCT-013 para la medida de corriente que se deriva a la resistencia. A diferencia de los sensores ACS712, el SCT-013 es un sensor no invasivo pero requiere de un circuito para la resistencia de carga y de *offset* que depende de la potencia del dispositivo en que se quiere medir.

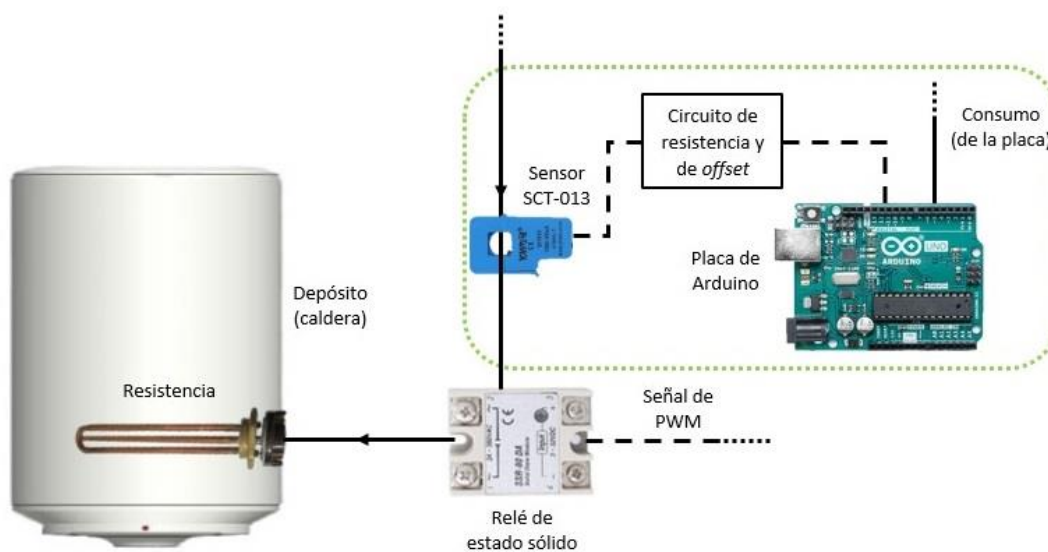


Figura 3-12. Esquema del subsistema de medida de corriente derivada a la resistencia

3.3 Montaje

Siguiendo el diseño mostrado en las Figuras 3-11 y 3-12 del apartado anterior, el montaje del dispositivo en su conjunto queda del siguiente modo:



Figura 3-13. Montaje del dispositivo

A continuación, se pasa a ver en detalle cada parte del montaje del dispositivo.

Los sensores ACS712 se han conectado directamente en el cuadro de interruptores del sistema fotovoltaico, cada uno en su cable correspondiente, como se aprecia en la mitad inferior de la Figura 3-14. Desde ahí, se han usado cables Dupont macho-hembra para conectarlos a una placa de pruebas.

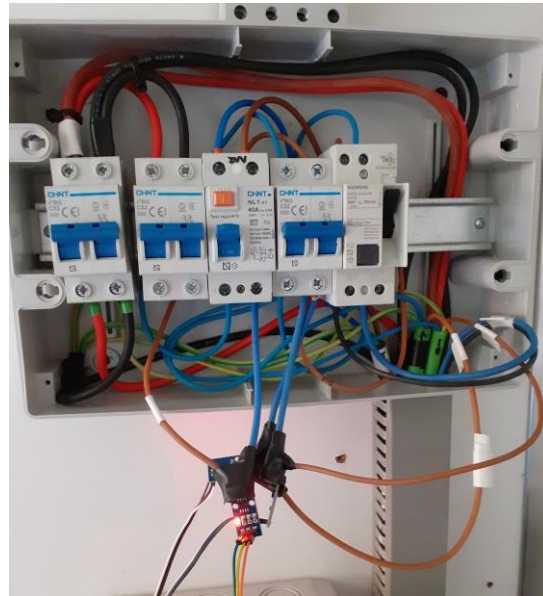


Figura 3-14. Montaje de los sensores ACS712

Para la conexión de estos sensores a la placa Arduino se ha usado una placa de pruebas, dado que Arduino solo dispone de un pin de alimentación de 5 V y dos pines de tierra. Se muestra a continuación un esquema detallado del conexionado de los sensores a la placa de Arduino:

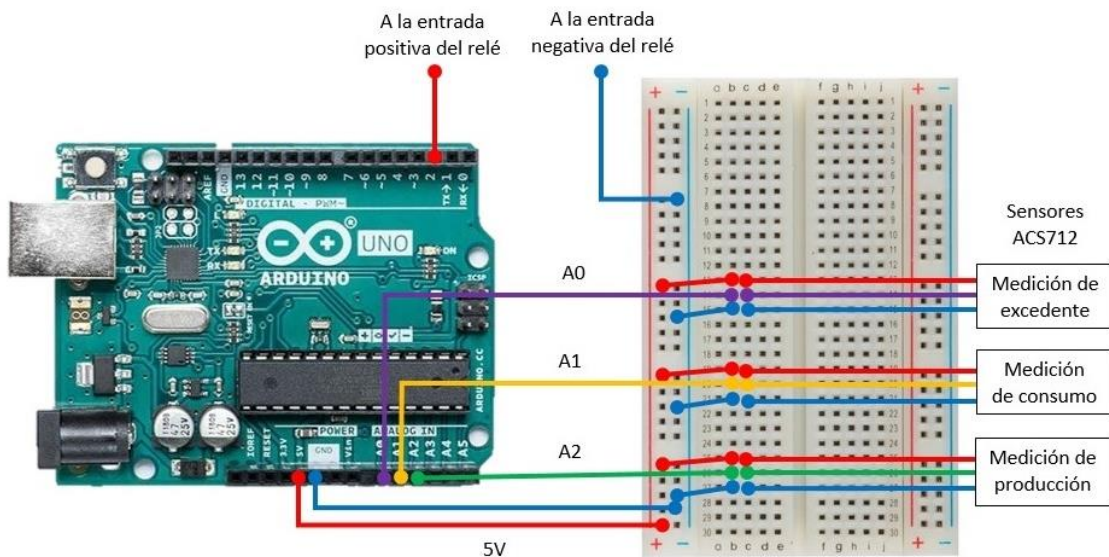


Figura 3-15. Detalle del conexionado en la primera placa Arduino para los sensores ACS712

Por otro lado, el sensor SCT-013 se ha conectado a la salida del relé alrededor del cable que va hacia la resistencia, situada en un depósito lleno de agua al lado de la casetilla. Dado que los bornes de la parte de corriente alterna del relé se encuentran a una tensión de 230 V cuando está cerrado, se ha decidido dejarlo medido dentro de una cajita de plástico por seguridad, de manera que solo salgan por sus lados los diferentes cables tanto de la parte de corriente continua como de alterna, como se observa en la Figura 3-16.



Figura 3-16. Montaje del relé y del sensor SCT-013

Para la conexión del sensor con el Arduino, se ha necesitado montar también un circuito para la resistencia interna y para el *offset*, como ya se ha comentado anteriormente. Su conexionado se detalla a continuación:

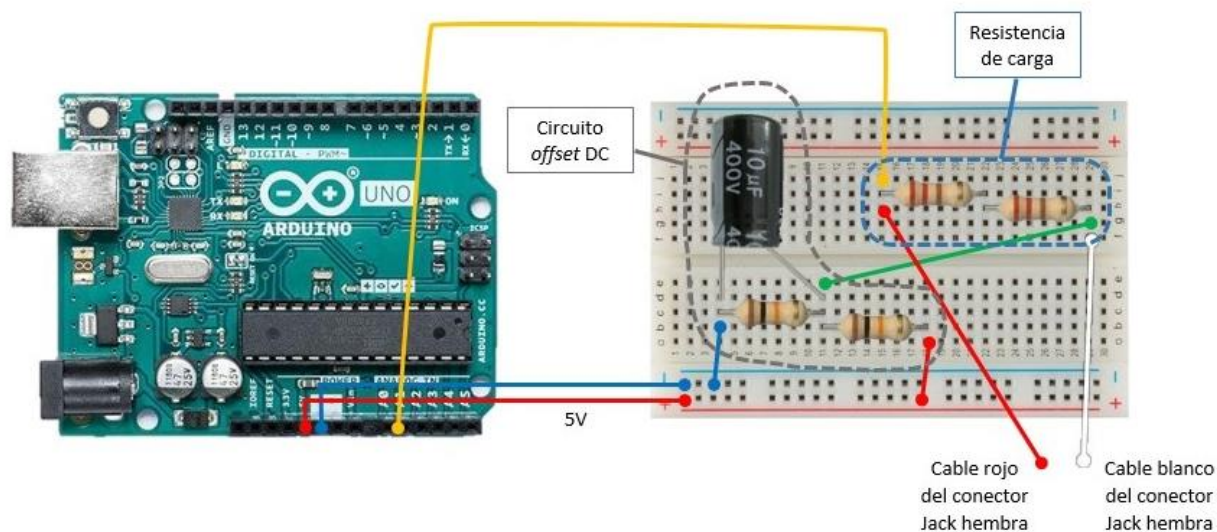


Figura 3-17. Detalle del conexionado en la segunda placa Arduino para el sensor SCT-013

Finalmente, se muestran las placas Arduino con sus respectivas placas de prueba:

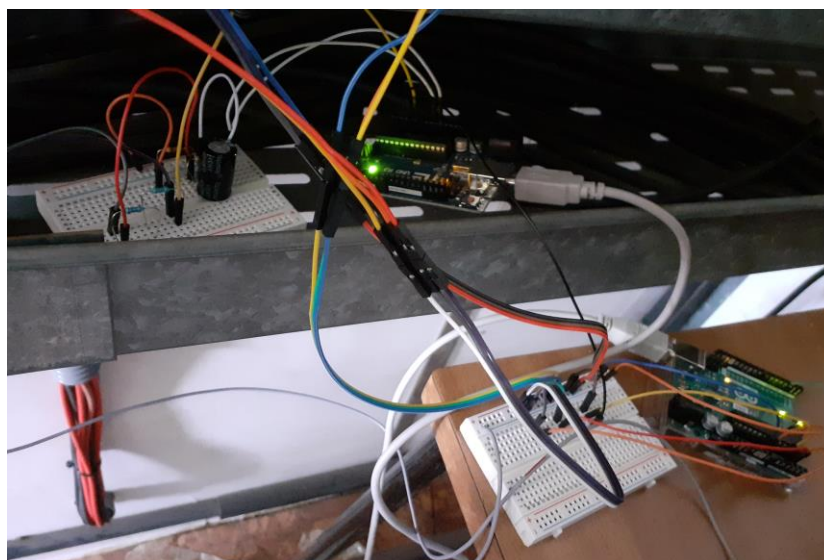


Figura 3-18. Montaje de las dos placas Arduino con sus placas de prueba

3.4 Programación

La estructura de programación de Arduino consta de dos funciones que siempre aparecen en cualquier código para su funcionamiento: la función *setup()* y la función *loop()*.

- La función *setup()* se usa cuando se inicia un programa. Se emplea para inicializar variables, modos de pin, comenzar a usar bibliotecas, etc. La función *setup()* solo se ejecuta una vez, después de cada encendido o reinicio de la placa Arduino [27].
- Después de crear una función *setup()*, la función *loop()* hace precisamente lo que sugiere su nombre⁵, y se repite consecutivamente, permitiendo que el programa cambie y responda. Se usa para controlar activamente la placa Arduino [28].

Los códigos de Arduino pueden visualizarse en el anexo A de esta memoria.

Asimismo, la explicación del programa de funcionamiento del dispositivo se apoyará sobre un diagrama de flujo:

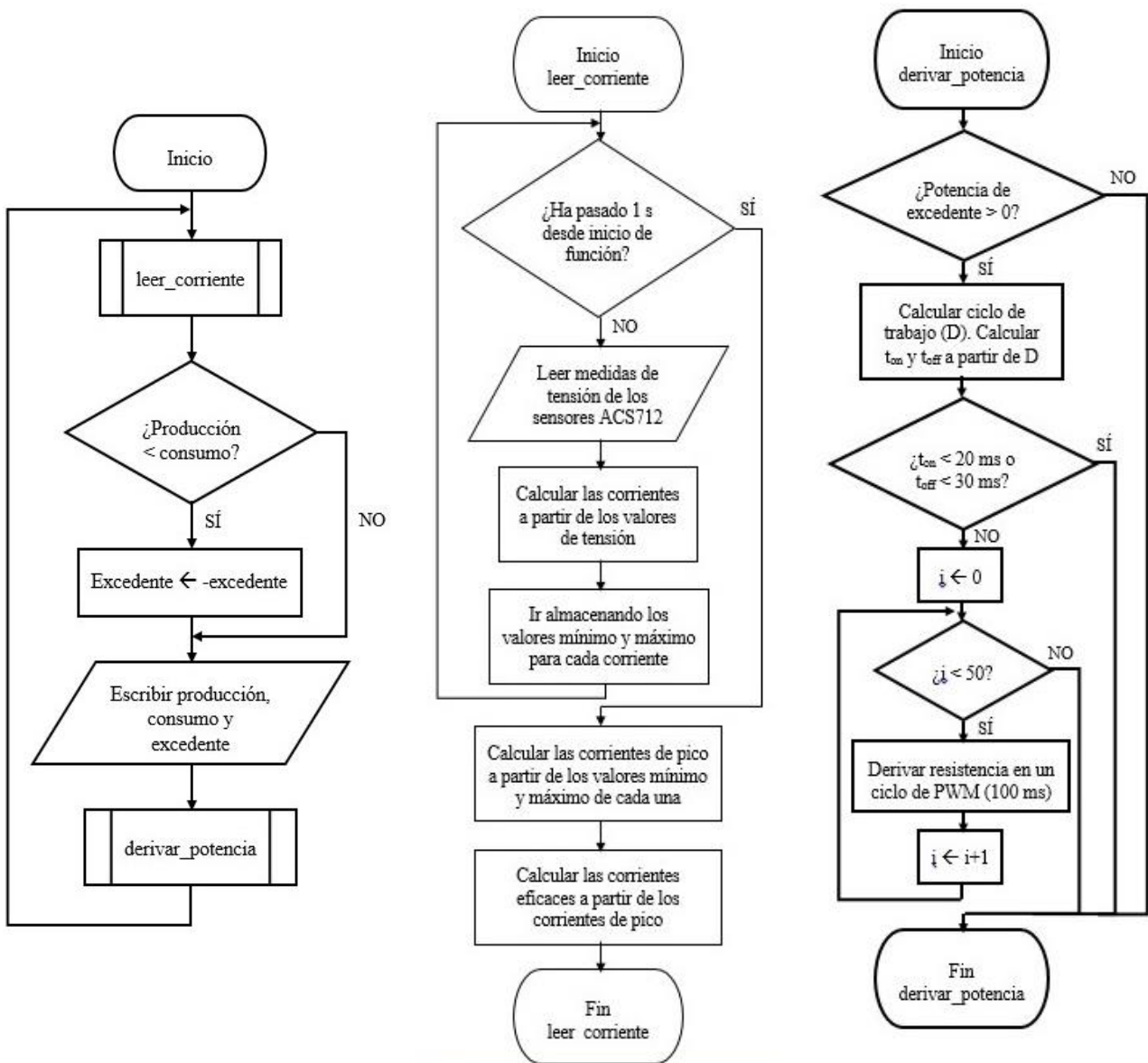


Figura 3-19. Diagrama de flujo del programa de funcionamiento del dispositivo

Antes de pasar a explicar cómo se va a usar en el programa el control de PWM para el relé, se pasará a

⁵ Loop significa bucle en inglés.

explicar qué es una señal PWM.

Una placa Arduino, como muchos automatismos, no es capaz de proporcionar una salida analógica, ni siquiera una salida analógica discretizada. Solo es capaz de proporcionar una salida digital entre un valor de tensión alto y otro bajo; en el caso de Arduino, el valor bajo es 0 V y el valor alto es 5 V. Es decir, Arduino es capaz de proporcionar una salida con estos dos valores de tensión, pero no con ninguno de los valores de tensión que habría entre esos dos.

Sin embargo, existe una solución a este problema que consiste en simular una salida analógica mediante la activación de la salida digital durante un cierto tiempo y mantenerla desactivada durante el resto del tiempo; es decir, se mantiene la salida a 5 V durante un cierto tiempo y a 0 V durante el resto. Con ello, se consigue que el promedio de la tensión que se genera a la salida sea un valor comprendido entre 0 y 5 V.

Una de formas más comunes y sencillas es la modulación por ancho de pulsos, o PWM por sus siglas en inglés. Esta modulación consiste en realizar la operación antes explicada pero manteniendo constante la frecuencia a la que se realiza, de manera que solo se varíe la anchura del pulso. La proporción de tiempo que permanece encendida la señal se denomina ciclo de trabajo (o *duty cycle*), que suele expresarse en tanto por ciento [35].

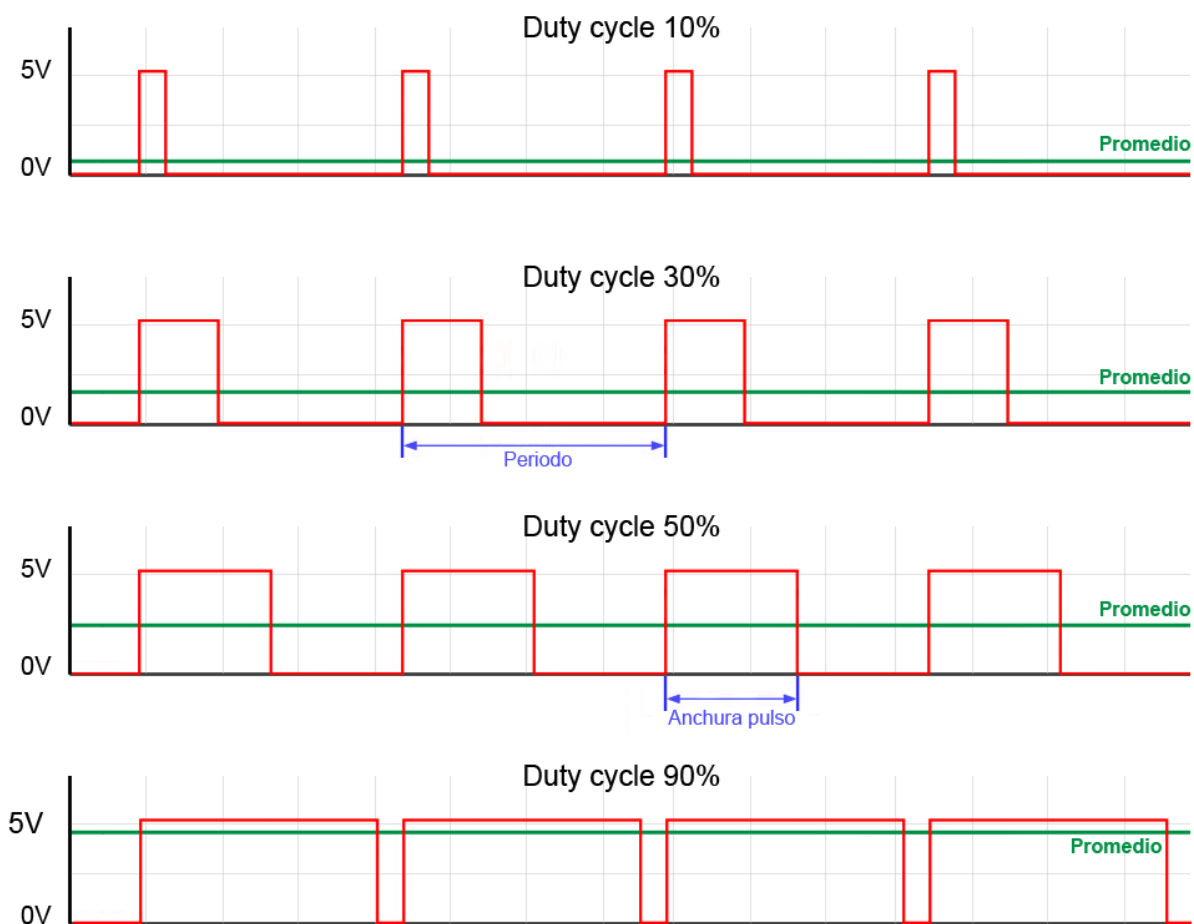


Figura 3-20. Diferentes valores de tensión promedio en función del ciclo de trabajo

De esta manera, el valor promedio se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$V_{AV} = (V_{cc}^+ - V_{cc}^-) \cdot \frac{D}{100} \quad (3-8)$$

En esta ecuación, V_{AV} es el valor promedio de tensión, V_{cc}^+ y V_{cc}^- son los valores alto y bajo de tensión, respectivamente, y D es el ciclo de trabajo en tanto por ciento.

Por tanto, si se quisiera generar una salida con valor promedio de, por ejemplo, 2 V en Arduino, el ciclo de trabajo sería del 40%; es decir, durante el 40% del período, la salida debería estar a 5 V y el tiempo restante a 0 V.

En esto consiste lo que se va a realizar en el programa de Arduino para controlar el excedente que se deriva a la resistencia, solo que en vez de tener unos valores de tensión de 0 y 5 V, serán unos valores de potencia de 0 y 2000 W, que es la máxima potencia de la resistencia. De esta manera, variando mediante el ciclo de trabajo la anchura de pulso que se envía al relé, se podrá derivar cualquier valor de potencia entre 0 y 2000 W.

El procedimiento de este programa, cuyo código puede verse en el anexo A.1, es el siguiente:

- Al comienzo, se declaran e inicializan todas las variables y se desactiva el relé; es decir, se partirá del supuesto de que inicialmente no hay excedente que derivar.
- Después, se obtienen los valores de corriente de producción, consumo y excedente mediante la función *leer_corriente()*. Esta función lee el instante de tiempo actual con la función de Arduino *millis()* y la almacena en la variable *tiempo*. A continuación, se realiza un bucle *while* siempre que la diferencia entre *tiempo* y el instante medido tras cada iteración con *millis()* sea menor que 1000; o lo que es lo mismo, se realizan mediciones para el cálculo de corriente alterna durante 1 segundo. Esto se debe a que el cálculo de la corriente alterna, a diferencia del de la corriente continua, no es inmediato sino que requiere tomar varias mediciones, ya que el valor eficaz de corriente se realizará a partir de los valores máximo y mínimo de la corriente que se mide y, por tanto, se necesita al menos un ciclo completo de la onda de corriente para poder medir dichos valores. De esta manera, el procedimiento en cada iteración es el siguiente:
 - Primero, se leen los valores de tensión de los sensores ACS712 y se convierten al rango de tensión medible por Arduino. Los valores de 5 y de 1023 que aparecen en el coeficiente se debe a que hay que pasar el valor analógico a digital, para lo cual Arduino cuenta con un convertidor analógico-digital de 10 bits; es decir, hay que pasar del rango de 0 a $2^{10} - 1$ (o lo que es lo mismo, de 0 a 1023) al rango de tensión de Arduino, de 0 a 5 V.
 - Después, se va sumando iterativamente cada una de las corrientes a partir de una fórmula derivada de la ecuación (3-2), ya explicada antes. Con esta suma acumulada se consigue que, en cada iteración, la diferencia entre el valor real de la corriente y el que se está calculando sea menor. Es decir, cuanto mayor sea el tiempo de medición, mejor será la medida. Por ello, un tiempo de medición de 1 segundo es apropiado dado que no es muy pequeño como para que el error empiece a ser considerable, ni muy grande, porque el tiempo que se dedique a la medida será tiempo en que no se pueda derivar a la resistencia, debido a que dicha decisión dependerá del valor que se mida, y al hecho de que Arduino no puede estar midiendo y derivando a la vez.
 - Finalmente, se comparan los valores máximos y mínimos de cada corriente con los que se miden en cada iteración, de manera que se vayan almacenando el mayor y el menor valor para cada una, respectivamente. Estos serán los valores que se usarán para calcular las corrientes de pico.

A continuación, tras salir del bucle, se calculan cada una de las corrientes de pico a partir de los valores máximo y mínimo que han quedado almacenados. Con estos valores, la corriente de pico se calcula como la mitad de la diferencia de los valores máximo y mínimo. A partir de estos valores, la corriente eficaz se calcula como la corriente de pico multiplicado por la raíz de 2. Con ello, ya se obtienen los valores de las corrientes eficaces de producción, consumo y excedente.

- Una vez conseguidos estos valores, se comparan para averiguar si se está absorbiendo o cediendo potencia a la red en el intervalo de medición. Esto se hace comparando los valores de producción y consumo, de tal manera que si el consumo es mayor que la producción, significará que se está absorbiendo potencia de la red. Esto se indicará con un signo negativo en el excedente, multiplicándolo por -1. En caso contrario, se dejará tal cual.
- Finalmente, se calcula la potencia de excedente a partir de su valor eficaz y se invoca la función *derivar_potencia()*. Esta función realiza lo siguiente:
 - Inicialmente, comprueba si la potencia de excedente es mayor que cero. Si no es el caso, significará que no hay potencia que derivar, bien porque se está consumiendo justo lo que se produce, bien porque se está absorbiendo potencia de la red, consumiendo más de lo que produce. En este caso, la función mantiene el relé desactivado para no dejar pasar corriente.

- Si la potencia es mayor que cero, significará que hay excedente que se puede derivar a la resistencia. En tal caso, se realizará un control por PWM para poder derivar la cantidad de corriente que hay de excedente. Para ello, se necesita calcular el ciclo de trabajo (calculado como la potencia que hay de excedente entre la potencia máxima de la resistencia) y los tiempos de encendido (el intervalo del ciclo de PWM en el que el relé estará activado) y de apagado (el intervalo del ciclo de PWM en el que el relé estará desactivado).
- Si el tiempo de encendido es menor que 20 ms o el tiempo de apagado es menor que 30 ms, no se derivará la potencia. Esto se debe a que, como ya se expuso en la subsección 3.1.5, estos son los tiempos mínimos que necesita el relé para activarse o desactivarse, respectivamente. Esto se debe a que cuanto menor sea la corriente excedente que se pueda derivar, menor será el ciclo de trabajo y, por tanto, menor será el tiempo de encendido. En otras palabras, cuanto menor sea la corriente excedente, más rápido deberá conmutar el relé para pasar de un estado a otro. Si no se respetan estos tiempos, el relé no funcionaría correctamente e incluso podría estropearse. El tiempo de ciclo de PWM que se ha escogido (100 ms) es debido a estas restricciones.

De hecho, se ha tenido que multiplicar el ciclo de trabajo por un coeficiente menor que 1 debido a que, como se comentará en la siguiente sección, el relé, al no ser capaz de conmutar tan rápido, no permite establecer un ciclo de PWM tan pequeño como se hubiese querido, lo que provocaba que derivase a la resistencia un poco más de lo necesario. Con este coeficiente, se intenta corregir este defecto haciendo que el relé, de entrada, derive siempre un poco menos para compensar.

- Si se cumplen las condiciones referentes a los tiempos de encendido y apagado, se itera 50 veces un ciclo de 100 ms, lo que supone estar derivando el excedente durante 5 segundos, hasta volver a tomar una nueva medida. En cada iteración, se activa el relé durante el intervalo del tiempo de encendido e inmediatamente después se desactiva el relé durante el tiempo restante de ciclo de PWM.

El otro programa, que solo se ha usado para tomar medidas de la corriente que se deriva al relé y cuyo código puede verse en el anexo A.2, funciona de la siguiente manera:

- Inicialmente, se declaran e inicializan todas las variables. Asimismo, se declara e inicializa un objeto de tipo *EnergyMonitor*, que servirá para medir la corriente alterna con el sensor SCT-013. Para ello, se ha incluido una biblioteca externa de Arduino llamada *EmonLib.h*.
- Después, se obtienen los valores de corriente mediante la función *leer_corriente()*. El procedimiento para medir la corriente de excedente es exactamente el mismo que el explicado anteriormente. Para la medición de corriente con el sensor SCT-013, se invoca la función *calcIrms()* del objeto de tipo *EnergyMonitor*, a la que se le pasa el número de muestras que se quieren tomar.

4 PRUEBAS Y RESULTADOS

En este capítulo, se expondrán y explicarán las pruebas que se han ido llevando a cabo para comprobar que el dispositivo funcione correctamente. Las primeras pruebas han ido encaminadas a verificar, en términos generales, el buen funcionamiento del sistema (mediciones correctas de corrientes y derivación adecuada del excedente, en caso de que haya), mientras que el resto han servido para comprobar, en detalle, el comportamiento del dispositivo ante diferentes situaciones que simulen un consumo real.

Todas las gráficas que se muestran en este capítulo representan corrientes en vez de potencias, ya que son corrientes lo que se ha medido con los sensores del dispositivo. Para las potencias, basta con multiplicar los valores por 230 V, que solo provoca un cambio en la magnitud pero no en la forma relativa de las gráficas.

Para el almacenamiento de datos en un fichero .txt, se ha usado el programa CoolTerm, que es una aplicación de terminal de puerto serie que permite intercambiar datos con dispositivos conectados a puertos seriales como una placa Arduino, entre otros [33]. Permite, entre otras funciones, guardar los datos en un fichero de texto plano conforme van siendo recibidos.

Para la representación de los datos en gráficas, se ha usado el programa MATLAB, que entre sus muchas prestaciones permite analizar datos, crear y visualizar gráficas, desarrollar algoritmos y crear modelos [34].

4.1 Primera prueba. Comprobación de medidas de corriente y de derivación de excedente a la resistencia

Para comprobar el funcionamiento general del dispositivo, se ha dejado conectado unos cinco días sin interrupción a consumo constante. En esta prueba no se ha podido variar el consumo dado que no se podían dejar aparatos encendidos sin vigilancia dentro de la casetilla; el único aparato que se podía dejar encendido, además de un equipo de mediciones y unos ordenadores que allí se encuentran, es un aparato de aire acondicionado portátil puesto en modo ventilación a 20 °C, a fin de intentar mantener la temperatura constante para el equipo de mediciones.

Sin embargo, esto no evita que se pueda comprobar el funcionamiento del dispositivo bajo los tres casos que pueden darse a lo largo de un día normal:

- Caso 1: que la producción sea menor que el consumo, lo cual significará que se está absorbiendo energía de la red para el funcionamiento de los aparatos que estén conectados en ese momento, y por ende no hay excedente. En este caso, el dispositivo mantendrá el relé desactivado para evitar que pase corriente hacia la resistencia.
- Caso 2: que la producción sea mayor que el consumo, en cuyo caso habrá excedente que se pueda derivar a la resistencia. Si esto sucede, el dispositivo activará el relé por control PWM de tal manera que derive solo la corriente excedente.
- Caso 3: que la producción sea ligeramente mayor que el consumo, con valores muy cercanos entre ellos. En esta situación, aunque exista una pequeña cantidad de excedente que se puede derivar, el dispositivo no lo hará debido a las restricciones del tiempo de encendido que ya se han comentado en la sección 3.4 y en la subsección 3.1.5. El dispositivo se comportará en este escenario igual que en el caso 1.

Durante esos cinco días, las corrientes de producción, consumo y excedente fueron como se muestra a continuación. Se muestran sus valores en intervalos de 6 segundos, dado que las medidas son discretas y se han ido tomando según se ha explicado en la sección 3.4:

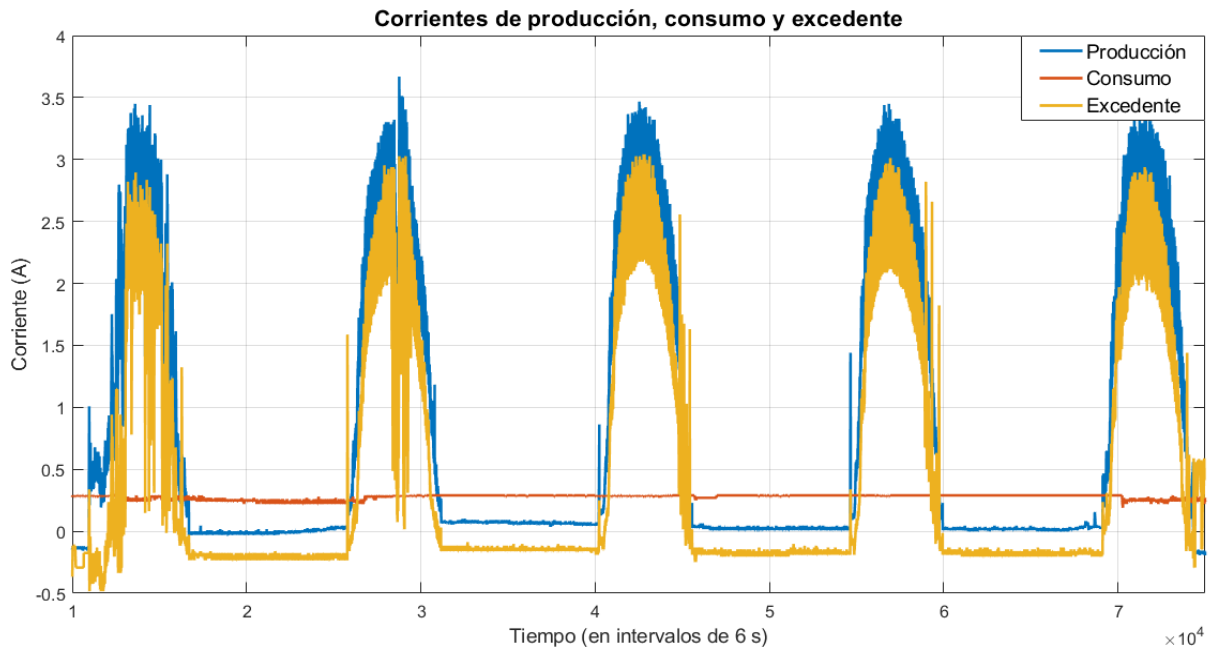


Figura 4-1. Representación de las corrientes de producción, consumo y excedente

En la Figura 4-1, se aprecian cinco crestas en las corrientes de producción y de excedente que corresponden a los cinco días en que se han hecho las mediciones, mientras que la de consumo se mantiene constante (en el caso de consumo real, podría tratarse de un aparato tal como un frigorífico, que consume energía a lo largo de todo el día). El pico de cada una de ellas se produce en torno al mediodía, mientras que las regiones bajas y constantes corresponden a los intervalos en los que no hay luz solar; es decir, del ocaso al alba.

Puede observarse como los dos primeros días tienen mucha variación de corriente mientras que los tres últimos forman crestas casi perfectas. Ello es debido a que en los dos primeros días hubo intervalos periódicos de nubosidad, lo que provocó que las placas fotovoltaicas no pudiesen generar mucha corriente, haciendo que no hubiese mucho excedente, mientras que en los tres días restantes, el tiempo fue prácticamente despejado.

Se muestra ahora la gráfica relativa a la corriente excedente derivada al relé:

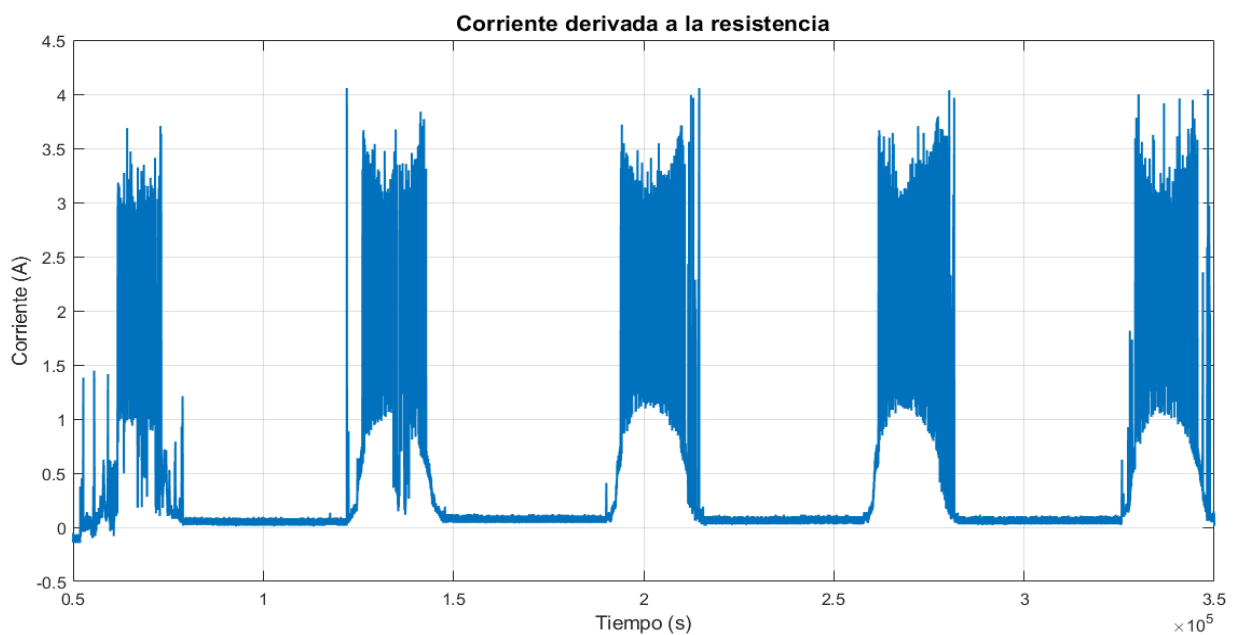


Figura 4-2. Representación de la corriente excedente derivada al relé

En vista de la gráfica, el relé parece responder como cabría esperar. Las oscilaciones que aparecen en la representación se debe únicamente al hecho de que puede suceder que, al tomar la medida de la corriente del relé, este pueda estar activándose o desactivándose en ese preciso instante, ya que el control por PWM sobre el relé realizado por la primera placa no tiene por qué estar sincronizado con la toma de medidas del relé de la segunda placa (de hecho, es imposible realizar las medidas sincronizándolas con el PWM de la otra placa).

Sin embargo, basta ampliar una región de la gráfica para ver que las oscilaciones para apreciar mejor las medidas:

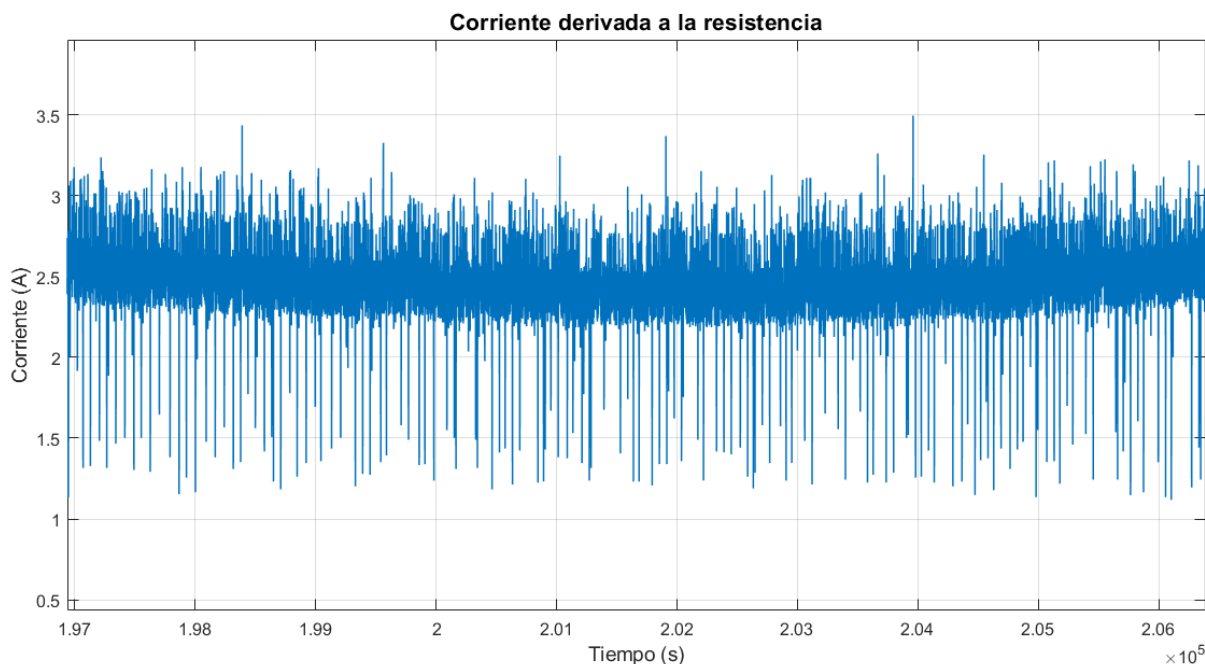


Figura 4-3. Ampliación de una región de la Figura 4-2

En la Figura 4-3, se ha realizado una ampliación de la Figura 4-2 en el entorno del segundo 2×10^5 , que sería el instante equivalente al pico del tercer día de la Figura 4-1. En esa región, el excedente que aparece en la Figura 4-1 es próximo a 2,5 A y, como se aprecia en la Figura 4-3, se derivan en torno a 2,6 A es ese momento, lo que significa que el excedente, en ese intervalo entre medidas, tiende a cero; es decir, no se está vertiendo prácticamente nada a la red. Por tanto, el funcionamiento general del dispositivo es correcto.

Cabe recordar que el valor de excedente que aparece en la Figura 4-1 es el valor que se mide con el relé desactivado; es decir, mientras se mide no se está derivando nada porque no se puede. Es más, si se representase la corriente derivada por el relé a la resistencia durante cada instante de medida de la Figura 4-1, este sería cero. Por ello, es necesario medir el valor de corriente que pasa por el relé entre cada par de medidas, para lo cual se necesita un ciclo de medida menor. De eso se encarga precisamente la segunda placa Arduino, como se acaba de observar.

4.2 Segunda prueba. Comprobación del comportamiento del dispositivo en una simulación de consumo real

Una vez que se ha podido comprobar que el dispositivo funciona bien en términos generales, se pasará a verificar la respuesta del dispositivo ante un escenario que intentará simular un consumo real. Para ello, se han usado los dos focos descritos en la subsección 3.1.8.

Con ellos, se han realizado pruebas en dos días diferentes posteriores a los de la primera prueba. La simulación del consumo ha consistido en encender y apagar en diferentes intervalos los focos de manera que se pueda apreciar cómo responde el dispositivo.

Se muestra a continuación el primer día, en el que se realizaron las pruebas entre las 12:10 y las 14:00, aproximadamente:

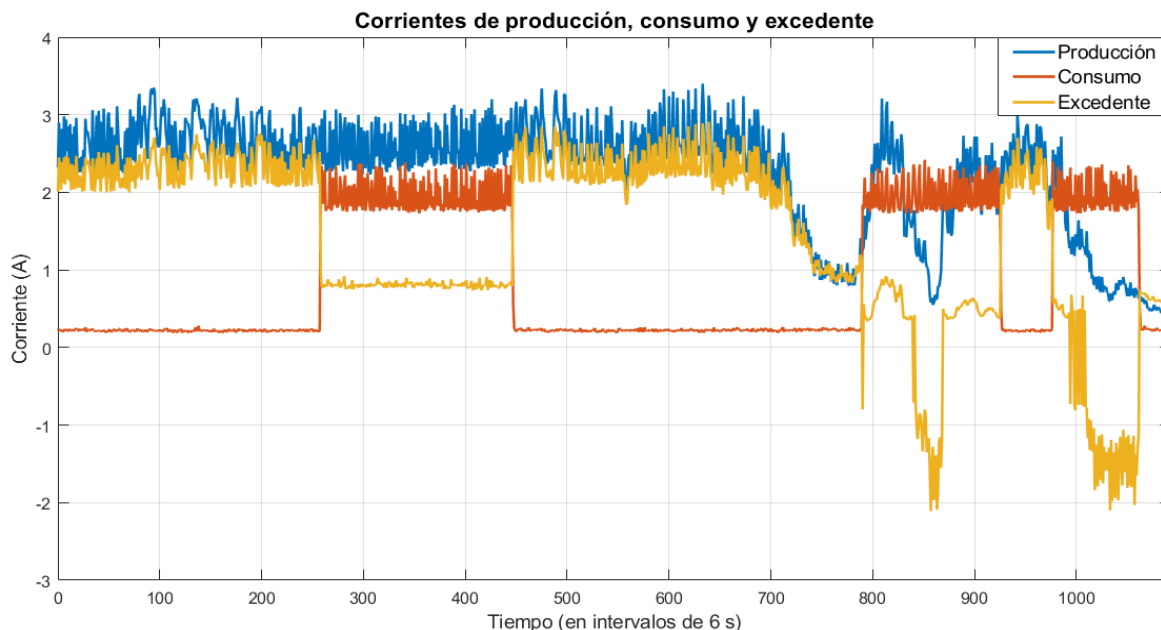


Figura 4-4. Representación de las corrientes de producción, consumo y excedente durante el primer día

En este período de tiempo, el aparato de aire acondicionado portátil estuvo encendido, de ahí que en la gráfica el menor valor de consumo que hay sea de 0,2 A aproximadamente. Se realizó lo siguiente con el foco 1:

- Inicialmente, el foco 1 estaba desenchufado. Solo estaba funcionando el aparato de aire acondicionado. Tras 27 minutos, se pasó a enchufar el foco 1, haciendo que el consumo subiese.
- Otros 20 minutos después, se volvió a desenchufar el foco 1, por lo que tanto el consumo como el excedente volvieron más o menos a sus valores iniciales. En este intervalo, se observa que la producción decae un poco debido a que durante unos minutos el cielo comenzó a nublarse.
- 28 minutos más tarde, se vuelve a enchufar el foco 1 y que, durante unos instantes, hizo que el excedente fuese negativo; es decir, que se estuviese consumiendo más de lo que se producía. Unos 16 minutos después, se vuelve a desenchufar para volver a enchufarlo tras 7 minutos y finalmente desenchufarlo de nuevo a los 10 minutos.

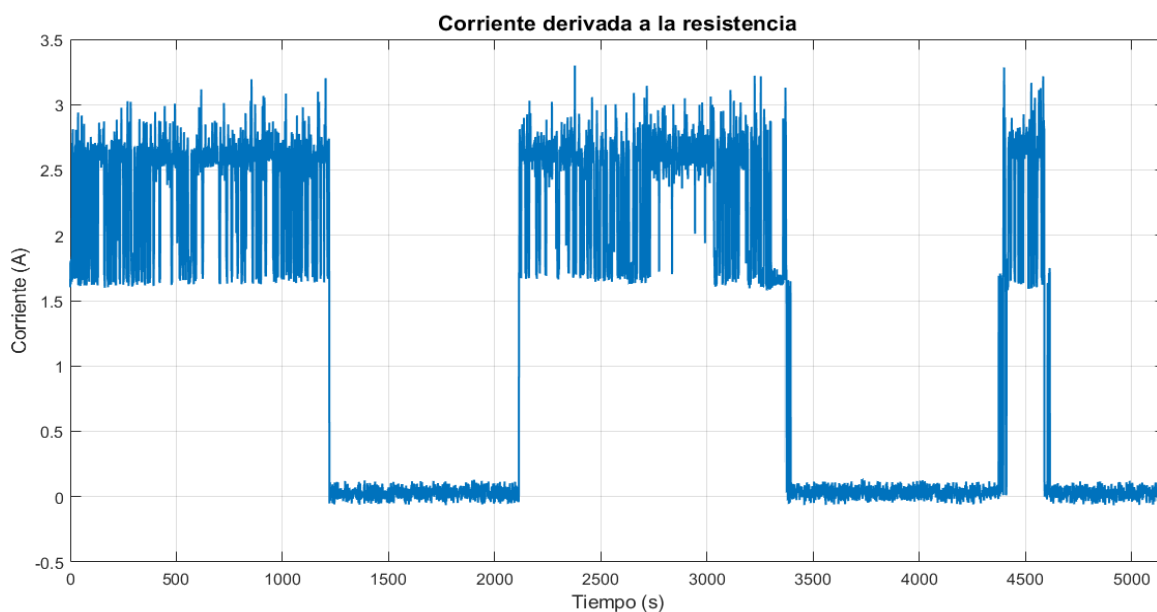


Figura 4-5. Representación de la corriente excedente derivada al relé durante el primer día

Si se observa la Figura 4-5, el dispositivo responde como cabría esperar. Solo deriva en aquellos intervalos en los que el excedente es mucho mayor que el consumo. En aquellos en los que el excedente tiene valores próximos a los del consumo, no deriva debido a las restricciones del tiempo de encendido. Concretamente, si el tiempo de encendido mínimo es de 20 ms, no derivará por debajo de:

$$t_{on} = D \cdot T_{PWM} = \frac{I_{medida}}{I_{m\acute{a}x}} \cdot T_{PWM} \rightarrow 20 \text{ ms} = \frac{I_{medida}}{2000 \text{ W}/230 \text{ V}} \cdot 100 \text{ ms} \rightarrow I_{medida} = 1,74 \text{ A} \quad (4-1)$$

En la expresión anterior, t_{on} es el tiempo de encendido en ciclo de PWM, D es el ciclo de trabajo, T_{PWM} es el periodo de PWM, I_{medida} es la corriente medida e $I_{m\acute{a}x}$ es la corriente máxima de la resistencia.

Ahora, se pasa a mostrar la gráfica correspondiente al segundo día, en el que se realizaron las pruebas aproximadamente entre las 11:10 y las 12:20:

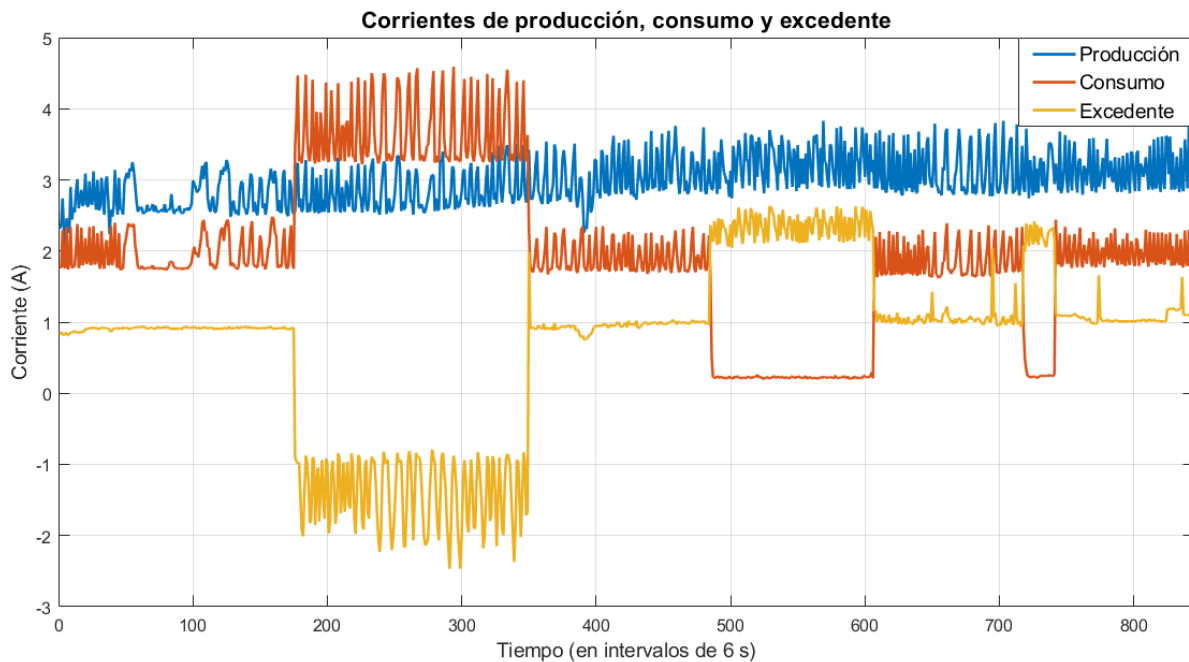


Figura 4-6. Representación de las corrientes de producción, consumo y excedente durante el segundo día

En este período de tiempo, el aparato de aire acondicionado portátil estuvo encendido, de ahí que en la gráfica el menor valor de consumo que hay sea de 0,2 A aproximadamente. En esta prueba, se usaron los focos 1 y 2 de la siguiente manera:

- Inicialmente, solo el foco 1 está encendido y el 2 permanece apagado. Tras 17 minutos, se enciende también el foco 2, haciendo que el consumo subiese considerablemente y que el excedente se hiciese muy negativo; es decir, se estaba absorbiendo de la red mucho más de lo que se producía.
- Otros 18 minutos después, se volvió a apagar el foco 2, por lo que tanto el consumo como el excedente volvieron más o menos a sus valores iniciales.
- Unos 14 minutos más tarde, se apaga el foco 1, quedando solamente encendido el aparato de aire acondicionado.
- Unos 10 minutos después, se vuelve a encender el foco 2 y, tras 9 minutos, se enciende el foco 1 al mismo tiempo en que se apaga el foco 2. No se aprecia ninguna oscilación en dicho instante porque no se mediría la corriente justo en ese momento.
- Tras 2 minutos, se apagan ambos focos de nuevo, para luego encender solo el foco 1 hasta el final de la prueba.

Se comprueba qué sucede con el relé durante esta segunda prueba:

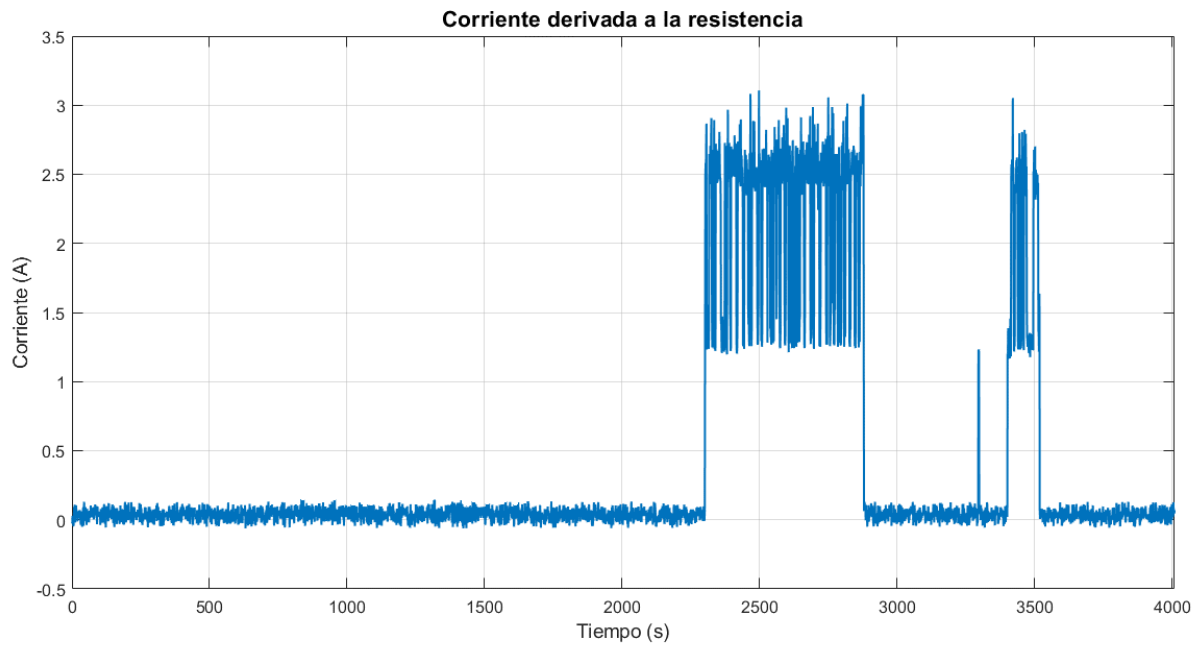


Figura 4-7. Representación de la corriente excedente derivada al relé durante el segundo día

Una vez más, se observa por la Figura 4-7, que el dispositivo es capaz de responder adecuadamente a los cambios de consumo bruscos prácticamente sin dificultad.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En vista del diseño, el montaje y la programación del dispositivo, así como de las pruebas realizadas y los resultados obtenidos, se ha conseguido diseñar y evaluar un dispositivo con el fin de controlar y aprovechar el excedente de energía de una instalación fotovoltaica de autoconsumo de una vivienda para la generación de ACS.

Además, este dispositivo se ha logrado implementar con componentes de bajo coste y con recursos fáciles de usar, por lo que supondría una alternativa muy interesante frente a los equipos que ya existen en el mercado. El único obstáculo para un funcionamiento mejor ha sido el relé, debido principalmente a sus restricciones de tiempo de encendido, que han hecho que se debiese retocar el código para compensar los problemas que causaban dichas restricciones.

5.1 Trabajos futuros

Para concluir, cabría destacar una serie de mejoras y ampliaciones que se podrían implementar al dispositivo en futuros proyectos para hacer que sea mucho más funcional. De entre ellas, se pueden enumerar las siguientes:

- Se podría añadir un *shield*⁶ de Arduino con conectividad Wi-Fi para hacer posible que se pueda monitorizar los datos de producción, consumo y excedente del sistema en su conjunto remotamente desde algún dispositivo electrónico, como un teléfono inteligente o una tableta.
- Se podría añadir una pequeña estación meteorológica o incluso permitir que el sistema tuviera acceso a la previsión meteorológica en tiempo real, para que de este modo dispusiera de más información, no solo de cuánto se está produciendo, sino también de cuánto se espera poder producir, y con ello tomar decisiones de no derivar excedente que se pudiera necesitar más adelante, acumulándolo en una batería.
- Se podría hacer que el dispositivo generase un archivo con el histórico de datos sobre producción, consumo y excedente para poder hacer un uso más responsable de la energía consumida.

⁶ Un *shield* es una placa de circuito impreso que se coloca sobre la placa Arduino y se conecta a ella mediante el acoplamiento de sus pines sin necesidad de alguna otra conexión externa. Su función es actuar como una placa complementaria, ampliando las capacidades de la placa Arduino base [29].

REFERENCIAS

- [1] HILCU, Miruna. Autoconsumo fotovoltaico: Guía completa. En: *Otovo*. Otovo Blog, ©2021. 11 julio 2021 [consulta: 26 julio 2021]. Disponible en: <https://www.otovo.es/blog/autoconsumo/autoconsumo-fotovoltaico-todo-lo-que-ienes-que-saber/>
- [2] *Fronius Ohmpilot - Optimizar el autoconsumo a través de la regulación inteligente de fuentes de calor*. Fronius International GmbH, ©2021 [consulta: 27 julio 2021]. Disponible en: <https://www.fronius.com/es-es/spain/energia-solar/instaladores-y-socios/datos-tecnicos/todos-los-productos/soluciones/soluci%C3%B3n-fronius-para-generaci%C3%B3n-de-calor/fronius-ohmpilot/fronius-ohmpilot>
- [3] FERNÁNDEZ MUNGUÍA, Sergio. Cómo instalar autoconsumo solar en casa: dimensionamiento, coste y rentabilidad. En: *Xataka*. Webedia. 11 febrero 2021 [consulta: 27 julio 2021]. Disponible en: <https://www.xataka.com/energia/como-instalar-autoconsumo-solar-casa-dimensionamiento-coste-rentabilidad>
- [4] *Fronius Ohmpilot - Optimizar el autoconsumo a través de la regulación inteligente de fuentes de calor*. Fronius International GmbH, ©2021 [consulta: 28 julio 2021]. Disponible en: file:///C:/Users/USUARI~1/AppData/Local/Temp/SE_DS_Fronius_Ohmpilot_ES-1.pdf
- [5] Fronius Sistema Optimizacion Ohmpilot 9.0-3. En: *Tiensolar*. Tienda Solar 2021 S.L., ©2019 [consulta: 28 julio 2021]. Disponible en: <https://tiensol.es/accesorios-de-inversores-red/861-fronius-sistema-optimizacion-ohmpilot-9-0-3.html>
- [6] STYLE, Oliver, FULCARÀ, Vicenç y CLAVERO, Bega, Aprovechamiento de excedentes de fotovoltaica de autoconsumo para la producción de Agua Caliente Sanitaria en una vivienda de consumo casi nulo. En: *Construible*. Grupo Tecma Red S.L., ©1991-2021. 4 marzo 2019 [consulta: 30 julio 2021]. Disponible en: <https://www.construible.es/comunicaciones/comunicacion-aprovechamiento-excedentes-fotovoltaica-autoconsumo-produccion-agua-caliente-sanitaria-vivienda-consumo-casi-nulo>
- [7] Casa pasiva. Wikipedia, la enciclopedia libre [consulta: 30 julio 2021]. Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Casa_pasiva
- [8] ¿Cómo funciona el autoconsumo solar? En: *ERCAM*. Energía ERCAM, ©2020. 19 junio 2020 [consulta: 30 julio 2021]. Disponible en: <https://ercam.es/como-funciona-el-autoconsumo-solar/>
- [9] Descripción del sistema Carlotrón – Derivador de energía solar excedente. En: *Carlotrón Solar*. Carlotrón Solar, ©2016 [consulta: 6 agosto 2021]. Disponible en: <https://carlotronsolar.com/descripcion/>
- [10] Carlotrón 6.0 x 1 canal. En: *olasolar.com*. OlaSolar, ©2018 [consulta: 6 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.olasolar.com/derivador-de-excedentes/carlotron-60-x-1-canal.html>
- [11] Arduino Rev 3. En: *Arduino Official Store*. Arduino, ©2021 [consulta: 9 agosto 2021]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
- [12] ARDUINO UNO REV 3 [A000066]. En: *Amazon.es*. Amazon Inc., ©1996-2021. 11 marzo 2013 [consulta: 9 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.amazon.es/Arduino-UNO-A000066->

microcontrolador-ATmega328/dp/B008GRTSV6?th=1

- [13] SUNNY BOY 1.5 / 2.0 / 2.5 | SMA Solar. En: *SMA*. SMA Solar Technology AG, ©2021. 17 noviembre 2017 [consulta: 25 octubre 2021]. Disponible en: <https://www.sma.de/es/productos/inversor-fotovoltaico/sunny-boy-15-20-25.html>
- [14] Sensor de Corriente ACS712 30A. En: UNIT Electronics. UNIT Electronics, ©2016-2021 [consulta: 10 agosto 2021]. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-corriente-ac712-30a/>
- [15] Movilideas 2 pcs ACS712 ACS712ELC Modulo Sensor de Corriente 30A. En: Amazon.es. Amazon Inc., ©1996-2021. 23 octubre 2019 [consulta: 19 octubre 2021]. Disponible en: https://www.amazon.es/Movilideas-ACS712-ACS712ELC-Modulo-Corriente/dp/B07ZHKDKL3/ref=psdc_10229357031_t3_B07379NNS3
- [16] SSR-40 DA Relevador Estado Solido 40A. En: *UNIT Electronics*. UNIT Electronics, ©2016-2021 [consulta: 4 octubre 2021]. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/ssr-40-da-relevador-estado-solido-40a/>
- [17] Relé de estado sólido, Montaje en Panel, 10 A rms, 280 V rms, Paso por cero. En: *RS*. © Amidata S.A.U. [consulta: 4 octubre 2021]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/reles-de-estado-solido/7204044/>
- [18] Relés en Estado Sólido, Relés Zero Crossing, Relés de conmutación instantánea. En: *ELCO*. ELCO, ©2021 [consulta: 4 octubre 2021]. Disponible en: <https://www.elco-italy.com/esp/reles-en-estado-solido.html>
- [19] Por qué mi módulo fotovoltaico no es tan eficiente como debería. En: *AutoSolar*. Autosolar Energy Solutions SLU. 11 diciembre 2018 [consulta: 27 octubre 2021]. Disponible en: <https://autosolar.es/blog/eficiencia-energetica/porque-mi-modulo-fotovoltaico-no-es-tan-eficiente-como-deberia>
- [20] ¿Cuáles son los problemas comunes en la reparación de paneles solares? En: *Soliclima*. Soliclima, ©2005-2021. 14 mayo 2019 [consulta: 27 octubre 2021]. Disponible en: <https://news.soliclima.com/noticias/energia-solar/cuales-son-los-problemas-comunes-en-la-reparacion-de-paneles-solares>
- [21] ¿Qué es la autoproducción? En: *Centro de Ayuda de Som Energia*. Som Energia, ©2021. 22 febrero 2021 [consulta: 14 agosto 2021]. Disponible en: <https://es.support.somenergia.coop/article/780-que-es-la-autoproduccion>
- [22] Efecto fotoeléctrico e instalaciones fotovoltaicas. En: *Energiza*. Renove Tecnología S.L., ©2009-2018 [consulta: 14 agosto 2021]. Disponible en: https://www.energiza.org/index.php?option=com_k2&view=item&id=625:efecto-fotoel%C3%A9ctrico-e-instalaciones-fotovoltaicas
- [23] ALEGSA, Leandro. Definición de anodizado. En: *Definiciones-de.com*. Diccionario de ALEGSA, ©1998-2021. 18 octubre 2018 [consulta: 14 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.definiciones-de.com/Definicion/de/anodizado.php>
- [24] 8 elementos que componen una instalación fotovoltaica. En: *E4e Soluciones*. Ingeniería - E4e Soluciones, ©2021. 25 agosto 2020 [consulta: 14 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.e4e-soluciones.com/blog-eficiencia-energetica/8-elementos-que-componen-una-instalacion-fotovoltaica>

- [25] Cómo sacar el máximo partido a una instalación fotovoltaica. En: *Electric Sun Mobility*. Electric Sun Mobility S. Coop., ©2021 [consulta: 16 agosto 2021]. Disponible en: <https://electric.sunmobility.com/como-sacar-el-maximo-partido-a-una-instalacion-fotovoltaica/>
- [26] ¿Cómo funciona la compensación simplificada de excedentes? En: *Centro de ayuda de Som Energia*. Som Energia, ©2021. 3 marzo 2021 [consulta: 16 agosto 2021]. Disponible en: <https://es.support.somenergia.coop/article/784-como-funciona-la-compensacion-simplificada-de-excedentes>
- [27] setup(). En: *Arduino Reference*. Arduino, ©2021. 19 febrero 2019 [consulta: 23 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/sketch/setup/>
- [28] loop(). En: *Arduino Reference*. Arduino, ©2021. 21 julio 2019 [consulta: 23 agosto 2021]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/structure/sketch/loop/>
- [29] ¿Qué es un Shield? En: *Arduino.cl*. Ingeniería MCI Ltda. [consulta: 4 septiembre 2021]. Disponible en: <https://arduino.cl/que-es-un-shield/>
- [30] Sensor de Corriente SCT-013-000 100A/50mA. En: *UNIT Electronics*. UNIT Electronics, ©2016-2021 [consulta: 10 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://uelectronics.com/producto/sensor-de-corriente-sct-013-000-100a-50ma/>
- [31] SCT-013 mide el consumo eléctrico en tu casa con Arduino. En: *programarfacil.com*. Programar Fácil, ©2021 [consulta: 10 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sct-013-consumo-electrico-arduino/>
- [32] Tareas iniciales contador de energía MEMO MD32. En: *RS*. © Amidata S.A.U. [consulta: 10 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://docs.rs-online.com/b082/A700000007107140.pdf>
- [33] CoolTerm. En: *Roger Meier's Freeware* [consulta: 29 de noviembre de 2021]. Disponible en: <https://freeware.the-meiers.org/>
- [34] MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico - MATLAB & Simulink. En: *MathWorks*. © 1994-2021 The MathWorks, Inc. [consulta: 29 de noviembre de 2021]. Disponible en: https://es.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab
- [35] Salidas analógicas PWM en Arduino. En: *Luis Llamas*. Luis Llamas, © 2021 [consulta: 1 de diciembre de 2021]. Disponible en: <https://www.luisllamas.es/salidas-analogicas-pwm-en-arduino/>

GLOSARIO

AC: Alternating Current (Corriente alterna)	15
ACS: Agua Caliente Sanitaria	xi
DC: Direct Current (Corriente continua)	15
DHW: Domestic Hot Water (Agua caliente sanitaria)	xiii
GND: Ground (Tierra)	15
ICSP: In-Circuit Serial Programming (Programación serie en circuito)	13
IDE: Integrated Development Environment (Entorno de desarrollo integrado)	13
PWM: Pulse-Width Modulation (Modulación por ancho de pulsos)	13
RMS: Root Mean Square (Valor cuadrático medio)	15
UI: User Interface (Interfaz de usuario)	14
VCC: Voltage Collector-to-Collector (Colector de voltaje)	15
Wi-Fi: Wireless Fidelity (Fidelidad inalámbrica)	19

Anexo A. Códigos de Arduino

Anexo A.1. Código de Arduino para el funcionamiento del dispositivo

```

float sensibilidad1 = 0.190; //Sensibilidad del sensor. Para 5 A, la
sensibilidad es de 185 mV/A (se ha ajustado después empíricamente)
float sensibilidad2 = 0.090; //Sensibilidad del sensor. Para 30 A, la
sensibilidad es de 66 mV/A (se ha ajustado después empíricamente)
float voltaje = 230.0; //Tensión de red
float corrienteProd = 0; //Valor de corriente eficaz de producción
medida
float corrienteCons = 0; //Valor de corriente eficaz de consumo medida
float corrienteExced = 0; //Valor de corriente eficaz de excedente medida
float potencia; //Valor de potencia medida
float potenciaMax = 2000.0; //Valor de potencia máxima de la resistencia
calefactora
int sensorProd = A2; //Sensor ACS712 en pin 2 de entrada analógica
para medición de producción
int sensorCons = A1; //Sensor ACS712 en pin 1 de entrada analógica
para medición de consumo
int sensorExced = A0; //Sensor ACS712 en pin 0 de entrada analógica
para medición de excedente
int rele = 2; //Relé en pin 2 de salida digital
float D; //Ciclo de trabajo en la PWM
int ton; //Tiempo de encendido en la PWM
int toff; //Tiempo de apagado en la PWM
float periodo = 100.0; //Periodo de 100 ms
float corrientePicoProd = 0; //Corriente de pico de producción
float corrientePicoCons = 0; //Corriente de pico de consumo
float corrientePicoExced = 0; //Corriente de pico de excedente
int i; //Contador de bucle para simulación de periodo
de muestreo (se ha ajustado después empíricamente)
float voltaje01 = 2.75;
float voltaje02 = 2.65;

void setup()
{
  pinMode(rele, OUTPUT);
  Serial.begin(9600); //Inicio del monitor serie a 9600 baudios

  digitalWrite(rele, LOW); //Inicialmente, el relé estará desactivado
}

void loop()
{
  leer_corriente();

  if(corrienteProd < corrienteCons) //Si hay más consumo que producción, se
está absorbiendo energía de la red
  {
    corrienteExced *= -1; //En ese caso, se representa el
excedente como negativo (como mucho se podrá ceder a la red, pero nunca
absorber de la red)
  }

  Serial.print(corrienteProd, 2);

```

```

Serial.print(" ");
Serial.print(corrienteCons, 2);
Serial.print(" ");
Serial.println(corrienteExced, 2);

potencia = corrienteExced * voltaje;

derivar_potencia();
}

void leer_corriente()
{
  float voltajeProd;          //Valor de voltaje leído del sensor de
producción
  float voltajeCons;          //Valor de voltaje leído del sensor de consumo
  float voltajeExced;         //Valor de voltaje leído del sensor de
excedente
  float corrienteMaxProd = 0.0, corrienteMinProd = 0.0; //Valores de
corrientes máxima y mínima de producción
  float corrienteMaxCons = 0.0, corrienteMinCons = 0.0; //Valores de
corrientes máxima y mínima de consumo
  float corrienteMaxExced = 0.0, corrienteMinExced = 0.0; //Valores de
corrientes máxima y mínima de excedente
  float tiempo = millis();    //Tiempo actual

  digitalWrite(rele, LOW); //Se asegura de que el relé esté desactivado
durante la medición

  while(millis() - tiempo < 1000) //Realizamos mediciones durante 1 segundo
  {
    voltajeProd = analogRead(sensorProd) * (5.0 / 1023.0); //Se lee la
tensión del sensor de producción y se convierte al rango de tensión medible
por Arduino
    voltajeCons = analogRead(sensorCons) * (5.0 / 1023.0); //Se lee la
tensión del sensor de consumo y se convierte al rango de tensión medible por
Arduino
    voltajeExced = analogRead(sensorExced) * (5.0 / 1023.0); //Se lee la
tensión del sensor de excedente y se convierte al rango de tensión medible
por Arduino

    corrienteProd = 0.9 * corrienteProd + 0.1 * ((voltajeProd - voltaje01) /
sensibilidad1); //Ecuación para obtener el valor de corriente eficaz de
producción
    corrienteCons = 0.9 * corrienteCons + 0.1 * ((voltajeCons - voltaje02) /
sensibilidad2); //Ecuación para obtener el valor de corriente eficaz de
consumo
    corrienteExced = 0.9 * corrienteExced + 0.1 * ((voltajeExced - voltaje02)
/ sensibilidad2); //Ecuación para obtener el valor de corriente eficaz de
excedente

    //Se acumulan los valores máximo y mínimo que puedan surgir durante el
bucle para cada corriente
    if(corrienteProd > corrienteMaxProd) corrienteMaxProd = corrienteProd;
    if(corrienteProd < corrienteMinProd) corrienteMinProd = corrienteProd;

    if(corrienteCons > corrienteMaxCons) corrienteMaxCons = corrienteCons;
    if(corrienteCons < corrienteMinCons) corrienteMinCons = corrienteCons;

    if(corrienteExced > corrienteMaxExced) corrienteMaxExced =
corrienteExced;
    if(corrienteExced < corrienteMinExced) corrienteMinExced =
corrienteExced;
  }
}

```

```

}

//La corriente de pico se calcula como la mitad de la diferencia entre
las corrientes máxima y mínima
//La corriente eficaz se calcula como la corriente de pico dividido entre
la raíz cuadrada de 2
corrientePicoProd = (corrienteMaxProd - corrienteMinProd)/2;
corrienteProd = corrientePicoProd * 0.707;

corrientePicoCons = (corrienteMaxCons - corrienteMinCons)/2;
corrienteCons = corrientePicoCons * 0.707;

corrientePicoExced = (corrienteMaxExced - corrienteMinExced)/2;
corrienteExced = corrientePicoExced * 0.707;
}

void derivar_potencia()
{
  int no_deriva = 0; //Variable que hace que no derive energía a la
  resistencia.

  if(potencia > 0) //Se comprueba si hay excedente que se pueda derivar
  {
    D = potencia/potenciaMax*0.75; //Cálculo del ciclo de trabajo
    if(D > 1) D = 1; //Se pone a 1 por si superase ligeramente ese
    valor (no existe D > 1)
    ton = D * periodo;
    toff = (1 - D) * periodo;
    if(ton < 20.0 || toff < 30.0)
    {
      no_deriva = 1;
    }
    i = 0;
    while(i<50 && no_deriva == 0) //Se itera 50 veces para simular un
    periodo de muestro de 5 s
    {
      digitalWrite(rele, HIGH); //Se activa el relé durante un tiempo ton
      delay(ton);
      digitalWrite(rele, LOW); //Se desactiva el relé durante un tiempo
      toff
      delay(toff);
      i++;
    }
    if(no_deriva)
    {
      digitalWrite(rele, LOW);
      delay(5000);
    }
  }
  else //En caso de no haber potencia que derivar,...
  {
    digitalWrite(rele, LOW); //...se desactiva el relé
    delay(5000);
  }
}
}

```

Anexo A.2. Código de Arduino para la medición de corriente derivada a la resistencia

```

#include <EmonLib.h>

EnergyMonitor energyMonitor; //Se crea un objeto de tipo EnergyMonitor

```

```

float sensibilidad = 0.090; //Sensibilidad del sensor. Para 30 A, la
sensibilidad es de 66 mV/A (se ha ajustado después empíricamente)
float corrienteExced = 0; //Valor de corriente eficaz de excedente medida
float corrientePicoExced = 0; //Corriente de pico de excedente
int sensorExced = A1; //Sensor ACS712 en pin 1 de entrada analógica
para medición de excedente
float voltaje0 = 2.65;
double Irms; //Valor de corriente eficaz a la resistencia

void setup()
{
    Serial.begin(9600);

    energyMonitor.current(0, 2.8); // Se inicia el objeto indicándole el pin
donde está conectado el sensor y el valor de calibración
}

void loop()
{
    leer_corrientes();

    Serial.print(corrienteExced, 2);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(Irms, 2);
}

void leer_corrientes()
{
    float voltajeExced; //Valor de voltaje leído del sensor de
excedente
    float corrienteMaxExced = 0.0, corrienteMinExced = 0.0; //Valores de
corrientes máxima y mínima de excedente
    float tiempo = millis(); //Tiempo actual

    while(millis() - tiempo < 1000) //Realizamos mediciones durante 1 segundo
    {
        voltajeExced = analogRead(sensorExced) * (5.0 / 1023.0); //Se lee la
tensión del sensor de excedente y se convierte al rango de tensión medible
por Arduino

        corrienteExced = 0.9 * corrienteExced + 0.1 * ((voltajeExced - voltaje0)
/ sensibilidad); //Ecuación para obtener el valor de corriente eficaz de
excedente

        //Se acumulan los valores máximo y mínimo que puedan surgir durante el
bucle para cada corriente
        if(corrienteExced > corrienteMaxExced) corrienteMaxExced =
corrienteExced;
        if(corrienteExced < corrienteMinExced) corrienteMinExced =
corrienteExced;
    }

    //La corriente de pico se calcula como la mitad de la diferencia entre
las corrientes máxima y mínima
    //La corriente eficaz se calcula como la corriente de pico dividido entre
la raíz cuadrada de 2
    corrientePicoExced = (corrienteMaxExced - corrienteMinExced)/2;
    corrienteExced = corrientePicoExced * 0.707;

    Irms = energyMonitor.calcIrms(1484); // Se calcula la corriente eficaz
pasando a la función el número de muestras que se quieren tomar
}

```