



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
PROTOTIPO DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE  
3,3V A PARTIR DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA

Autor: Nuria Claver Vilanova  
Director: Aurelio García Cerrada

Madrid  
Marzo de 2020



## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### **1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.**

El autor D. NURIA CLAVER VILANOVA

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: PROTOTIPO DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 3,3V A PARTIR DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### **2º. Objeto y fines de la cesión.**

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor CEDE a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### **3º. Condiciones de la cesión y acceso**

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### **4º. Derechos del autor.**

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### **5º. Deberes del autor.**

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que

podieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6°. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a ...07... de ...MARZO... de ..2020

**ACEPTA**

Fdo.....

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**PROTOTIPO DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE 3,3V A PARTIR  
DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2019-2020 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Nuria Claver Vilanova

Fecha: 07 / 03 / 2020



Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Aurelio García Cerrada

Fecha: 05 / 04 / 2020





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
PROTOTIPO DE FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE  
3,3V A PARTIR DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA

Autor: Nuria Claver Vilanova  
Director: Aurelio García Cerrada

Madrid  
Marzo de 2020



# RESUMEN DEL PROYECTO

## 1. Introducción

El Trabajo Fin de Grado expone el análisis, diseño y puesta en marcha de un prototipo de una fuente de alimentación que extrae energía a partir de la línea eléctrica. Este proyecto nace de la idea de alimentar equipos de monitorización de las líneas eléctricas que se encuentran en zonas remotas, lugares donde no hay disponibilidad de un punto de conexión a red para los sensores. Generalmente en estas situaciones suele recurrirse a la alimentación por baterías, pero aumenta el coste y exige un plan de reemplazo periódico. Es por esta razón que se quiere estudiar una alternativa sostenible y sencilla.

La alternativa que se estudia en el proyecto es a partir de métodos de “energy harvesting”. El término de “energy harvesting” hace referencia a la extracción de energía a partir del entorno, como puede ser a través de turbinas eólicas o de la radiación solar. En concreto, para este proyecto, se estudiarán soluciones de “energy harvestig” a partir de la propia línea eléctrica.

En este estudio, la clasificación de extracción de energía se ha dividido en métodos capacitivos e inductivos. Los métodos capacitivos extraen energía a través del campo eléctrico y no dependen de la corriente que circula por la línea [1]. En cambio, los métodos inductivos utilizan el campo magnético. En el caso de la línea eléctrica, la corriente alterna que circula por la línea genera un campo magnético variable que, a través de espiras, induce una tensión. En el proyecto se selecciona un dispositivo inductivo, descartando el método capacitivo por motivos de seguridad y complejidad al trabajar con tensiones elevadas.

## 2. Diseño del circuito

El dispositivo inductivo funciona como un transformador. El primario del transformador es equivalente al cable de la línea eléctrica y el secundario es el conjunto de espiras enrolladas a un núcleo de material ferromagnético tendido en la línea [2]. Debido a que se trabaja con una corriente alterna y una tensión inducida en el secundario muy baja, es necesario añadir un circuito electrónico que rectifique la señal y eleve el valor de la tensión de salida. Asimismo, la fuente de alimentación se encuentra con dos variables. La corriente que circula por la línea y la carga que alimenta. Estas dos variables influyen en el valor de la tensión de salida. Es necesario añadir al circuito algún elemento que sea capaz de controlar estas variaciones.

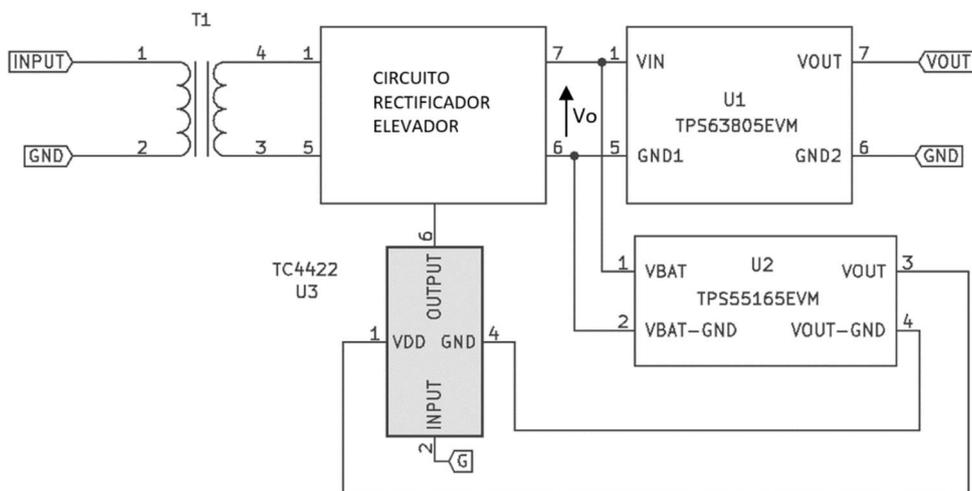


Figura 1: esquema general del prototipo

La propuesta del prototipo completo (ver Figura 1) consiste en extraer energía de la línea eléctrica a partir de un transformador. La corriente inducida por el transformador circula por el Circuito Rectificador Elevador donde se rectifica la señal de la corriente y pasa a ser una señal de corriente continua. A su vez, se eleva el valor de la tensión de salida a un valor de 5V,  $V_o$ , a partir de uno o varios interruptores MOSFETs. Asimismo, el circuito continúa con un convertidor CC-CC U1 que proporciona una tensión de salida de 3,3V continua. El valor no varía ante pequeñas variaciones en la tensión de entrada al convertidor. Conectado en paralelo con U1, está conectado el convertidor CC-CC U2. El convertidor U2 alimenta al driver U3, que es un driver que dispara los MOSFETs del Circuito Rectificador Elevador.

Para el diseño del Circuito Rectificador Elevador surgen distintas propuestas. En todo caso, es necesario llevar a cabo dos tipos de conversiones. Una conversión CA-CC y otra CC-CC. Cabe la posibilidad de reducir el número de conversiones para obtener un circuito más eficiente. Se estudian distintas opciones con una o más conversiones:

- Una conversión

El Convertidor CA-CC 1 realiza una única conversión donde convierte la señal de corriente alterna a corriente continua y eleva la tensión de salida,  $V_o$ .

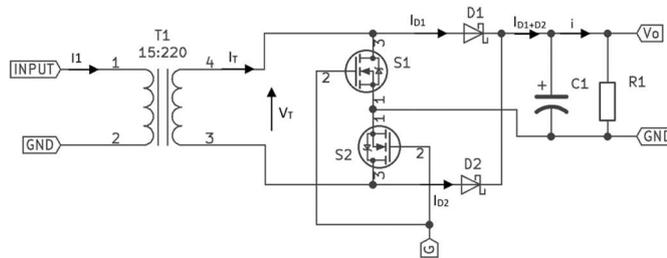


Figura 2: Convertidor CA-CC 1

- Dos conversiones

Se realiza una primera conversión para pasar de CA a CC. En todos los casos se va a utilizar un puente de diodos. Tras la rectificación se añade un segundo convertidor elevador para controlar la tensión de salida. Para este convertidor pueden usarse distintas opciones. El Convertidor CA-CC 2 y el Convertidor CA-CC 3 pertenecen a este grupo.

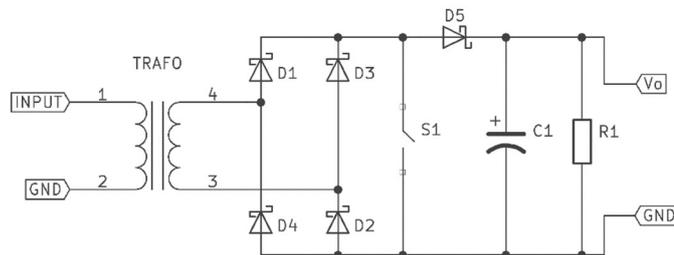


Figura 3: Convertidor CA-CC 2

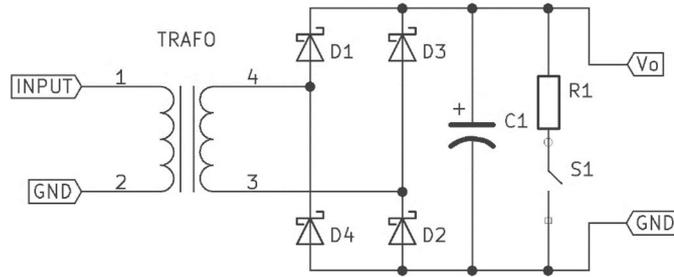


Figura 4: Convertidor CA-CC 3

En estos tres diseños la tensión de salida  $V_o$  se controla a partir de los interruptores, S1 y S2 en el caso del Convertidor CA-CC 1 y S1 en el Convertidor CA-CC 2 y 3. Las conmutaciones las genera el driver a partir de una señal PWM. Al variar el ancho de pulso de la señal PWM varía el valor de la tensión. Dependiendo del convertidor, al aumentar (disminuir) el ancho de pulso, la tensión  $V_o$  aumentará (disminuirá). En el proyecto se calcula el factor de servicio  $D$  con el tiempo  $t_{off}$  del interruptor.

Se ha estudiado la relación entre el factor de servicio, la corriente de entrada al transformador y la tensión de salida  $V_o$ . En la Figura 5 aparece representada la corriente  $I_1$  en función del factor de servicio  $D$  y la tensión de salida en el Convertidor CA-CC 2. Es una representación teórica para tener una idea de los valores necesarios del factor de servicio para mantener la tensión de salida constante ante las variaciones de la corriente. Para mantener  $V_o$  a 5V,  $D$  debe variar entre 0,25 y 0,52.

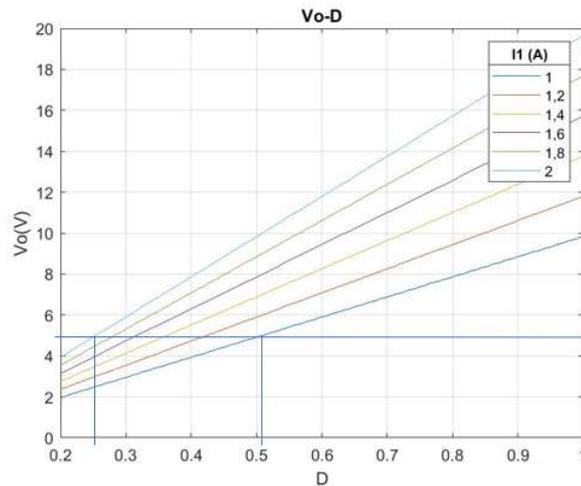


Figura 5: gráfica  $V_o$ - $D$  con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 2

### 3. Resultados

Para realizar los ensayos se conecta el transformador a la red con una resistencia variable para ajustar la corriente a la que se quiere trabajar. Mientras se pone el prototipo a trabajar se van tomando medidas de la tensión de salida del convertidor,  $V_o$ , la corriente del secundario del transformador,  $I_T$ , la corriente del rectificadora,  $I_3$ , la tensión del interruptor S1,  $V_{s1}$ , y el factor de servicio,  $D$ . Una vez se toman las medidas del ensayo se comparan con el comportamiento teórico o esperado. Así, se va a poder comprobar que el circuito funciona correctamente.

Se ensayan los tres convertidores diseñados previamente y resulta que el único convertidor que funciona correctamente es el Convertidor CA-CC 2. Por tanto, se descartan los otros dos convertidores se descartan y se construye el prototipo final con este convertidor.

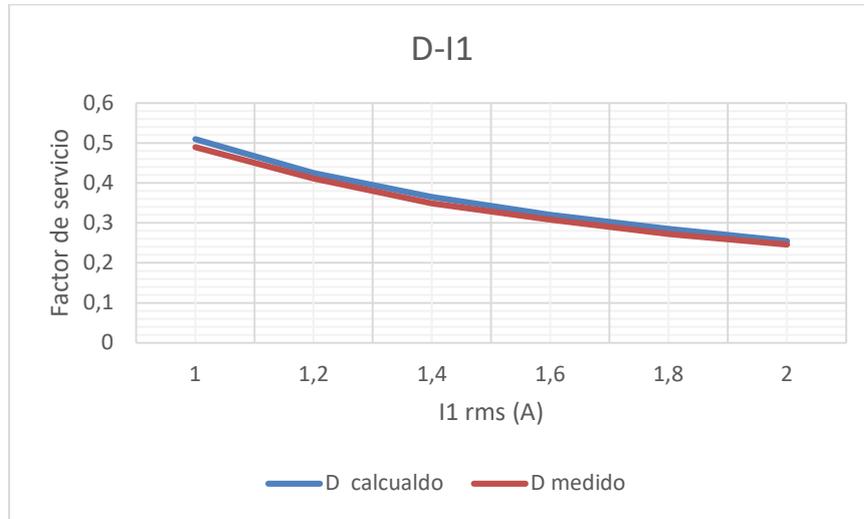


Figura 6: resultados del ensayo del Convertidor CA-CC 2

A partir de las medidas obtenidas al ensayar el Convertidor CA-CC 2 se compara con las medidas teóricas. En la Figura 6, en azul, están representados los valores a los que se ha ido ajustando D para mantener Vo a 5V. En rojo, aparecen los valores teóricos a los que hay que ajustar D para mantener Vo a 5V. El error que existe entre ambos es muy pequeño y se concluye que el comportamiento real se ajusta al comportamiento calculado.

Además, se comprueba que las formas de onda coinciden con las formas de onda esperadas en el diseño del prototipo. Efectivamente, en la Figura 7, aparece (en amarillo) la corriente senoidal del primario del transformador, I1, (en verde) la corriente rectificadora a la salida del rectificador, I3, (en azul) la tensión que cae en el interruptor, Vs1, y (en rosa) la tensión de salida del convertidor, Vo. La tensión de salida tiene 5V de valor medio, pero mantiene un rizado.

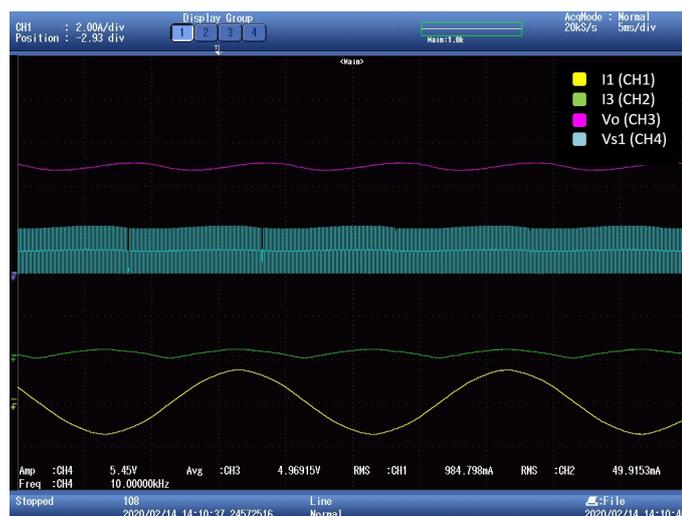


Figura 7: resultados del ensayo del Convertidor CA-CC 2

Después de añadir los convertidores U1 y U2 la tensión es continua de 3,3 y 5V (ver Figura 8).

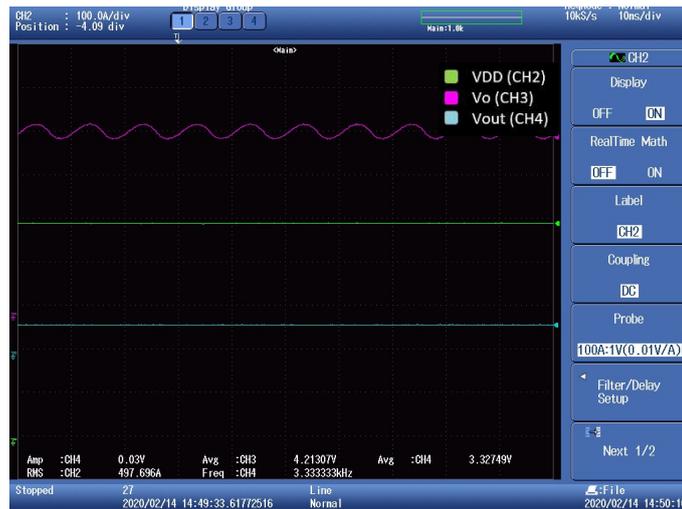


Figura 8: resultados del ensayo del Convertidor CA-CC 2

#### 4. Conclusiones

Se ha construido una fuente de alimentación de 3,3V a partir de la línea eléctrica. El prototipo construido proporciona una tensión de 3,3V y funciona ante variaciones en la corriente de entrada. Asimismo, tanto la salida final del prototipo, Vout, como la alimentación del driver U3, VDD, son señales continuas (ver Figura 8). Esto se debe a que la realimentación negativa que tienen los convertidores U1 y U2 eliminan los armónicos de la señal Vo.

El dispositivo de extracción de energía (el transformador) depende únicamente de la corriente que circula por la línea, por lo tanto, la fuente de alimentación se podría utilizar en líneas eléctricas de baja, media y alta tensión. En el ensayo la corriente que induce el prototipo es entre 1 y 2 A y la potencia entregada en el dispositivo se ve restringida por el convertidor conectado a la salida (U1). La potencia máxima que el prototipo puede entregar es de 6,6W [3].

## PROJECT SUMMARY

### 1. Introduction

This project presents the analysis, design and implementation of a prototype of a power source that harvest energy from the power line. This project starts from the idea of powering monitoring equipment for power lines that are in remote areas, places where there is no availability of a network connection point for powering sensors. Usually in these situations, batteries are used for powering sensors, but this solution increases the cost and requires a periodic replacement plan. Therefore, the aim of this project is to present a sustainable and simple alternative.

The alternative studied in the project is based on energy harvesting methods. Energy harvesting is defined as the conversion of ambient energy into a usable electric form [1], for example, through wind turbines or solar radiation. But for this project, only energy harvesting solutions from the power line will be studied.

In order to do so, the research was divided into capacitive and inductive energy harvesting methods. On one hand, the capacitive method is based on the electric field. The energy harvesting device works as a capacitive voltage divider and it does not depend on the amplitude of the load current. On the other hand, the inductive method uses the electromagnetic field to harvest energy. The electricity is obtained by electromagnetic induction. Nevertheless, the inductive method is selected for this project, discarding the capacitive method for reasons of safeness and difficulties when working with high voltages.

### 2. Circuit design

In this project we use a voltage transformer as an inductive device for energy harvesting, where the primary of the transformer is equivalent to the power line cable and the secondary is the set of coils wound to a core of ferromagnetic material laid on the line [2]. The power sources design for the project has one output, the output voltage,  $V_{out}$ , and two variables, the power line current and the output load. These two variables have an influence on the output voltage. In order to maintain  $V_{out}$  constant, it is necessary to add to the circuit element that controls the output.

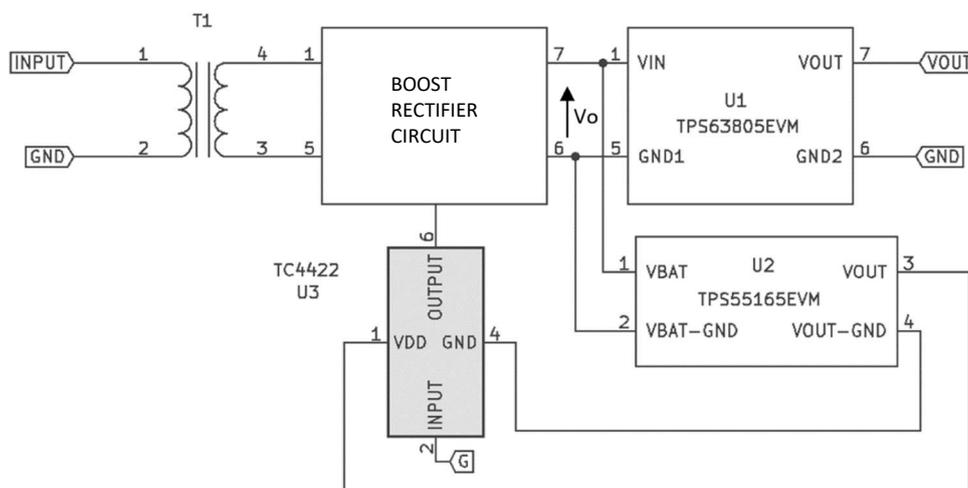


Figura 9

The proposal of the complete prototype (see Figura 9) is to extract energy from the power line making use of a voltage transformer. The current induced by the transformer flows through Boost Rectifier Circuit, where the current,  $I_l$ , it comes out as rectified signal. Furthermore, the boost rectifier circuit raises the value of  $V_o$  to 5V. This is done with one or more MOSFET switches. The circuit continues with a DC-DC converter, U1, that provides a continuous 3.3V output voltage,  $V_{out}$ . Due to U1, even if there is any variation in  $V_o$ ,  $V_{out}$  stays constant at 3.3V. Connected in parallel with U1, the DC-DC converter U2 is connected. U2 converter powers U3 driver, which is a driver that triggers the switches of the Boost Rectifier Circuit.

Different proposals arise in the design of the Elevator Rectifier Circuit. In any case, it is necessary to carry out two types of conversions. A CA-CC and a CC-CC conversion. It is possible to reduce the number of conversions to obtain a more efficient circuit. Different options are studied with one or more conversions:

- One conversion

The AC-DC Converter 1 performs a single conversion where it converts the current induced by the transformer into a DC current and raises the output voltage,  $V_o$ , value.

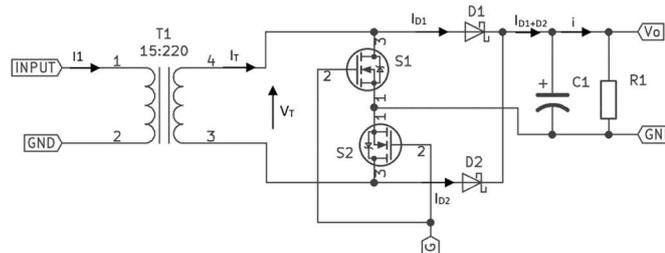


Figura 10: AC-DC 1 Converter

- Two conversions

A first conversion is made to convert the current,  $I_T$ , from AC to DC. In both circuits, a diode bridge will be used. After the rectification a second boost converter is added to control the output voltage. For this conversion there have been designed two different options: the AC-DC Converter 2 and the AC-DC Converter 3.

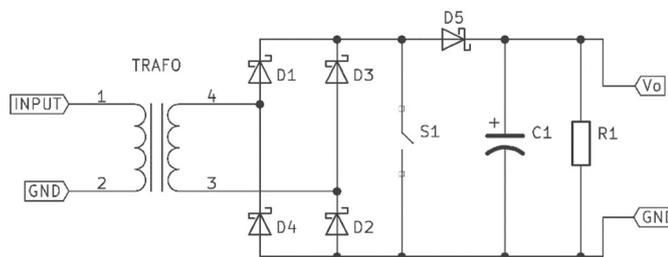


Figura 11: AC-DC 2 Converter

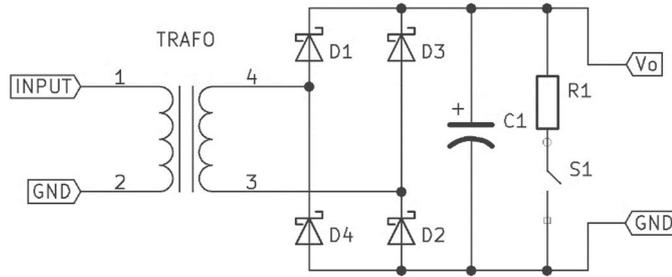


Figura 12: AC-DC 3 Converter

Common to these three designs, the output voltage,  $V_o$ , is controlled with switches, S1 and S2, in the case of the AC-DC Converter 1 and S1 in AC-DC Converter 2 and 3. The interruptions are generated by a PWM signal. By varying the pulse width of the PWM signal, the voltage value varies. It depends on the converter, that as the pulse width increases (decreases), the  $V_o$  voltage will increase (decrease). For this project, to calculate the duty cycle, D, we have used the toff time of the switches.

Within the design, the relation between the duty cycle, D, the input current,  $I_1$ , and the output voltage,  $V_o$ , of the circuit is studied. Figura 13 exposes the current,  $I_1$ , as a function of the duty cycle, D, and the output voltage on the AC-DC Converter 2. This graph is a theoretical representation to understand between what values the duty cycle varies in order to maintain  $V_o$  constant at 5V. Theoretically, D varies between 0.25 and 0.52.

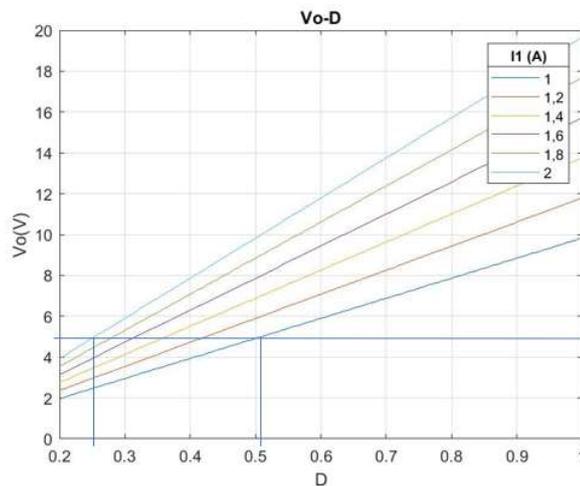


Figura 13

### 3. Results

In order to carry out the tests, the transformer is connected to the electrical outlet with a variable resistor to be able to adjust the current to different amplitude values. To prove the right performance of the circuit, measurements are taken of the output voltage of the converter,  $V_o$ , the current  $I_T$ , the current after the rectifier,  $I_3$ , the voltage of the switch S1,  $V_{s1}$ , and the duty cycle D. Once the test measurements are taken, they are compared with the theoretical or expected behaviour.

The three converters are tested during the project, but only AC-DC 2 Converter works properly. Therefore, the other two converters are discarded, and the final prototype is built with the AC-DC 2 Converter.

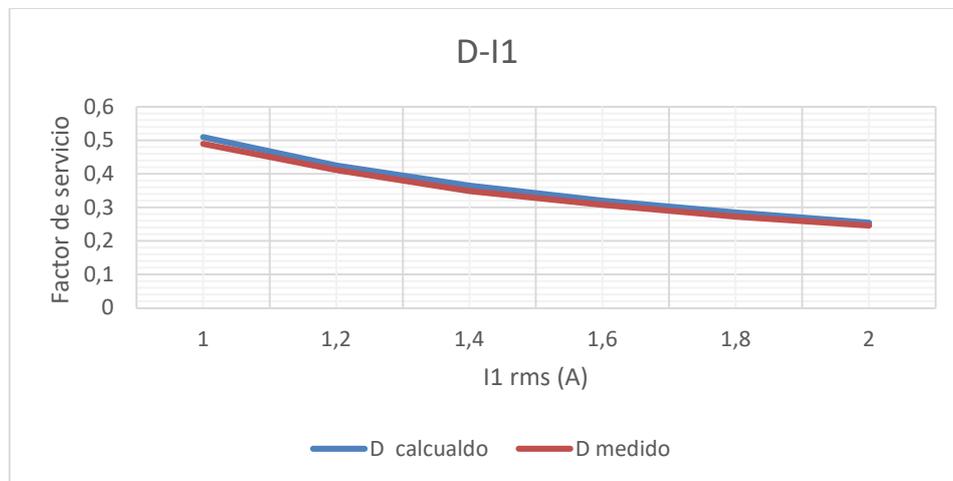


Figura 14

We compare the measurements obtained when testing the AC-DC Converter 2 to the theoretical values. In Figura 14, in blue, the values to which D has been adjusted to keep  $V_o$  at 5V are represented. In red, the theoretical values to which D must be adjusted to keep  $V_o$  at 5V. As shown in the graph, the error between both functions is very small and it is concluded that the real behavior fits the calculated behavior.

In addition, it is verified that the waveforms correspond with the waveforms expected in the prototype design. Indeed, Figura 15 shows the waveforms the sinusoidal current  $I_1$ , in green, the rectified current  $I_3$ , in blue the voltage that falls on the switch,  $V_{s1}$ , and, in pink, the output voltage of the converter  $V_o$ , that match with the simulated waveforms. The output voltage has 5V average value, with a ripple voltage.

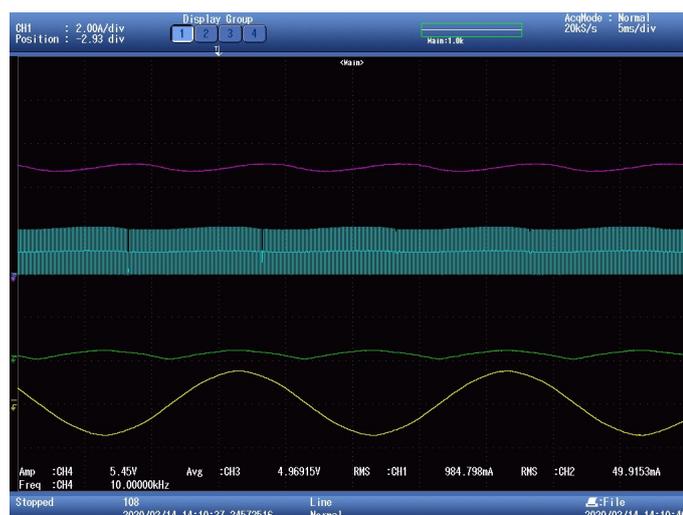


Figura 15

When adding U1 and U2 converters, the ripple voltage is discarded (see Figura 16).



Figura 16

#### 4. Conclusions

A 3.3V power source has been built by energy harvesting from the power line. The prototype provides a voltage of 3.3V and has been proven to work correctly through variations in the input current. Likewise, both the final output of the prototype,  $V_{out}$ , and the power supply of the U3 driver, VDD, are continuous signals (see Figura 16) due to the negative feedback with what U1 and U2 work, that eliminates the harmonics of  $V_o$  signal.

The energy extraction device (the transformer) depends only on the current flowing through the line, therefore, the power supply could be used on low, medium and high voltage power lines. The current induced by the prototype is between 1 and 2 A and the power delivered from the power source is restricted by the converter connected to the output (U1). The maximum power that the prototype can deliver is 6.6W [3].

---

## ÍNDICE

---

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Resumen del proyecto</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>Project summary</b> .....   | <b>10</b> |
| <b>Capítulo 1: Introducción y objetivos</b> .....                              | <b>15</b> |
| 1. Introducción.....   | 16        |
| 2. Motivación.....   | 17        |
| 3. Objetivos del proyecto .....  | 18        |
| 4. Estado del arte .....   | 19        |
| <b>Capítulo 2: Diseño Convertidor CA-CC 1</b> .....                            | <b>26</b> |
| 1. Introducción.....   | 27        |
| 2. Convertidor CA-CC 1.....  | 28        |
| 3. Simulación del Convertidor CA-CC 1 .....                                    | 33        |
| <b>Capítulo 3: Diseño Convertidor CA-CC 2 y Convertidor CA-CC 3</b> .....      | <b>36</b> |
| 1. Introducción.....   | 37        |
| 2. Convertidor CA-CC 2.....  | 38        |
| 3. Simulación del Convertidor CA-CC 2 .....                                    | 40        |
| 4. Convertidor CA-CC 3.....  | 43        |
| 5. Simulación del Convertidor CA-CC 3 .....                                    | 46        |
| <b>Capítulo 4: Topología elegida</b> .....                                     | <b>49</b> |
| 1. Introducción.....   | 50        |
| 2. Selección del interruptor .....   | 51        |
| 3. MOSFETs .....   | 53        |
| 4. Driver (U3) .....   | 54        |
| 5. Convertidor TPS63805EVM-026 (U1).....                                       | 56        |
| 6. Convertidor TPS55165-EVM (U2) .....   | 58        |
| 7. El resto de los componentes utilizados .....                                | 59        |
| <b>Capítulo 5: Resultados y conclusiones</b> .....                             | <b>60</b> |
| 1. Introducción.....   | 61        |
| 2. Resultados: valores medidos en el prototipo con el Convertidor CA-CC 2..... | 62        |
| 3. Conclusiones .....  | 68        |
| 4. Trabajo futuro .....  | 70        |
| <b>Anexo I: Presupuesto</b> .....  | <b>72</b> |
| <b>Anexo II: Objetivos de desarrollo sostenible</b> .....                      | <b>74</b> |
| <b>Bibliografía</b> .....  | <b>76</b> |

---

**TABLA DE FIGURAS**

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: representación del condensador flotante [4] .....  | 19 |
| Figura 2: esquema equivalente del divisor de tensión capacitivo [4] .....  | 20 |
| Figura 3: representación del condensador flotante entre la línea eléctrica y el suelo .....  | 20 |
| Figura 4: representación de la estructura del equipo de "energy harvesting" [2].....   | 21 |
| Figura 5: imagen de un equipo de "energy harvesting" por inducción [6] .....   | 21 |
| Figura 6: esquema equivalente al equipo de "energy harvesting" [2].....  | 22 |
| Figura 7: representación transversal del tubo [7].....   | 23 |
| Figura 8: esquema del circuito: Convertidor CA-CC 1, con una conversión [6].....   | 23 |
| Figura 9: esquema del circuito: Convertidor CA-CC, 2 de un circuito con un puente rectificador y un convertidor reductor-elevador.....   | 24 |
| Figura 10: esquema del circuito: Convertidor CA-CC 3 de un circuito con un puente rectificador y un convertidor reductor-elevador.....   | 24 |
| Figura 11: Esquema del circuito completo del prototipo a construir .....   | 25 |
| Figura 12: Esquema del prototipo completo con el Convertidor CA-CC 1.....  | 27 |
| Figura 13: esquema del Convertidor CA-CC 1 conectado al transformador.....   | 28 |
| Figura 14: funcionamiento del convertidor del circuito 1 [6].....  | 29 |
| Figura 15: formas de onda $I_T$ , $I_{D1}$ , $I_{D2}$ y $V_T$ para un factor de servicio dado [6] .....  | 29 |
| Figura 16: formas de onda de la corriente de carga media $i$ (azul) y la corriente $I_{D1+D2}$ (amarillo) con un factor de servicio $D = 0$ .....  | 30 |
| Figura 17: formas de onda de la corriente de carga media $i$ (azul) y la corriente $I_{D1+D2}$ (amarillo) con un factor de servicio $D = 0,5$ .....  | 31 |
| Figura 18: gráfica $V_o$ - $D$ con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 1 .....  | 32 |
| Figura 19: simulación del Convertidor CA-CC 1. Formas de onda de (azul) la corriente a la salida del secundario del transformador, $I_T$ y (amarillo) la corriente rectificadora $I_{D1+D2}$ .....   | 33 |
| Figura 20: simulación del Convertidor CA-CC 1. Forma de onda de la tensión de salida $V_o$ .....   | 33 |
| Figura 21: simulación del Convertidor CA-CC 1. Forma de onda de la tensión a la salida del transformador ( $V_T$ ). En la gráfica superior se aprecia la forma de onda de $V_T$ . En la gráfica inferior pueden verse mejor las conmutaciones de los interruptores ..... | 34 |
| Figura 22: simulación de la tensión de salida $V_o$ del Convertidor CA-CC 1. La capacidad del condensador es de $220\mu F$ .....   | 35 |
| Figura 23: simulación de la tensión de salida $V_o$ del Convertidor CA-CC 1. La capacidad del condensador es de $1mF$ .....  | 35 |
| Figura 24: esquema del Convertidor CA-CC 2 conectado al transformador.....   | 37 |
| Figura 25: esquema del Convertidor CA-CC 3 conectado al transformador.....   | 37 |
| Figura 26: gráfica $V_o$ - $D$ con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 2 .....  | 39 |
| Figura 27: simulación del Convertidor CA-CC 2. Formas de onda de (amarillo) la corriente a la salida del secundario del transformador, $I_T$ y (azul) la corriente que circula por el diodo $D5$ , $I_3$ .....   | 40 |
| Figura 28: simulación del Convertidor CA-CC 2. Forma de onda de $I_T$ .....  | 40 |
| Figura 29: simulación del Convertidor CA-CC 2. Forma de onda de la tensión de salida $V_o$ .....   | 40 |
| Figura 30: simulación del Convertidor CA-CC 2. Forma de onda de la tensión del interruptor ( $V_{s1}$ ). En la gráfica superior se aprecia la forma de onda de $V_{s1}$ . En la gráfica inferior pueden verse las conmutaciones que realiza el interruptor.....          | 41 |
| Figura 31: Cálculo de la resistencia equivalente entre $R1$ Y $S1$ .....   | 43 |
| Figura 32: gráfica $V_o$ - $D$ con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 3 .....  | 45 |
| Figura 33: simulación del Convertidor CA-CC 3. Formas de onda de (amarillo) la corriente a la salida del secundario del transformador, $I_T$ , y (naranja) corriente media de carga, $i$ .....   | 46 |
| Figura 34: simulación del Convertidor CA-CC 3. Formas de onda de (amarillo) $I_T$ y (azul) $I_3$ .....   | 46 |
| Figura 35: simulación del Convertidor CA-CC 3. Forma de onda de $I_T$ .....  | 46 |
| Figura 36: simulación del Convertidor CA-CC 3. Forma de onda de $V_o$ .....  | 47 |
| Figura 37: simulación del Convertidor CA-CC 3. Formas de onda de (azul) $I_3$ y (naranja) $i$ .....  | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 38: esquema general de un interruptor controlado [9].....   | 51 |
| Figura 39: gráfico de barras para comparar los diferentes semiconductores según la tensión, corriente y la frecuencia de las interrupciones [10] ..... | 52 |
| Figura 40: esquema de un transistor MOSFET de canal N con el diodo parásito [8] .....  | 53 |
| Figura 41: diagrama de bloques del driver TC442x [10] .....  | 54 |
| Figura 42: esquema general del prototipo señalada la conexión del driver TC4421 .....  | 55 |
| Figura 43: PCB del convertidor TPS63805EVM-026 .....   | 56 |
| Figura 44: esquema general del prototipo señalada la conexión del convertidor TPS63805EVM-026.....   | 57 |
| Figura 45: PCB del convertidor TPS55165Q1-EVM.....   | 58 |
| Figura 46: esquema general del prototipo señalada la conexión del convertidor TPS55165Q1-EVM .....   | 58 |
| Figura 47: esquema del montaje del prototipo .....   | 61 |
| Figura 48: esquema del driver TC4422 .....   | 61 |
| Figura 49: esquema del ensayo del Convertidor CA-CC 2 con el transformador.....  | 62 |
| Figura 50: Gráfica D-I1. Compara el factor de servicio calculado frente al medido en el ensayo .63   |    |
| Figura 51: imagen del osciloscopio para una corriente de entrada $I_1=1A$ , factor de servicio $D=0,51$ y una tensión de salida $V_o=5V$ .....         | 63 |
| Figura 52: imagen del osciloscopio para una corriente de entrada $I_1=1A$ , factor de servicio $D=0,51$ y una tensión de salida $V_o=5V$ .....         | 64 |
| Figura 53: esquema del ensayo del prototipo con el Convertidor CA-CC 2.....  | 65 |
| Figura 54: imagen del osciloscopio de las tensiones $V_o$ , $V_{DD}$ y $V_{out}$ .....   | 67 |
| Figura 55: tabla del presupuesto de la realización del prototipo.....  | 73 |



La propuesta del prototipo completo (ver Figura 1) consiste en extraer energía de la línea eléctrica a partir de un transformador. La corriente inducida por el transformador circula por el Circuito Rectificador Elevador donde se rectifica la señal de la corriente y pasa a ser una señal de corriente continua. A su vez, se eleva el valor de la tensión de salida a un valor de 5V,  $V_o$ , a partir de uno o varios interruptores MOSFETs. Asimismo, el circuito continúa con un convertidor CC-CC U1 que proporciona una tensión de salida de 3,3V continua. El valor no varía ante pequeñas variaciones en la tensión de entrada al convertidor. Conectado en paralelo con U1, está conectado el convertidor CC-CC U2. El convertidor U2 alimenta al driver U3, que es un driver que dispara los MOSFETs del Circuito Rectificador Elevador.

Para el diseño del Circuito Rectificador Elevador surgen distintas propuestas. En todo caso, es necesario llevar a cabo dos tipos de conversiones. Una conversión CA-CC y otra CC-CC. Cabe la posibilidad de reducir el número de conversiones para obtener un circuito más eficiente. Se estudian distintas opciones con una o más conversiones:

- Una conversión

El Convertidor CA-CC 1 realiza una única conversión donde convierte la señal de corriente alterna a corriente continua y eleva la tensión de salida,  $V_o$ .

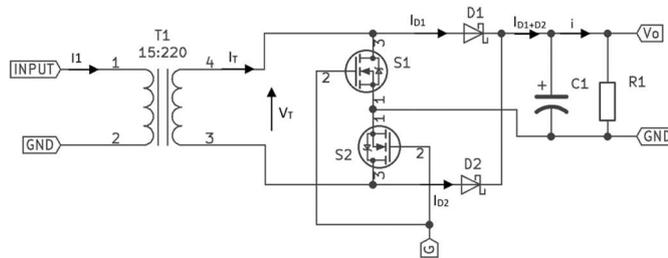


Figura 2: Convertidor CA-CC 1

- Dos conversiones

Se realiza una primera conversión para pasar de CA a CC. En todos los casos se va a utilizar un puente de diodos. Tras la rectificación se añade un segundo convertidor elevador para controlar la tensión de salida. Para este convertidor pueden usarse distintas opciones. El Convertidor CA-CC 2 y el Convertidor CA-CC 3 pertenecen a este grupo.

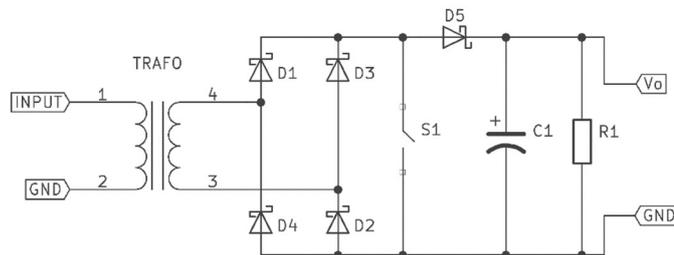


Figura 3: Convertidor CA-CC 2

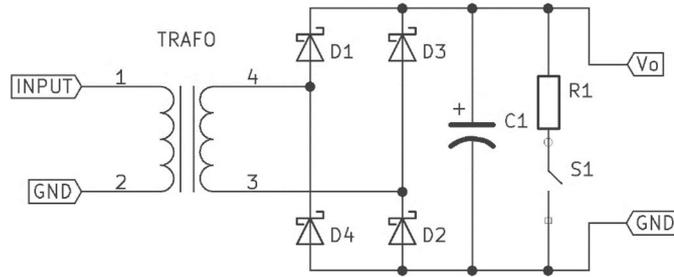


Figura 4: Convertidor CA-CC 3

En estos tres diseños la tensión de salida  $V_o$  se controla a partir de los interruptores, S1 y S2 en el caso del Convertidor CA-CC 1 y S1 en el Convertidor CA-CC 2 y 3. Las conmutaciones las genera el driver a partir de una señal PWM. Al variar el ancho de pulso de la señal PWM varía el valor de la tensión. Dependiendo del convertidor, al aumentar (disminuir) el ancho de pulso, la tensión  $V_o$  aumentará (disminuirá). En el proyecto se calcula el factor de servicio  $D$  con el tiempo  $t_{off}$  del interruptor.

Se ha estudiado la relación entre el factor de servicio, la corriente de entrada al transformador y la tensión de salida  $V_o$ . En la Figura 5 aparece representada la corriente  $I_1$  en función del factor de servicio  $D$  y la tensión de salida en el Convertidor CA-CC 2. Es una representación teórica para tener una idea de los valores necesarios del factor de servicio para mantener la tensión de salida constante ante las variaciones de la corriente. Para mantener  $V_o$  a 5V,  $D$  debe variar entre 0,25 y 0,52.

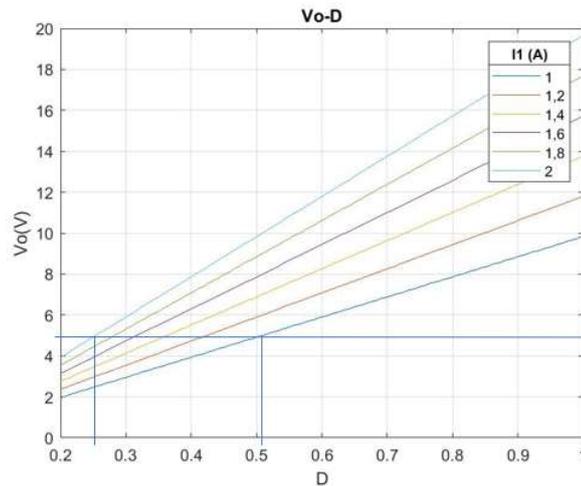


Figura 5: gráfica  $V_o$ - $D$  con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 2

### 3. Resultados

Para realizar los ensayos se conecta el transformador a la red con una resistencia variable para ajustar la corriente a la que se quiere trabajar. Mientras se pone el prototipo a trabajar se van tomando medidas de la tensión de salida del convertidor,  $V_o$ , la corriente del secundario del transformador,  $I_T$ , la corriente del rectificadora,  $I_3$ , la tensión del interruptor S1,  $V_{s1}$ , y el factor de servicio,  $D$ . Una vez se toman las medidas del ensayo se comparan con el comportamiento teórico o esperado. Así, se va a poder comprobar que el circuito funciona correctamente.

Se ensayan los tres convertidores diseñados previamente y resulta que el único convertidor que funciona correctamente es el Convertidor CA-CC 2. Por tanto, se descartan los otros dos convertidores se descartan y se construye el prototipo final con este convertidor.

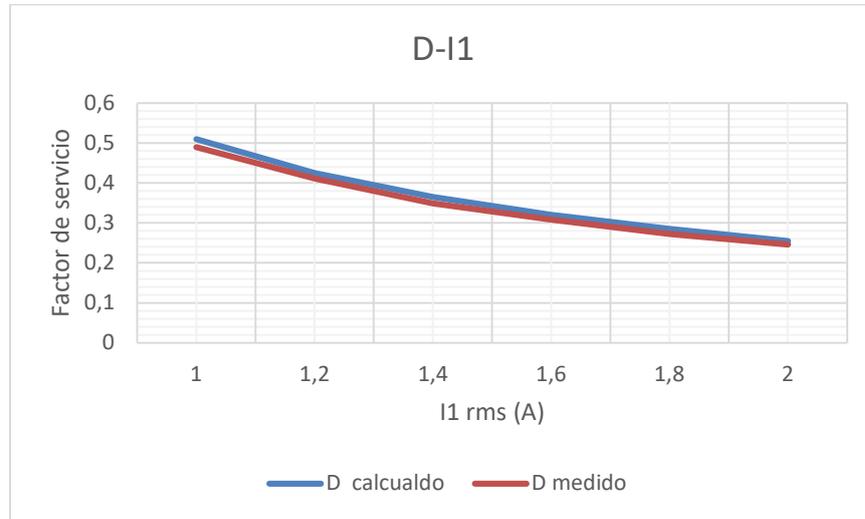


Figura 6: resultados del ensayo del Convertidor CA-CC 2

A partir de las medidas obtenidas al ensayar el Convertidor CA-CC 2 se compara con las medidas teóricas. En la Figura 6, en azul, están representados los valores a los que se ha ido ajustando D para mantener Vo a 5V. En rojo, aparecen los valores teóricos a los que hay que ajustar D para mantener Vo a 5V. El error que existe entre ambos es muy pequeño y se concluye que el comportamiento real se ajusta al comportamiento calculado.

Además, se comprueba que las formas de onda coinciden con las formas de onda esperadas en el diseño del prototipo. Efectivamente, en la Figura 7, aparece (en amarillo) la corriente senoidal del primario del transformador, I1, (en verde) la corriente rectificadora a la salida del rectificador, I3, (en azul) la tensión que cae en el interruptor, Vs1, y (en rosa) la tensión de salida del convertidor, Vo. La tensión de salida tiene 5V de valor medio, pero mantiene un rizado.

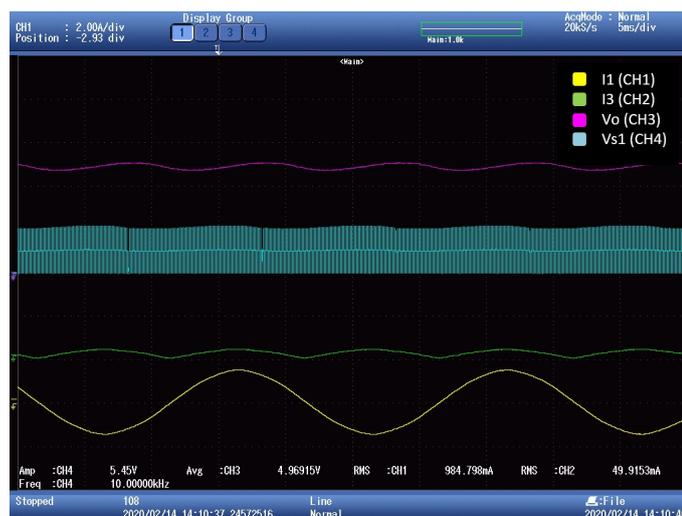


Figura 7: resultados del ensayo del Convertidor CA-CC 2

Después de añadir los convertidores U1 y U2 la tensión es continua de 3,3 y 5V (ver Figura 8).

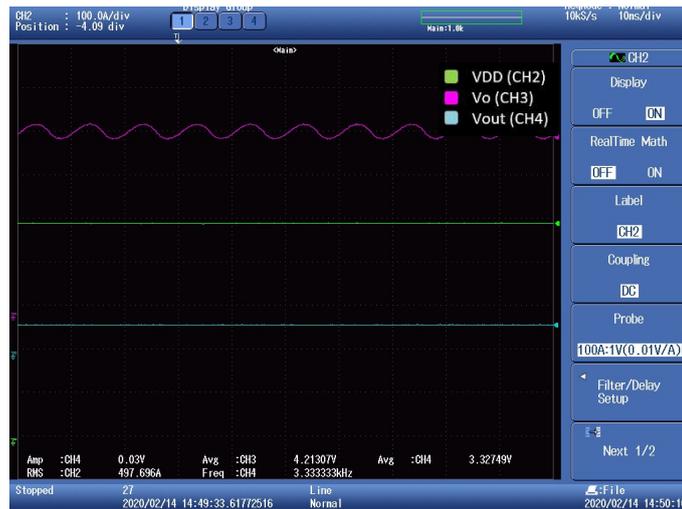


Figura 8: resultados del ensayo del Convertidor CA-CC 2

#### 4. Conclusiones

Se ha construido una fuente de alimentación de 3,3V a partir de la línea eléctrica. El prototipo construido proporciona una tensión de 3,3V y funciona ante variaciones en la corriente de entrada. Asimismo, tanto la salida final del prototipo, Vout, como la alimentación del driver U3, VDD, son señales continuas (ver Figura 8). Esto se debe a que la realimentación negativa que tienen los convertidores U1 y U2 eliminan los armónicos de la señal Vo.

El dispositivo de extracción de energía (el transformador) depende únicamente de la corriente que circula por la línea, por lo tanto, la fuente de alimentación se podría utilizar en líneas eléctricas de baja, media y alta tensión. En el ensayo la corriente que induce el prototipo es entre 1 y 2 A y la potencia entregada en el dispositivo se ve restringida por el convertidor conectado a la salida (U1). La potencia máxima que el prototipo puede entregar es de 6,6W [3].

## PROJECT SUMMARY

### 1. Introduction

This project presents the analysis, design and implementation of a prototype of a power source that harvest energy from the power line. This project starts from the idea of powering monitoring equipment for power lines that are in remote areas, places where there is no availability of a network connection point for powering sensors. Usually in these situations, batteries are used for powering sensors, but this solution increases the cost and requires a periodic replacement plan. Therefore, the aim of this project is to present a sustainable and simple alternative.

The alternative studied in the project is based on energy harvesting methods. Energy harvesting is defined as the conversion of ambient energy into a usable electric form [1], for example, through wind turbines or solar radiation. But for this project, only energy harvesting solutions from the power line will be studied.

In order to do so, the research was divided into capacitive and inductive energy harvesting methods. On one hand, the capacitive method is based on the electric field. The energy harvesting device works as a capacitive voltage divider and it does not depend on the amplitude of the load current. On the other hand, the inductive method uses the electromagnetic field to harvest energy. The electricity is obtained by electromagnetic induction. Nevertheless, the inductive method is selected for this project, discarding the capacitive method for reasons of safeness and difficulties when working with high voltages.

### 2. Circuit design

In this project we use a voltage transformer as an inductive device for energy harvesting, where the primary of the transformer is equivalent to the power line cable and the secondary is the set of coils wound to a core of ferromagnetic material laid on the line [2]. The power sources design for the project has one output, the output voltage,  $V_{out}$ , and two variables, the power line current and the output load. These two variables have an influence on the output voltage. In order to maintain  $V_{out}$  constant, it is necessary to add to the circuit element that controls the output.

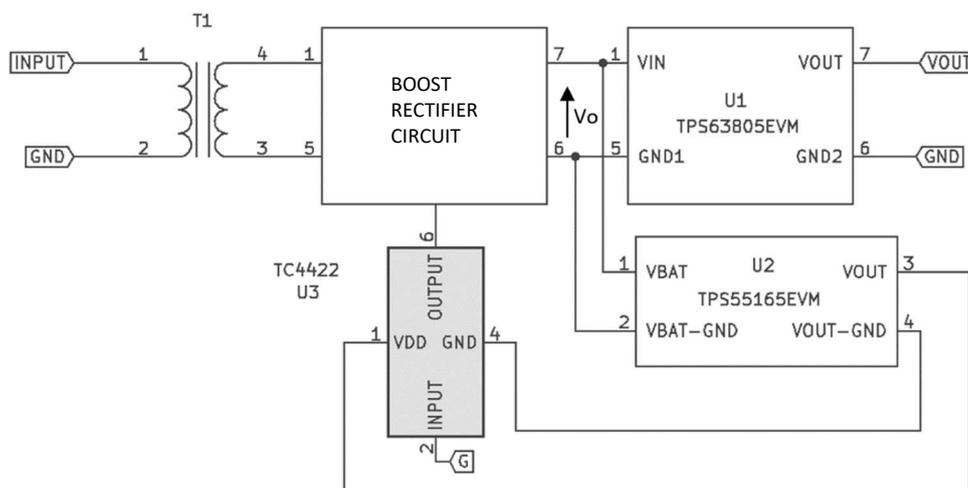


Figura 9

The proposal of the complete prototype (see Figura 9) is to extract energy from the power line making use of a voltage transformer. The current induced by the transformer flows through Boost Rectifier Circuit, where the current,  $I_l$ , it comes out as rectified signal. Furthermore, the boost rectifier circuit raises the value of  $V_o$  to 5V. This is done with one or more MOSFET switches. The circuit continues with a DC-DC converter, U1, that provides a continuous 3.3V output voltage,  $V_{out}$ . Due to U1, even if there is any variation in  $V_o$ ,  $V_{out}$  stays constant at 3.3V. Connected in parallel with U1, the DC-DC converter U2 is connected. U2 converter powers U3 driver, which is a driver that triggers the switches of the Boost Rectifier Circuit.

Different proposals arise in the design of the Elevator Rectifier Circuit. In any case, it is necessary to carry out two types of conversions. A CA-CC and a CC-CC conversion. It is possible to reduce the number of conversions to obtain a more efficient circuit. Different options are studied with one or more conversions:

- One conversion

The AC-DC Converter 1 performs a single conversion where it converts the current induced by the transformer into a DC current and raises the output voltage,  $V_o$ , value.

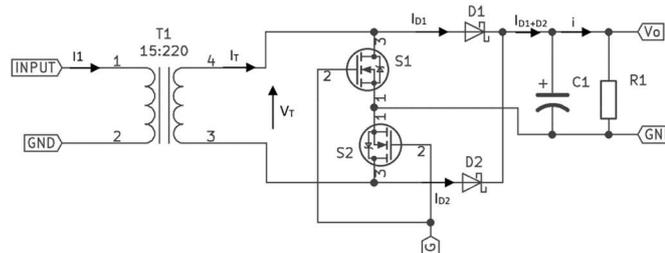


Figura 10: AC-DC 1 Converter

- Two conversions

A first conversion is made to convert the current,  $I_T$ , from AC to DC. In both circuits, a diode bridge will be used. After the rectification a second boost converter is added to control the output voltage. For this conversion there have been designed two different options: the AC-DC Converter 2 and the AC-DC Converter 3.

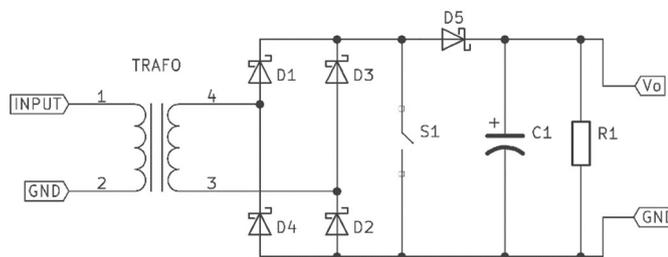


Figura 11: AC-DC 2 Converter

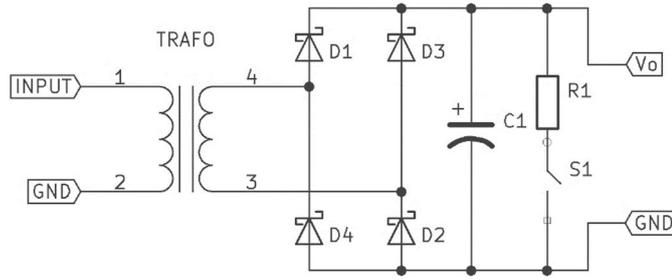


Figura 12: AC-DC 3 Converter

Common to these three designs, the output voltage,  $V_o$ , is controlled with switches, S1 and S2, in the case of the AC-DC Converter 1 and S1 in AC-DC Converter 2 and 3. The interruptions are generated by a PWM signal. By varying the pulse width of the PWM signal, the voltage value varies. It depends on the converter, that as the pulse width increases (decreases), the  $V_o$  voltage will increase (decrease). For this project, to calculate the duty cycle, D, we have used the toff time of the switches.

Within the design, the relation between the duty cycle, D, the input current,  $I_1$ , and the output voltage,  $V_o$ , of the circuit is studied. Figura 13 exposes the current,  $I_1$ , as a function of the duty cycle, D, and the output voltage on the AC-DC Converter 2. This graph is a theoretical representation to understand between what values the duty cycle varies in order to maintain  $V_o$  constant at 5V. Theoretically, D varies between 0.25 and 0.52.

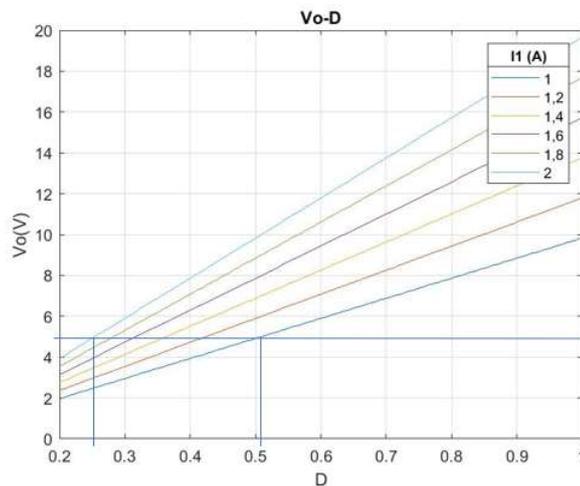


Figura 13

### 3. Results

In order to carry out the tests, the transformer is connected to the electrical outlet with a variable resistor to be able to adjust the current to different amplitude values. To prove the right performance of the circuit, measurements are taken of the output voltage of the converter,  $V_o$ , the current  $I_T$ , the current after the rectifier,  $I_3$ , the voltage of the switch S1,  $V_{s1}$ , and the duty cycle D. Once the test measurements are taken, they are compared with the theoretical or expected behaviour.

The three converters are tested during the project, but only AC-DC 2 Converter works properly. Therefore, the other two converters are discarded, and the final prototype is built with the AC-DC 2 Converter.

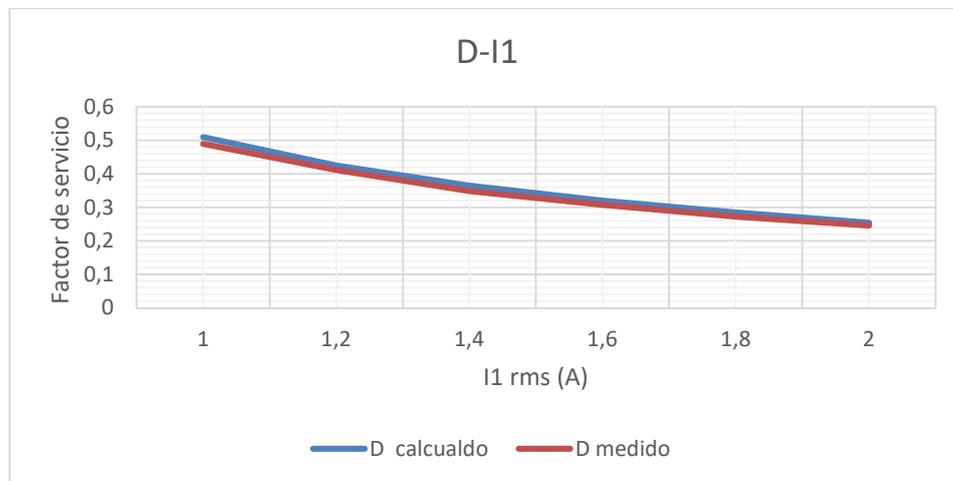


Figura 14

We compare the measurements obtained when testing the AC-DC Converter 2 to the theoretical values. In Figura 14, in blue, the values to which D has been adjusted to keep  $V_o$  at 5V are represented. In red, the theoretical values to which D must be adjusted to keep  $V_o$  at 5V. As shown in the graph, the error between both functions is very small and it is concluded that the real behavior fits the calculated behavior.

In addition, it is verified that the waveforms correspond with the waveforms expected in the prototype design. Indeed, Figura 15 shows the waveforms the sinusoidal current  $I_1$ , in green, the rectified current  $I_3$ , in blue the voltage that falls on the switch,  $V_{s1}$ , and, in pink, the output voltage of the converter  $V_o$ , that match with the simulated waveforms. The output voltage has 5V average value, with a ripple voltage.

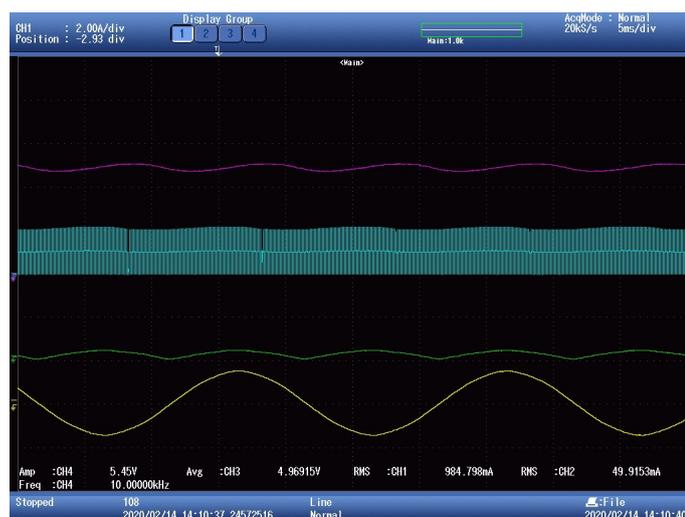


Figura 15

When adding U1 and U2 converters, the ripple voltage is discarded (see Figura 16).

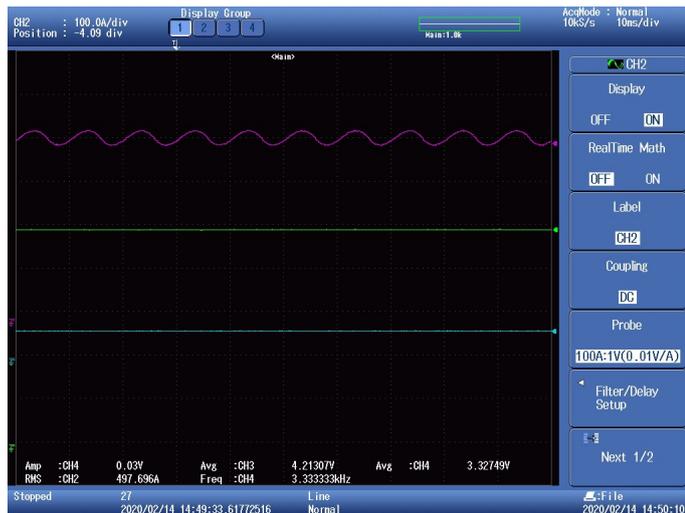


Figura 16

#### 4. Conclusions

A 3.3V power source has been built by energy harvesting from the power line. The prototype provides a voltage of 3.3V and has been proven to work correctly through variations in the input current. Likewise, both the final output of the prototype,  $V_{out}$ , and the power supply of the U3 driver, VDD, are continuous signals (see Figura 16) due to the negative feedback with what U1 and U2 work, that eliminates the harmonics of  $V_o$  signal.

The energy extraction device (the transformer) depends only on the current flowing through the line, therefore, the power supply could be used on low, medium and high voltage power lines. The current induced by the prototype is between 1 and 2 A and the power delivered from the power source is restricted by the converter connected to the output (U1). The maximum power that the prototype can deliver is 6.6W [3].

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

Red Eléctrica nació con una red de 10.500 km de líneas de alta tensión que hoy, más de 30 años después, se ha convertido en cerca de 44.000 km de líneas eléctricas [4]. Como menciona Red Eléctrica, el suministro de electricidad ha crecido notablemente en las últimas décadas. Se ha invertido en tecnología para crear una red extensa y segura. Y ahora la industria eléctrica se enfrenta a la electrificación masiva.

Las redes inteligentes o *smart grids* son un conjunto de nuevas tecnologías que nacen como respuesta a los problemas que no se pueden abordar desde las redes convencionales. Las redes inteligentes cuentan con los objetivos de diversificar las fuentes de generación de energía, optimizar los recursos, proporcionar una respuesta activa a la demanda y reducir la huella de carbono entre otros. Las redes inteligentes generan un cambio de paradigma en la industria eléctrica. Se trata de romper con la estructura jerárquica de las redes existentes y las barreras entre la generación, distribución y consumo como procesos independientes.

Los objetivos de las redes inteligentes son:

- Construir una red donde la generación de energía este distribuida
- Integrar nuevas fuentes de generación
- Una estructura bidireccional para la comunicación y funcionamiento
- Llevar el control de las redes

La transformación a las redes inteligentes radica en dotar de inteligencia a las redes actuales y el primer paso en esta transición consiste en añadir sensores para adquirir el control de las redes. Los nuevos equipos de monitorización permiten, entre otras cosas, tener el control sobre las líneas eléctricas en tiempo real, operar la red de manera óptima y tomar una acción preventiva o correctiva ante posibles fallos.

En zonas remotas, cuando no hay disponibilidad de un punto de conexión a red para los sensores, puede recurrirse a la alimentación por baterías, pero eso aumenta el coste y exige un plan de reemplazo periódico.

También surge la alternativa de utilizar métodos de “*energy harvesting*” para alimentar estos equipos. El término de “*energy harvesting*” hace referencia a la extracción de energía a partir del entorno, como puede ser a través de turbinas eólicas o de la radiación solar. Estas dos soluciones han sido las más estudiadas y ya se han utilizado para alimentar sensores en las líneas eléctricas. Sin embargo, presentan varias desventajas debido a que dependen del entorno, tienen una eficiencia baja y requieren del uso de baterías para almacenar energía [5].

En este proyecto únicamente se estudiarán soluciones de “*energy harvesting*” a partir de la propia línea eléctrica. Se cuenta con numerosos estudios de extracción de energía a través del campo eléctrico y magnético. Estos métodos presentan la ventaja de que se pueden instalar en la propia línea eléctrica y son soluciones robustas.

Durante el trabajo se analizarán algunas alternativas para extraer energía de la propia línea eléctrica, sin que resulten intrusivas en la línea.

---

## 2. MOTIVACIÓN

---

Dennis Gabor afirmó: *Tú no puedes predecir el futuro, pero puedes crearlo* [6]. El mundo se encuentra ante la cuarta revolución industrial o revolución tecnológica debido al gran impacto de las tecnologías de las comunicaciones y la información en la industria. La problemática que generan la electrificación masiva y el cambio climático deben estar presentes en las decisiones de hoy. La optimización de los recursos, la reducción de la huella de carbono y la eficiencia energética forman parte de los principales retos a los que se enfrenta la industria eléctrica.

En este trabajo se estudiarán alternativas que pueden dar una respuesta a las complicaciones que presenta alimentar instrumentación tendida en la línea eléctrica. Este estudio de “*energy harvesting*” a partir de una línea eléctrica se suma a la transformación que está ocurriendo en las redes eléctricas para hacer frente a los retos de hoy.

---

### 3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

---

El proyecto de fin de grado tiene por objetivo principal dar con una propuesta para alimentar los sistemas de monitorización en las líneas eléctricas de alta o media tensión, que, se encuentran situadas en lugares remotos, donde las alternativas convencionales dificultan y elevan el coste de estos sistemas.

El objetivo final del proyecto es el desarrollo de un ***Prototipo de una fuente de alimentación de 3,3V a partir de una línea eléctrica***. Para la consecución de dicho final objetivo se definen los siguientes objetivos:

1. Realización de un análisis teórico del problema de la alimentación de los sistemas de monitorización y de los métodos de extracción de energía en líneas eléctricas. Se llevará a cabo un análisis de las propuestas estudiadas por la comunidad científica para seleccionar una solución segura y sencilla que pueda estudiarse desde la universidad.
2. Diseño de una alternativa. En el problema planteado se extrae energía de corriente alterna (de la línea eléctrica) para ser transformada, a la salida de la fuente, en corriente continua a 3,3V. Se quiere crear un sistema flexible que responda de manera correcta a variaciones en la corriente de entrada para mantener la salida constante a 3,3V. Además, se pretende diseñar que el sistema sea seguro y que proteja los componentes de la fuente de alimentación ante la posibilidad de que la fuente se quede sin carga o que se produzca un cortocircuito en la salida.
3. Construcción de un prototipo que, a través de un método de “*energy harvesting*”, extraiga energía de la línea (para ensayar el prototipo se utilizará una toma a la red) y transforme la señal en una tensión continua y constante de 3,3V.

---

## 4. ESTADO DEL ARTE

---

El Estado del Arte se centra en estudiar alternativas de extracción de energía que utilizan la propia línea eléctrica como fuente y el campo electromagnético como medio. El estudio se ha dividido en “*energy harvesting*” capacitiva e inductiva.

Aunque las alternativas de extracción de energía por medio del campo electromagnético proporcionan poca potencia, el proyecto va dirigido a alimentar sensores y otros equipos, y estos consumen entorno a los milivatios de potencia, la potencia limitada que se extrae es suficiente para abastecerlos. Estos equipos de extracción de energía también son capaces de operar con las fluctuaciones que ocurren comúnmente en la corriente que circula por las líneas.

### 4.1. MÉTODO CAPACITIVO

En esta sección se estudia la extracción de energía únicamente a través del campo eléctrico. Para este caso es necesario que las líneas eléctricas sean CA. Sin embargo, a diferencia de los métodos inductivos, para extraer energía los valores de la corriente que circula por la línea son indiferentes [1]. También cabe mencionar que las soluciones que ofrece el campo eléctrico son pequeñas en tamaño y sencillas de instalar.

El dispositivo que proponen [1] y [7], utilizando el método capacitivo, consiste en suspender un tubo, en la línea eléctrica, que es el *Energy Harvesting Tube* de la Figura 17. El funcionamiento de este dispositivo se fundamenta en utilizar un divisor de tensión entre la línea eléctrica y la tierra para extraer energía. Al colocar el tubo alrededor de la línea, este se comporta como un condensador, siendo el tubo un electrodo. Se consigue tener una capacidad,  $C_{ct}$ , entre la línea eléctrica y la pared interior del tubo y otra capacidad diferente,  $C_{tg}$ , entre la pared exterior del tubo y la tierra, siendo esta la capacidad del aire.

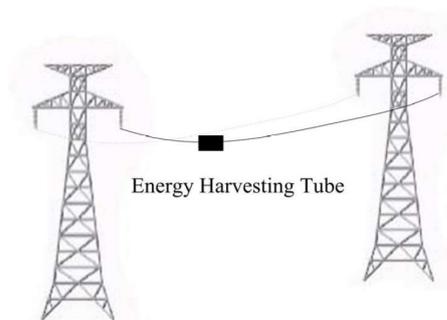


Figura 17: representación del condensador flotante [1]

Con la topología definida se obtiene el esquema equivalente representado en la Figura 18. El dispositivo se reduce a tener dos condensadores conectados en serie, formando un divisor de tensión capacitivo. Entre la línea y tierra existe una diferencia de potencial ( $U_0$ ), el valor de la tensión a la que trabaja la línea, y en el condensador  $C_{ct}$  hay una tensión  $U$ , donde se coloca la carga (*Impedance of the circuit*). La relación entre  $U_0$  y  $U$  aparece en (3). Según los parámetros del tubo se consigue una capacidad u otra.

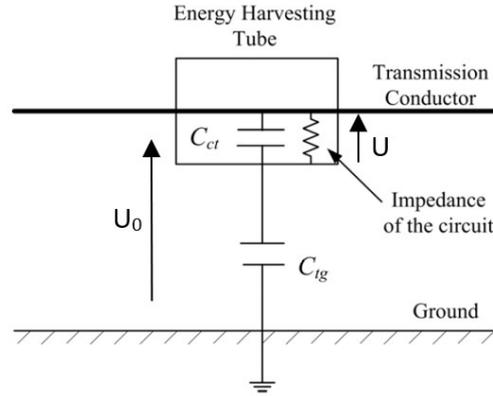


Figura 18: esquema equivalente del divisor de tensión capacitivo [1]

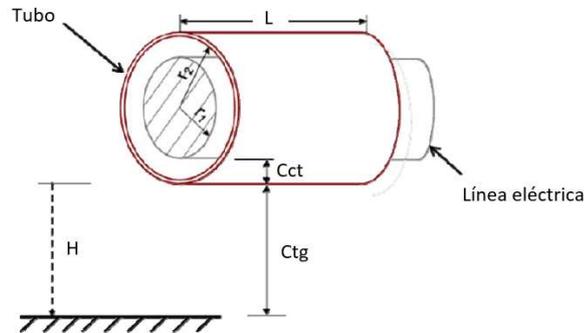


Figura 19: representación del condensador flotante entre la línea eléctrica y el suelo

$C_{ct}$  es la capacidad del condensador instalado en la línea (el interior del tubo) y  $C_{tg}$  es la capacidad del condensar entre el tubo y la tierra (el aire). A partir de las siguientes ecuaciones se calculan las capacidades de cada condensador:

$$C_{ct} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\frac{r_1}{r}} \quad (1)$$

$$C_{tg} = \frac{2\pi\epsilon L}{\ln\frac{2H}{R_2}} \quad (2)$$

En (1)  $R_1$  es el radio interior del tubo,  $L$  es la longitud del tubo,  $\epsilon$  es la permitividad del material y  $r$  el radio del cable. En (2)  $R_2$  es el radio exterior del tubo,  $H$  es la distancia del cable a tierra y  $\epsilon$  es la permeabilidad del aire. Por ejemplo, en la literatura [1] se diseña un tubo con las siguientes medidas:  $R_1=0,15$ ,  $R_2=0,16$ ,  $H=20\text{m}$  y  $L=0,55\text{m}$ .

La expresión de la tensión a la entrada de la carga es:

$$U = \frac{U_0}{\sqrt{3}} \frac{C_{tg}}{C_{ct} + C_{tg}} \quad (3)$$

Las desventajas que presenta este método de extracción de energía es que en cada lugar la estructura de la línea es distinta y varían factores como el radio de cable (dependiendo de la carga que transporte), la distancia del cable al suelo... y, sin embargo, estos parámetros deben

tenerse en cuenta a la hora de diseñar el tubo. Este método se descarta para llevar a cabo el prototipo por motivos de seguridad y complejidad de trabajar con tensiones tan elevadas.

#### 4.2. MÉTODO INDUCTIVO

La inducción electromagnética es el fenómeno que origina una tensión debido a un campo magnético variable. En el caso específico de la línea eléctrica, por el conductor circula una corriente que produce un campo magnético a su alrededor. La corriente varía al ser alterna y el campo magnético también cambia, produciendo un flujo magnético variable. A partir del campo magnético, con un transformador, se puede inducir una tensión.

En la Figura 20 se muestra un ejemplo de cómo el transformador induce una tensión de la línea. En la línea, equivalente al primario del transformador, se ha colocado un núcleo de material ferromagnético donde se concentran las líneas del campo que genera el conductor (la línea). Entorno al núcleo se encuentran unas espiras enrolladas, equivalentes al secundario del transformador. A través del campo concentrado en el núcleo las espiras inducen una fuerza electromotriz,  $E_2$ .

La forma o material del núcleo del transformador pueden variar dependiendo del diseño, pero el principio de funcionamiento es siempre el mismo. La Figura 20 es una primera opción de un equipo de extracción de energía por inducción.

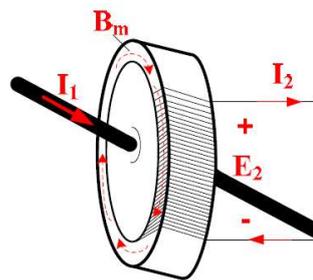


Figura 20: representación de la estructura del equipo de "energy harvesting" [5]

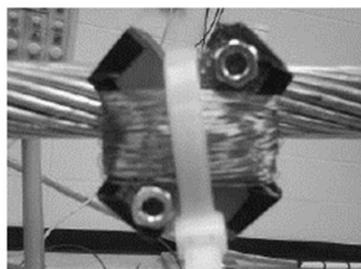


Figura 21: imagen de un equipo de "energy harvesting" por inducción [2]

La Figura 21 es una segunda alternativa a la extracción de energía por inducción. Como se ha explicado antes, el fenómeno de inducción es el de un transformador. Este es un ejemplo donde la forma del núcleo varía. Ambos equipos tienen el esquema equivalente de la Figura 22.

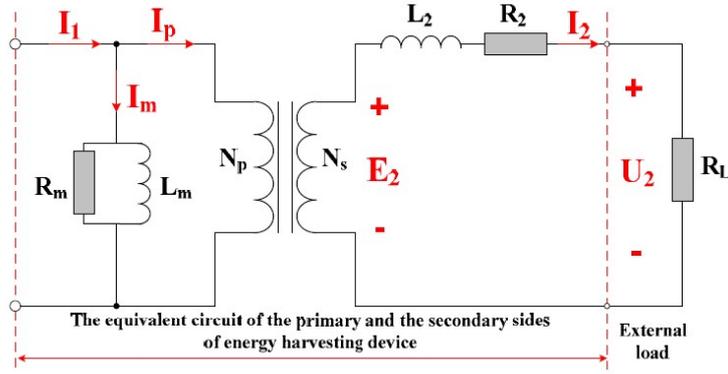


Figura 22: esquema equivalente al equipo de “energy harvesting” [5]

$I_1$  es la corriente en el lado primario del transformador que es la corriente que circula por el cable.  $I_m$  es la corriente de magnetización.  $N_p$  y  $N_s$  representan el número de espiras en el primario y en el secundario respectivamente.  $I_2$  es la corriente que circula por el secundario, la corriente que circula por las espiras.  $E_2$  es la tensión inducida en el secundario y  $U_2$  la tensión que ver la carga externa al transformador.

Las ecuaciones equivalentes:

$$I_1 - I_m = I_p \quad (4)$$

$$I_p N_p = I_2 N_s \quad (5)$$

Nota: para los cálculos realizados en el proyecto se desprecia la corriente de magnetización, equivalente a trabajar con un transformador ideal, y la relación de transformación será la siguiente:

$$I_1 N_p = I_2 N_s \quad (6)$$

Esta propuesta ofrece un modelo eficiente y con alta estabilidad que es capaz de adaptarse a las fluctuaciones comunes que ocurren en la corriente que circula por la línea eléctrica. Asimismo, se trabaja con corriente alterna y con una tensión muy baja en el secundario. A causa de ello, es necesario diseñar un circuito posterior al equipo de extracción de energía. El circuito debe contener un convertidor rectificador, para operar con corriente continua, y un convertidor *buck-boost* en caso de que sea necesario elevar o reducir la señal.

Para unificar todo el equipo de extracción de energía, surge la opción de añadir un tubo que sujete todo el circuito. La Figura 23 representa una sección transversal del tubo, Harvester Tube, que sujeta el circuito. Todo el tubo trabaja a un mismo potencial. El tubo sujeta el transformador y circuito electrónico a la vez de ser un GND común. El primario del transformador se conecta entre la línea y el tubo y el secundario del transformador se conecta directamente al resto del circuito.

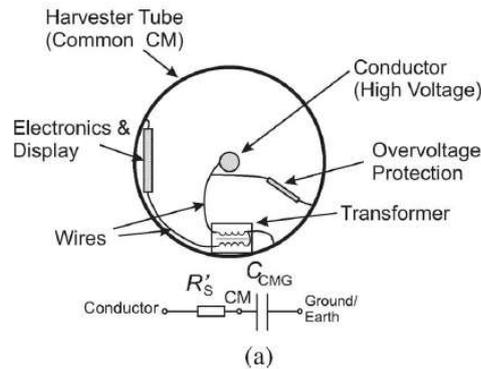


Figura 23: representación transversal del tubo [8]

Para el diseño del circuito electrónico surgen de nuevo varias propuestas. Es necesario llevar a cabo dos tipos de conversiones. Una conversión CA-CC y otra CC-CC. Cabe la posibilidad de reducir el número de conversiones para obtener un circuito más eficiente. En todo caso, se estudian distintas opciones con una o más conversiones.

Propuestas para los convertidores:

- Una única conversión

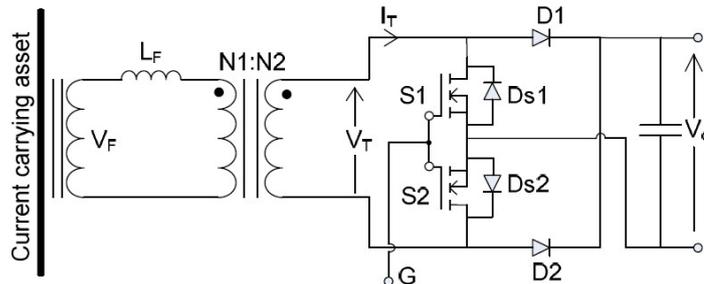


Figura 24: esquema del circuito: Convertidor CA-CC 1, con una conversión [2]

La Figura 24 representa un convertidor que en una única conversión convierte la señal de corriente alterna a corriente continua y eleva la tensión de salida,  $V_o$ . Se hace uso de un interruptor bidireccional (S1 y S2) donde S1 y S2 cambian de estado simultáneamente. Cuando los interruptores S1 y S2 están en ON el convertidor cortocircuita el secundario del transformador. Cuando S1 y S2 están en OFF los diodos D1 o D2 conducen, en función de la dirección de la corriente. Mientras el diodo D1 conduce también conduce Ds2 y cuando conduce D2, también conduce Ds1. De esta manera, el convertidor transfiere energía del transformador a la carga.

Con el disparo de S1 y S2, se puede controlar la tensión a la salida del circuito ( $V_o$ ). Para este convertidor es necesario utilizar interruptores MOSFET porque contienen un diodo parásito (Ds1 y Ds2). En definitiva, este convertidor es el equivalente a utilizar un puente rectificador con interrupciones simultáneamente.

- Dos conversiones:

Se realiza una primera conversión para pasar de CA a CC. En todos los casos se va a utilizar un puente de diodos. Tras la rectificación se añade un segundo

convertidor elevador para controlar la tensión de salida. Para este convertidor pueden usarse distintas opciones.

Además del circuito de la Figura 24 ,para este proyecto se estudian las opciones de la Figura 25 y la Figura 26. En ambos casos la conversión de elevar o reducir la tensión la realiza el interruptor S1.

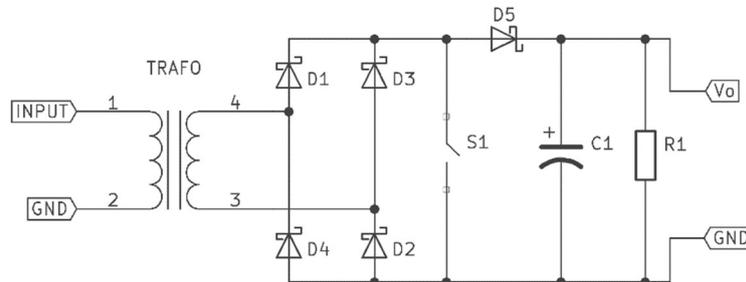


Figura 25: esquema del circuito: Convertidor CA-CC, 2 de un circuito con un puente rectificador y un convertidor reductor-elevador

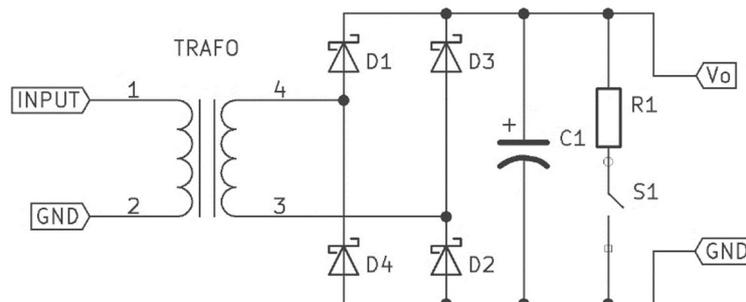


Figura 26: esquema del circuito: Convertidor CA-CC 3 de un circuito con un puente rectificador y un convertidor reductor-elevador

#### 4.3. PROPUESTA DE PROTOTIPO

Para el ensayo de del prototipo se descarta el método capacitivo por razones de seguridad y compatibilidad en el laboratorio debido a las altas tensiones. Por lo tanto, se utilizará un transformador para inducir una tensión de la línea eléctrica.

La propuesta del prototipo (ver Figura 27) contiene un transformador (T1) conectado a la línea, un circuito rectificador elevador, un convertidor CC-CC (U1) [3] con una salida constante  $V_{OUT}=3,3V$ , un convertidor CC-CC (U2) [9] con una salida constante de 5V y un driver para MOSFETs. Estos convertidores (U1 y U2) se añaden para garantizar una salida constante de 3,3V. En esta figura no se especifica el circuito rectificador elevador puesto que hay tres opciones que se van a estudiar: Convertidor CA-CC 1, Convertidor CA-CC 2 y Convertidor CA-CC 3.

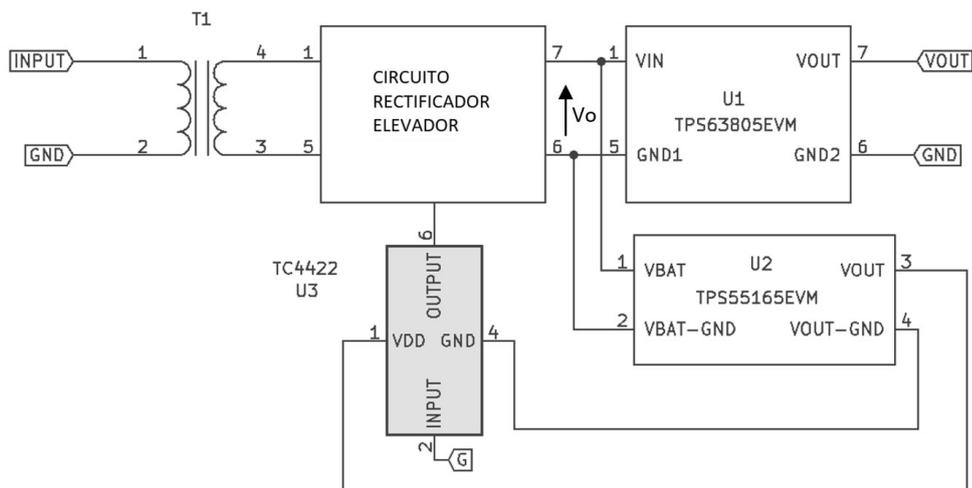


Figura 27: Esquema del circuito completo del prototipo a construir

La tensión de  $V_o$  varía debido a dos variables. La primera es la corriente de entrada del transformador. Si aumenta (disminuye) la corriente inducida aumentará (disminuirá)  $V_o$ . La segunda variable es la carga conectada a la salida. Para mantener  $V_o$  constante frente a las variaciones de la corriente y de la carga, se regula  $V_o$  controlando las conmutaciones de los interruptores de los convertidores CA-CC. En este proyecto, para el estudio de los convertidores, se fijará la carga y se trabajará únicamente con variaciones en la corriente.

A partir de este diseño se podrá garantizar una tensión de salida ( $V_{OUT}$ ) constante ante pequeñas variaciones que puedan ocurrir en la entrada del convertidor U1.

En los próximos capítulos se llevará a cabo un análisis teórico de las soluciones propuestas junto a su simulación, la elección de la topología a emplear y el montaje y puesta a punto del prototipo. En el **Capítulo 2** se analizará el diseño del circuito completo (ver Figura 27) y el primer circuito rectificador elevador, Convertidor CA-CC 1, (ver Figura 24). En el **Capítulo 3** se analizará el Convertidor CA-CC 2 y el Convertidor CA-CC (ver Figura 25 y Figura 26). En el **Capítulo 4** se lleva a cabo la Elección de la Topología, incluyendo un breve análisis de los semiconductores de potencia. Finalmente, en el **Capítulo 5** se expondrán los Resultados Obtenidos y las Conclusiones. Además, el documento incluye un **Anexo I** de Presupuestos y un **Anexo II** de los Objetivos de Desarrollo sostenible.

# CAPÍTULO 2

## DISEÑO CONVERTIDOR CA-CC 1

## 1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se muestra el primer prototipo diseñado para el proyecto (ver Figura 28). El circuito consta de:

- Un transformador de tensión (T1)  
La puesta a punto de cada uno de los prototipos se realizará conectando el transformador a la red y ensayando los dispositivos con una corriente del primario de entre 1 y 2 A de valor eficaz. Para poder ensayar el dispositivo se utiliza una relación de transformación 15:220.
- Convertidor CA-CC 1
- Convertidor CC-CC TPS63805EVM (U1)  
Es un convertidor elevador-reductor. Admite una entrada VIN entre 1,3 y 5,5V y obtiene una salida VOUT de 3,3 V. Este convertidor se utiliza para asegurar que la tensión a la salida de la fuente de alimentación sea siempre 3,3V, aunque ocurran pequeñas variaciones en estados anteriores.
- Convertidor CC-CC TPS55165EVM (U2)  
También es un convertidor reductor-elevador. En este caso el convertidor admite una entrada VBAT de 2 a 36V y proporciona una salida de 5V. Este convertidor se utiliza para alimentar a el driver (U3).
- Driver TC4422 (U3) [10]  
Es el driver de un MOSFET. Se utiliza para transmitir la señal a los MOSFETs S1 y S2. La tensión de alimentación, VDD, debe ser entre 4,5 y 18V, en este caso específico se alimentará a 5V. Por el INPUT entra una señal cuadrada G con un determinado factor de servicio. El factor de servicio se modifica para ajustar la tensión de salida Vo.

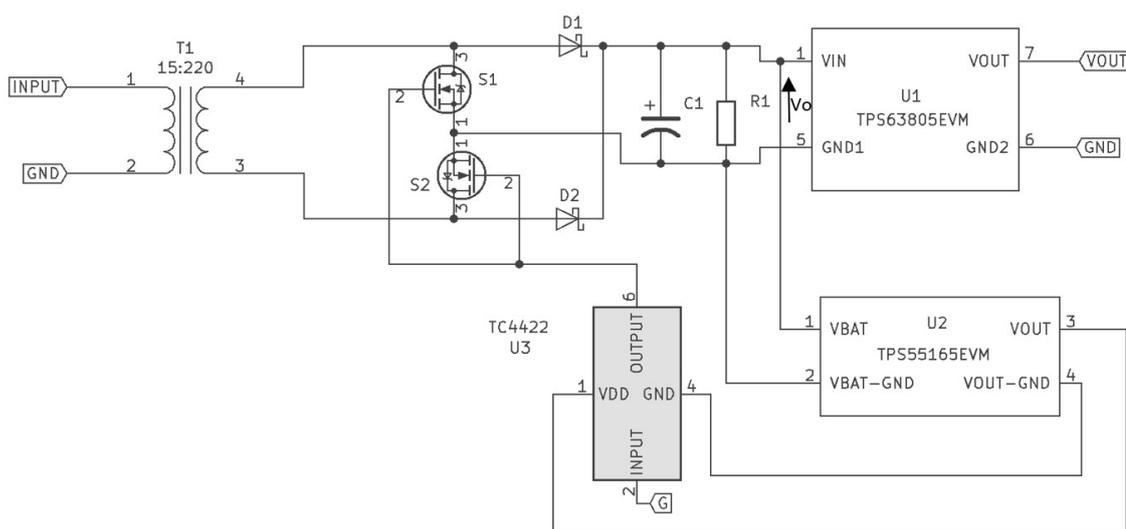


Figura 28: Esquema del prototipo completo con el Convertidor CA-CC 1

---

## 2. CONVERTIDOR CA-CC 1

---

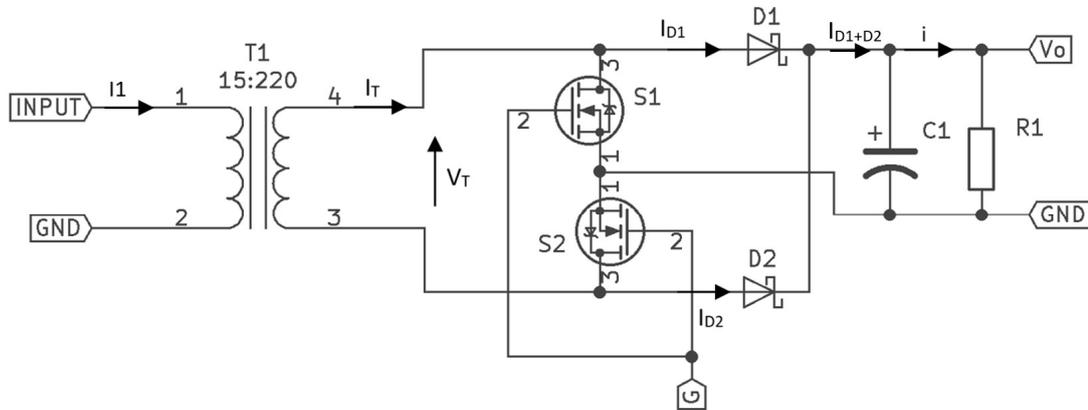


Figura 29: esquema del Convertidor CA-CC 1 conectado al transformador

En la Figura 29 puede verse el Convertidor CA-CC 1. En este circuito se ha reducido el número de conversiones para dar con un convertidor más eficiente y rápido. Esto quiere decir que en una única conversión este dispositivo convierte la señal de corriente alterna a corriente continua y eleva o reduce la tensión  $V_o$  según sea necesario.

La topología del circuito cuenta con interruptor bidireccional (S1 y S2) y dos diodos (D1 y D2). El interruptor bidireccional está compuesto por dos transistores MOSFETs. Estos transistores tienen cada uno un diodo "parásito" (Ds1 y Ds2). Con estos componentes el convertidor cuenta con un rectificador de onda completa, los cuatro diodos, y con un convertidor elevador, el interruptor bidireccional.

Los MOSFETs se encienden y apagan simultáneamente. Cuando los interruptores están en ON se cortocircuita el transformador. Cuando los interruptores están en OFF los diodos Ds1, Ds2, D1 y D2 conducen, según la dirección de la corriente, y la energía se transfiere desde el transformador a la carga funcionando como un puente rectificador convencional.

El circuito pasa por cuatro estados (ver Figura 30):

- Modo 1 (la corriente por el transformador es positiva y S1 y S2 están en ON): el rectificador cortocircuita el secundario del transformador. No circula corriente por la carga (*Resistive load*).
- Modo 2 (la corriente por el transformador es positiva y S1 y S2 están en OFF): los diodos D1 y Ds2 conducen.
- Modo 3 (La corriente por el transformador es negativa y S1 y S2 están en ON): el rectificador cortocircuita el secundario del transformador. No circula corriente por la carga (*Resistive load*).
- Modo 4 (La corriente por el transformador es negativa y S1 y S2 están en OFF): los diodos D2 y Ds1 conducen.

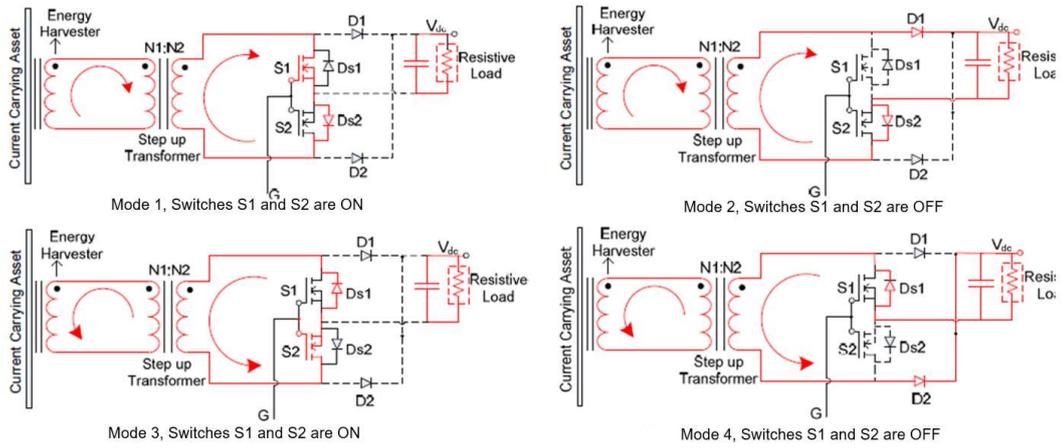


Figura 30: funcionamiento del convertidor del circuito 1 [2]

## 2.1 FORMAS DE ONDA

El Convertidor CA-CC 1 se controla a través de los interruptores. Los interruptores se encienden o apagan a partir de una señal PWM (G). Al modificar el factor de servicio D (7) de la señal G se modifica la tensión de salida  $V_o$ .

$$D = 1 - \frac{t_{ON}}{T} \quad (7)$$

Si aumenta o disminuye D,  $V_o$  aumentará o disminuirá respectivamente.

En la Figura 31 aparecen representadas las formas de onda del Convertidor CA-CC 1. Se aprecian las conmutaciones que realizan los interruptores. En la primera gráfica se muestran los comportamientos de la tensión y la corriente a la salida del secundario ( $V_T$  y  $I_T$ ).  $V_T$  se vuelve nula cada vez que se cortocircuita el secundario del transformador. En la segunda gráfica aparecen la corriente que circula por cada diodo ( $I_{D1}$  e  $I_{D2}$ ) y se observa la onda rectificada.

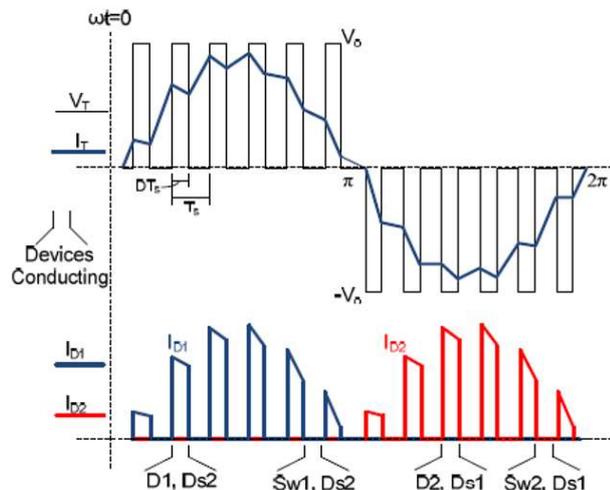


Figura 31: formas de onda  $I_T$ ,  $I_{D1}$ ,  $I_{D2}$  y  $V_T$  para un factor de servicio dado [2]

## 2.2. RELACIÓN ENTRE VO E I1

Se calcula el valor de la tensión de salida ( $V_o$ ) en función de la corriente de entrada del transformador (I1).

Corriente en el secundario del transformador:

$$I_T = \frac{15I_1}{220} \quad (8)$$

Corriente de carga media:

$$\langle i \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_T^p D \sin(\alpha) d\alpha = \frac{1}{\pi} I_T^p D [1 + 1] = \frac{2I_T^p}{\pi} D = \frac{15}{220} \frac{2I_1^p}{\pi} D \quad (9)$$

Tensión media de carga:

$$V_o \approx 0.9 I_{t2}^{rms} R_1 D = \frac{15}{220} 0.9 I_1^{rms} R_1 D \quad (10)$$

La carga se fija para que a un factor de servicio  $D=0,5$  la tensión a la salida sea  $V_o=5V$ .

Valor de la carga a la salida:

$$R_1 \approx \frac{V_o}{0.9 I_{t2}^{rms} D} = \frac{5}{0.9 \times \frac{15}{220} \times 0.5} = 163 \Omega \approx 160 \Omega \quad (11)$$

## 2.3. CÁLCULO DEL FILTRO A LA SALIDA DEL RECTIFICADOR

A la salida del rectificador se conecta el condensador C1 en paralelo con la carga R1 (ver Figura 29). El condensador se encarga de filtrar la corriente de salida para obtener una tensión parecida a una tensión continua.

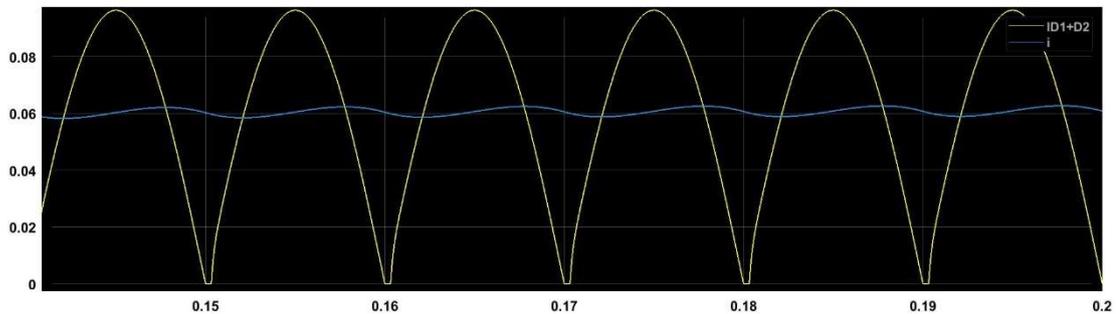


Figura 32: formas de onda de la corriente de carga media  $i$  (azul) y la corriente  $I_{D1+D2}$  (amarillo) con un factor de servicio  $D = 0$

La corriente rectificadora ( $I_{D1+D2}$ ) es una señal de doble onda. Cuando  $I_{D1+D2}$  decrece por debajo de la corriente media de carga ( $i$ ), el condensador se descarga a través de la carga R1 y la corriente  $i$  disminuye. La corriente  $i$  decrece exponencialmente con una constante de tiempo

R1C1 hasta que  $I_{D1+D2}$  crece por encima de  $i$  y el condensador se vuelve a cargar (ver Figura 32).

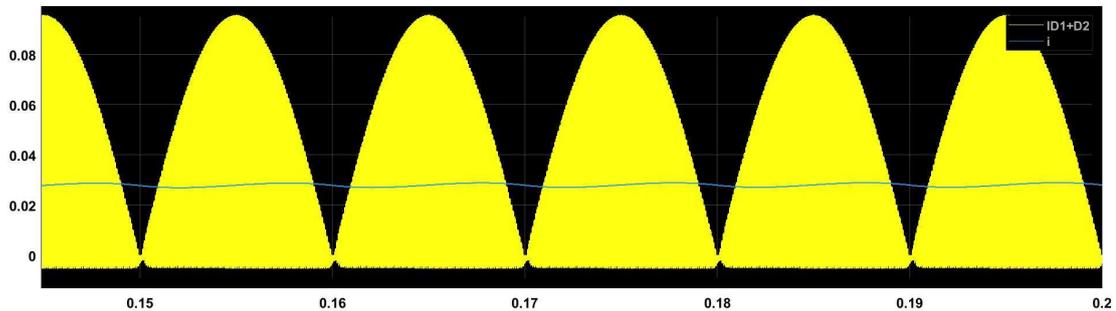


Figura 33: formas de onda de la corriente de carga media  $i$  (azul) y la corriente  $I_{D1+D2}$  (amarillo) con un factor de servicio  $D = 0,5$

En la Figura 32 los dos interruptores del convertidor están apagados ( $D = 0$ ) y el transformador nunca se cortocircuita. En la Figura 33 se ha utilizado un factor de servicio  $D = 0,5$ , quiere decir que los interruptores conmutan y que la corriente es  $I_{D1+D2}$  nula la mitad del tiempo. Aun así, el fenómeno del condensador es el mismo, aunque el valor de  $i$  se ha reducido a la mitad.

Dependiendo de la capacidad del condensador disminuirá en mayor o menor medida el rizado de la tensión de salida ( $V_o$ ) debido a que se reduce el rizado de la corriente  $i$ . Cuanto más grande sea la capacidad del condensador tarda más tiempo en descargarse y la variación de  $V_o$  es menor. Se utiliza la siguiente aproximación para calcular la amplitud del rizado en función de la capacidad del condensador. Para la aproximación se supone que la impedancia del condensador a  $Z_{C1}(2\omega)$  es mucho más pequeña que la impedancia de la resistencia ( $R1$ ) y que la mayor parte de la corriente  $I(2\omega)$  circula por el condensador. La expresión adecuada para calcular la tensión del rizado puede verse en (14).

Entonces, una aproximación para calcular el valor de la tensión del segundo armónico:

$$V_o(2\omega) \approx \frac{I_1^p(2\omega)}{2\omega C} \quad (12)$$

Se utiliza un condensador de capacidad  $C=220\mu\text{F}$ . Se restringe el valor máximo de la capacidad del condensador debido a que utilizar una capacidad provocaría un transitorio de arranque del circuito muy lento. Con la capacidad utilizada no se obtiene una señal completamente continua, pero se atenúa en gran medida el rizado.

#### 2.4. TENSIÓN DE SALIDA ( $V_o$ ) EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE SERVICIO ( $D$ )

En la Figura 34 aparece la relación entre la tensión de salida ( $V_o$ ) y el factor de servicio ( $D$ ) para distintos valores de la corriente primaria del transformador ( $I_1$ ). Para mantener una salida de  $V_o = 5\text{V}$  con variaciones en la corriente de entrada habrá que ir regulando  $D$ . Según

la gráfica mostrada, Figura 34, para una variación en la corriente de entrada entre 1 y 2 A habrá que variar el factor de servicio entre 0,255 y 0,51.

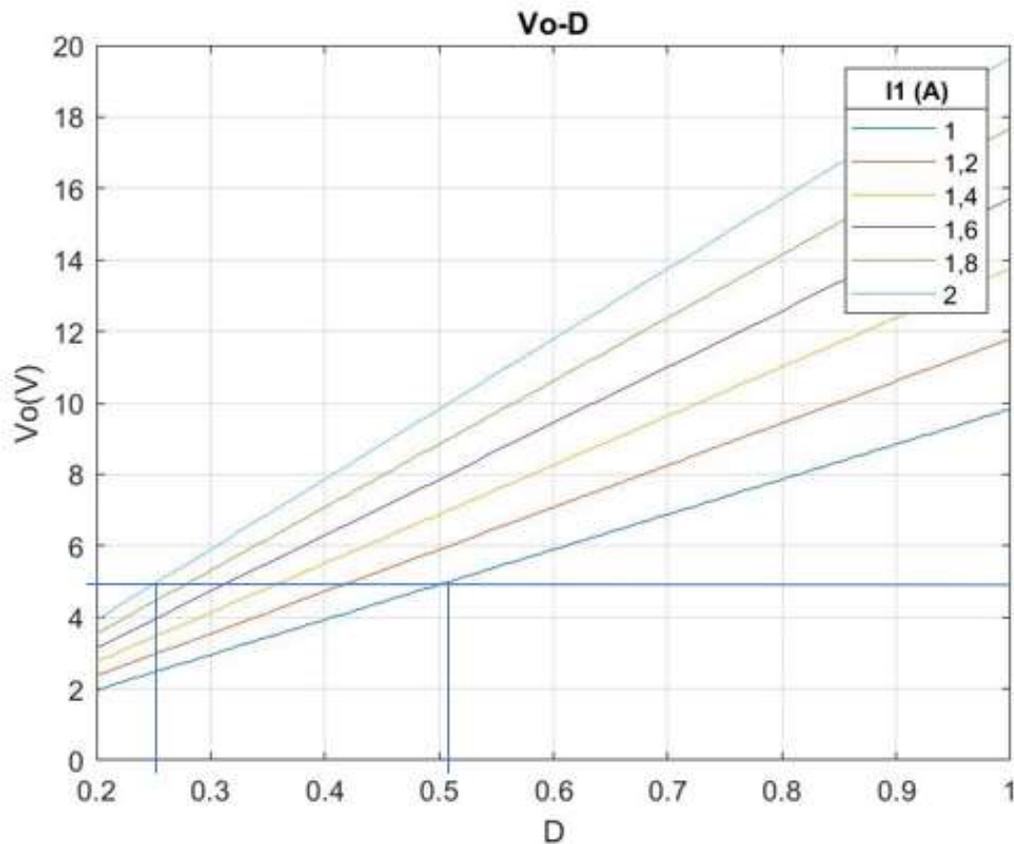


Figura 34: gráfica  $V_o$ - $D$  con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 1

| Convertidor CA-CC 1 |       |           |
|---------------------|-------|-----------|
| $I_1$ rms (A)       | D     | $V_o$ (V) |
| 1                   | 0,51  | 5         |
| 1,2                 | 0,425 | 5         |
| 1,4                 | 0,365 | 5         |
| 1,6                 | 0,32  | 5         |
| 1,8                 | 0,285 | 5         |
| 2                   | 0,255 | 5         |

Tabla 1

Tabla de los valores calculados del Convertidor CA-CC 1. En la *Tabla 1* aparecen los valores a los que habría que ajustar el factor de servicio si el valor de  $I_1$  variase entre 1 y 2A para mantener la tensión  $V_o$  constante a 5V. Puede observarse en (12) que si aumenta la corriente  $I_1$  debe disminuir el factor de servicio.

---

### 3. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR CA-CC 1

---

A través de la herramienta de Matlab y Simulink R2019a se simula el Convertidor CA-CC 1 con el equipo de “energy harvesting” (ver Figura 29).

#### 3.1. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR CA-CC 1 $I_1=1A$ , $D=0,5$

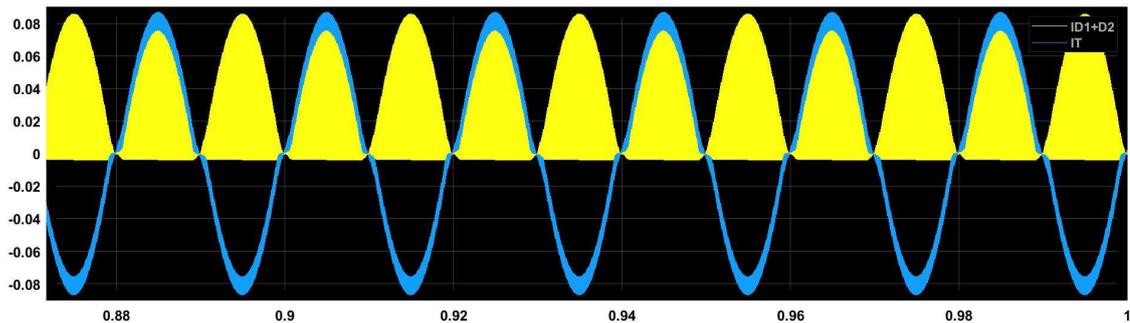


Figura 35: simulación del Convertidor CA-CC 1. Formas de onda de (azul) la corriente a la salida del secundario del transformador,  $I_T$  y (amarillo) la corriente rectificadora  $I_{D1+D2}$

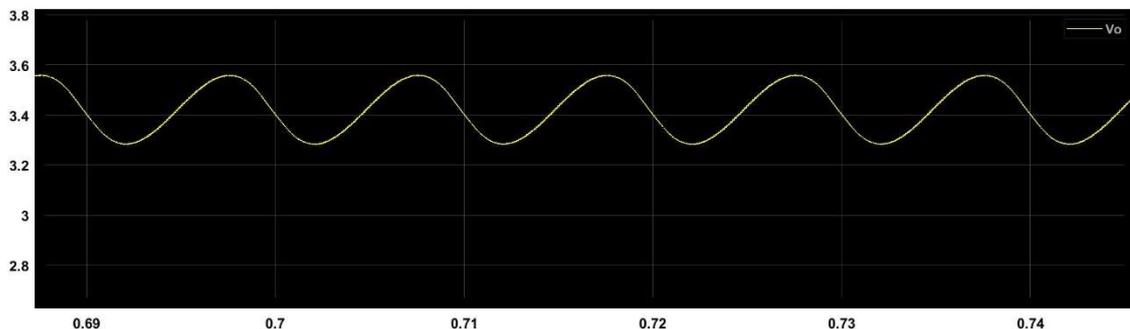


Figura 36: simulación del Convertidor CA-CC 1. Forma de onda de la tensión de salida  $V_o$

En la Figura 35 aparecen simuladas la corriente secundaria del transformador ( $I_T$ ) y la corriente rectificadora  $I_{D1+D2}$  del Convertidor CA-CC 1. En la Figura 36 aparece la tensión de salida ( $V_o$ ). La simulación coincide con lo esperado.  $I_{D1+D2}$  es una señal de doble onda rectificadora de la señal  $I_T$ . Se aprecian las conmutaciones que realizan los interruptores en  $I_{D1+D2}$  porque cuando los interruptores están activados la corriente  $I_T$  circula por el secundario del transformador  $I_{D1+D2}$  se anula. La tensión  $V_o$  no es constante y se debe a que la capacidad del condensador seleccionada para el circuito no termina de eliminar el rizado.

Los interruptores conmutan a una frecuencia de 12kHz. En la Figura 37 se representa la forma de onda de la tensión del secundario del transformador  $I_T$ . En esta figura también se pueden apreciar las conmutaciones que realizan los interruptores. Cuando los interruptores están activados el transformador se cortocircuita y la tensión pasa a ser nula. En la gráfica inferior de la figura se observa la señal cuadrada debida a cada conmutación de los interruptores. Si se modificase el factor de servicio cambiaría el ancho de pulso de la señal.

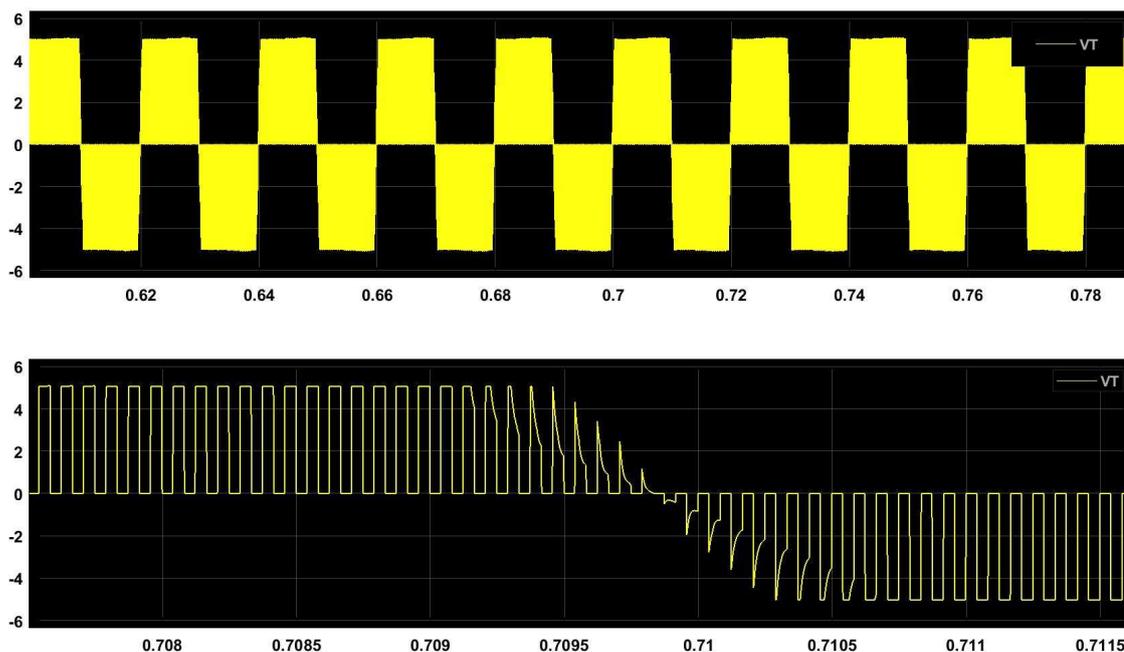


Figura 37: simulación del Convertidor CA-CC 1. Forma de onda de la tensión a la salida del transformador (VT). En la gráfica superior se aprecia la forma de onda de VT. En la gráfica inferior pueden verse mejor las conmutaciones de los interruptores

### 3.2. RESULTADOS NUMÉRICOS

Cuando se ha simulado el comportamiento del Convertidor CA-CC 1 alimentado del transformador se han obtenido resultados que difieren de los cálculos previos. Esto se debe a que en los cálculos no se han incluido las pérdidas y que el transformador utilizado en la simulación no ha sido parametrizado previamente.

| Convertidor CA-CC 1 |       |          |            |                           |
|---------------------|-------|----------|------------|---------------------------|
|                     |       | Cálculos | Simulación |                           |
|                     |       |          | Trafo      | Fuente de corriente ideal |
| I1 rms (A)          | D     | Vo (V)   | Vo (V)     | Vo (V)                    |
| 1                   | 0,51  | 5        | 3,46       | 4,58                      |
| 1,2                 | 0,425 | 5        | 3,73       | 4,59                      |
| 1,4                 | 0,365 | 5        | 3,94       | 4,62                      |
| 1,6                 | 0,32  | 5        | 4,09       | 4,64                      |
| 1,8                 | 0,285 | 5        | 4,22       | 4,667                     |
| 2                   | 0,255 | 5        | 4,29       | 4,68                      |

Tabla 2

La simulación se ha llevado a cabo fijando una corriente de entrada I1 y factor de servicio D concretos. La tensión esperada en todos los casos era de 5V (como puede verse en la fila de Vo calculada). Debido a que los resultados obtenidos en la simulación con un transformador son muy distintos a los resultados calculados, se ha repetido la simulación utilizando una fuente de corriente ideal equivalente a la corriente inducida por el transformador. Los resultados siguen sin coincidir con los resultados calculado, pero se aproximan más. Estas diferencias pueden deberse a las pérdidas que no se han tenido en cuenta en los cálculos.

### 3.3. TRANSITORIO DE ARRANQUE DEL CIRCUITO

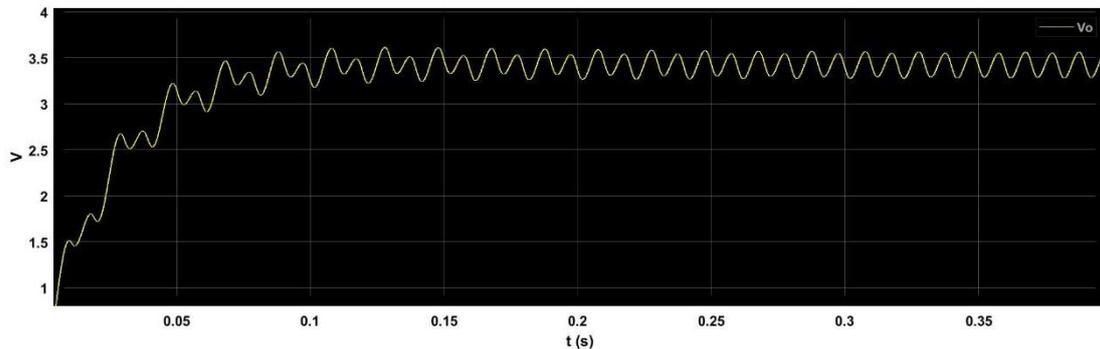


Figura 38: simulación de la tensión de salida  $V_o$  del Convertidor CA-CC 1. La capacidad del condensador es de  $220\mu\text{F}$ .

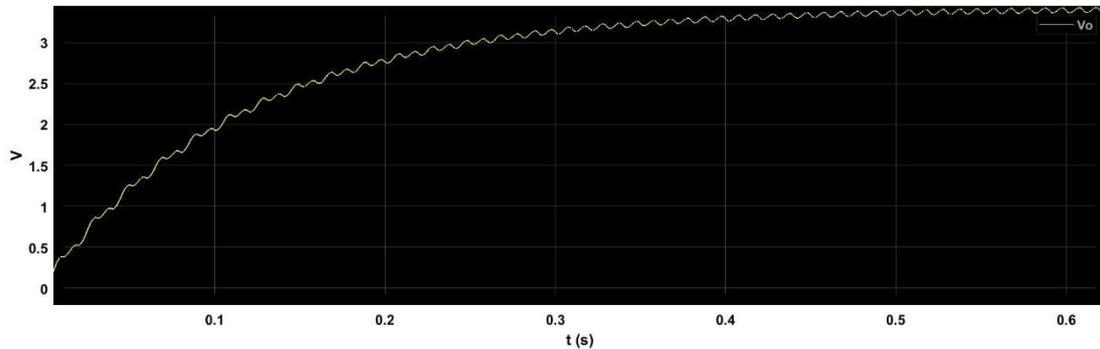


Figura 39: simulación de la tensión de salida  $V_o$  del Convertidor CA-CC 1. La capacidad del condensador es de  $1\text{mF}$ .

Como se ha comentado en el cálculo de la capacidad del condensador, cuanto mayor capacidad tenga menor será el rizado de la señal. En la Figura 39 se observa un rizado más reducido que en la Figura 38 debido a que la Figura 39 se ha simulado con un condensador de capacidad mayor. No obstante, aumentar la capacidad del condensador lleva a funcionar con periodos transitorios mucho más lentos. En el caso de utilizar un condensador de  $220\mu\text{F}$  la señal entra en régimen permanente pasados  $0,35\text{s}$ . En el caso de utilizar un condensador de  $1\text{mF}$  la señal entra en régimen permanente tras  $1,15\text{s}$  de régimen transitorio. Esto se debe al tiempo que tarda el condensador en cargarse.

En el prototipo se utiliza un condensador de  $220\mu\text{F}$  y aunque no se elimine el rizado por completo con la topología utilizada en el prototipo de este proyecto posterior al convertidor CA-CC el convertidor U1 y U2 terminan de reducir el rizado.

# CAPÍTULO 3

DISEÑO CONVERTIDOR CA-CC 2 Y  
CONVERTIDOR CA-CC 3

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo comprende los diseños, cálculos y simulaciones del Convertidor CA-CC 2 (ver Figura 40) y el Convertidor CA-CC 3 (ver Figura 41). Ambos convertidores pasan por dos estados de conversión. El primer estado, común a ambos convertidores, es un rectificador de onda completa sin controlar, un puente de diodos conectado al secundario del transformador. El segundo estado, donde se diferencia un circuito del otro, consiste en un convertidor elevador.

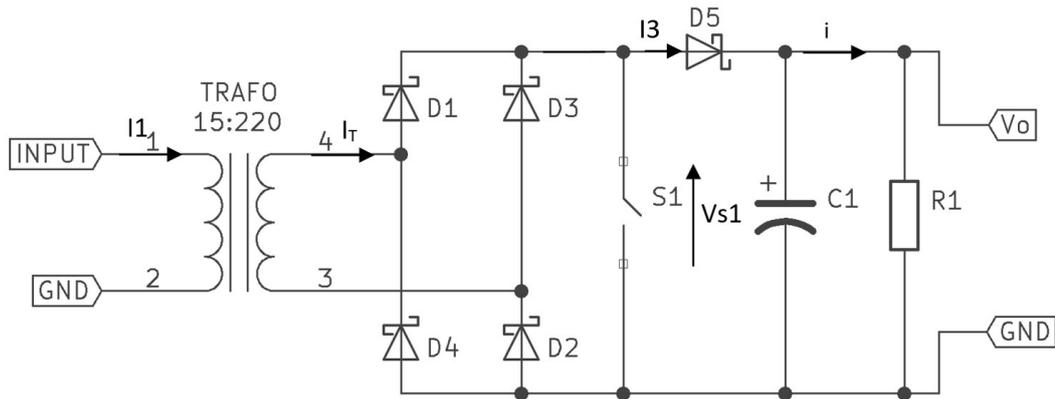


Figura 40: esquema del Convertidor CA-CC 2 conectado al transformador

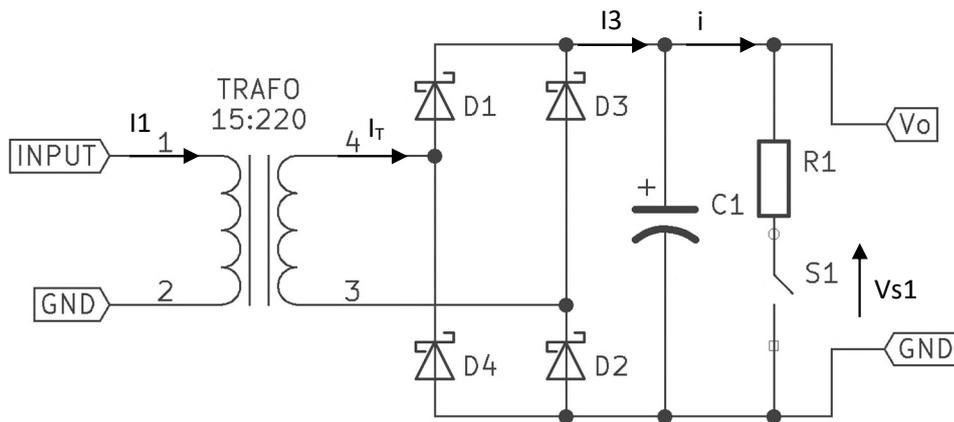


Figura 41: esquema del Convertidor CA-CC 3 conectado al transformador

En los dos convertidores, desde el transformador entra una señal senoidal ( $I_T$ ) que circula por el puente de diodos. Cuando la corriente es positiva conducen los diodos D1 y D2 y cuando la corriente de entrada es negativa conducen los diodos D3 y D4.

---

## 2. CONVERTIDOR CA-CC 2

---

La segunda fase de Convertidor CA-CC 2 consiste en un convertidor elevador a partir del interruptor S1 (ver Figura 40). Según las condiciones de la señal de entrada, I1, se ajusta el factor de servicio de S1 para elevar o reducir la corriente I3. El interruptor conmuta a través de una señal PWM a un determinado factor de servicio (D). Mientras el interruptor esta activado el secundario del transformador permanece cortocircuitado y no se transfiere energía a la salida del convertidor. Cuando el interruptor esta apagado la corriente  $I_T$  conduce por el diodo D5 carga el condensador (C1) y alimenta la carga (R1).

El circuito contiene un filtro de salida basado en un condensador. Es necesario añadir el diodo D5 para que en los periodos de tiempo que el transformador se encuentre cortocircuitado el condensador se descargue hacia R1 evitando que se descargue hacia S1.

### 2.1. RELACIÓN ENTRE VO E I1

Se calcula el valor de la tensión de salida ( $V_o$ ) en función de la corriente de entrada del transformador (I1).

$$D_0 = \frac{t_{ON}}{T} \quad (13)$$

Factor de servicio:

$$D = 1 - D_0 \quad (14)$$

Corriente en el secundario del transformador:

$$I_T = \frac{I_1 \cdot 15}{220} \quad (15)$$

Corriente de carga media:

$$\langle i \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_T^p \sin(\alpha) D d\alpha = \frac{1}{\pi} I_T^p [1 + 1] D = \frac{2I_T^p}{\pi} D \quad (16)$$

Tensión media de carga:

$$V_o \approx 0.9 I_T^{rms} R_1 D_0 = \frac{15}{220} 0.9 I_1^{rms} R_1 D \quad (17)$$

La carga se fija para que a un factor de servicio  $D=0,5$  la tensión a la salida sea  $V_o=5V$ .

Valor de la carga de salida:

$$R_1 \approx \frac{V_o}{0.9 I_1^{rms} D} = \frac{5}{0.9 \times \frac{15}{220} \times 0.5} = 163 \Omega \approx 160 \Omega \quad (18)$$

Para la capacidad del condensador se utiliza el valor calculado en el circuito 1.  $C1=220\mu F$ .

## 2.2. TENSION DE SALIDA ( $V_o$ ) EN FUNCION DEL FACTOR DE SERVICIO ( $D$ )

En la Figura 42 aparece la relación entre la tensión de salida ( $V_o$ ) y el factor de servicio ( $D$ ) para distintos valores de la corriente en el primario del transformador ( $I_1$ ). Para mantener una salida de  $V_o = 5V$  con variaciones en la corriente de entrada habrá que ir regulando  $D$ . Según la gráfica mostrada, Figura 34, para una variación en la corriente de entrada entre 1 y 2 A habrá que variar el factor de servicio entre 0,255 y 0,51.

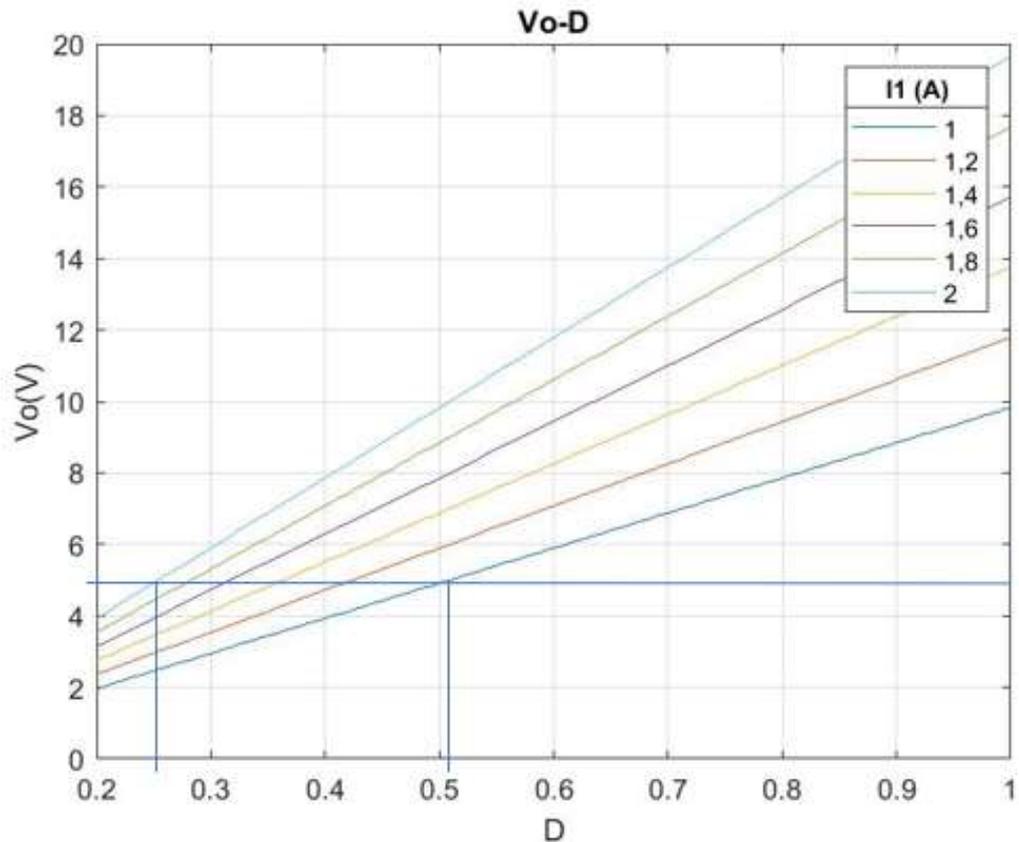


Figura 42: gráfica  $V_o$ - $D$  con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 2

| Convertidor CA-CC 2 |       |           |
|---------------------|-------|-----------|
| $I_1$ rms (A)       | $D$   | $V_o$ (V) |
| 1                   | 0,51  | 5         |
| 1,2                 | 0,425 | 5         |
| 1,4                 | 0,365 | 5         |
| 1,6                 | 0,32  | 5         |
| 1,8                 | 0,285 | 5         |
| 2                   | 0,255 | 5         |

Tabla 3

En la Tabla 3 aparecen los valores a los que habría que ajustar el factor de servicio si el valor de  $I_1$  variase entre 1 y 2A para mantener la tensión  $V_o$  constante a 5V del Convertidor CA-CC 2. Puede observarse en (17) que si aumenta la corriente  $I_1$  debe disminuir el factor de servicio.

### 3. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR CA-CC 2

#### 3.1. SIMULACIÓN CON $I_1=1A$ , $D=0,5$

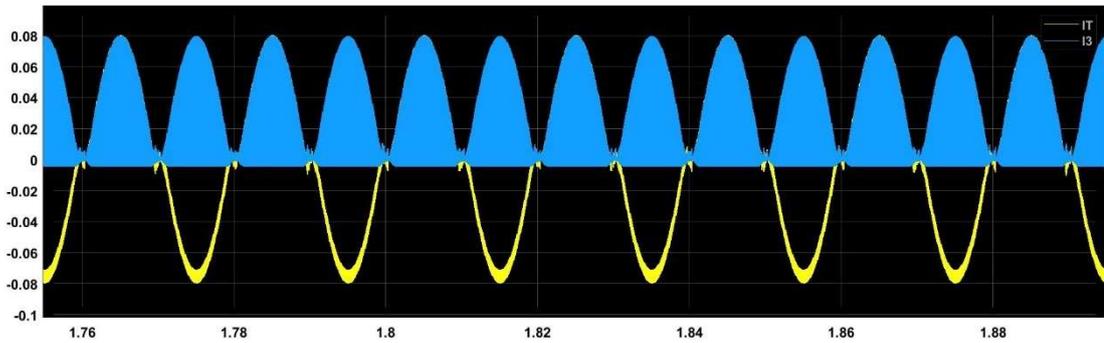


Figura 43: simulación del Convertidor CA-CC 2. Formas de onda de (amarillo) la corriente a la salida del secundario del transformador,  $I_T$  y (azul) la corriente que circula por el diodo  $D_5$ ,  $I_3$

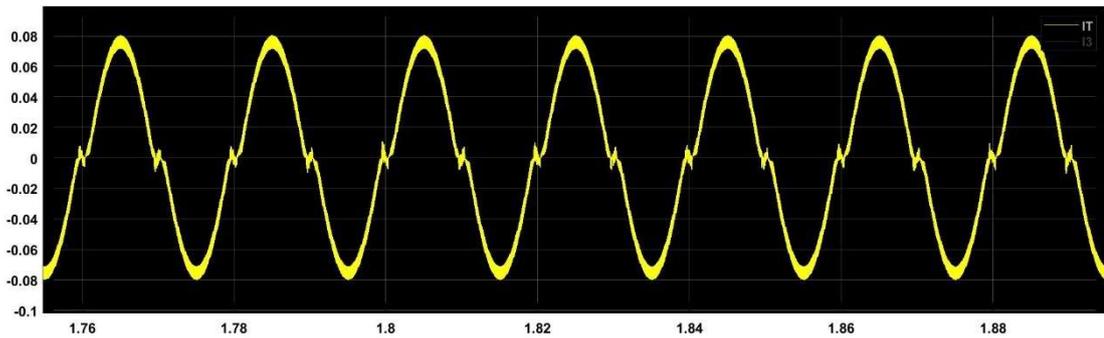


Figura 44: simulación del Convertidor CA-CC 2. Forma de onda de  $I_T$

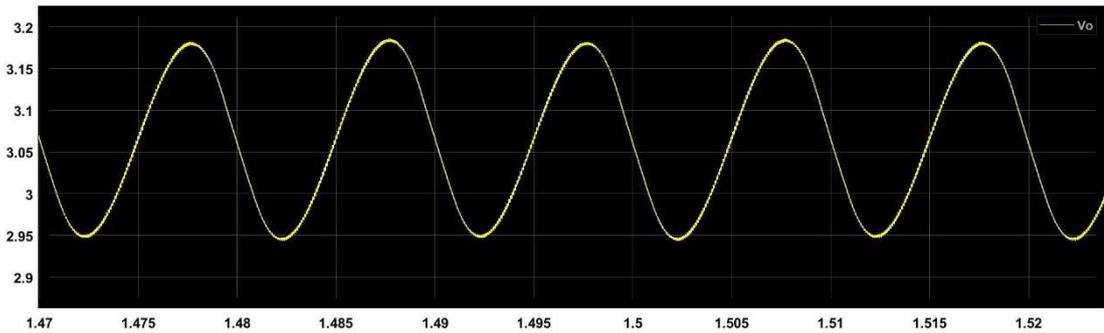


Figura 45: simulación del Convertidor CA-CC 2. Forma de onda de la tensión de salida  $V_o$

En la Figura 43 aparecen simuladas la corriente secundaria del transformador ( $I_T$ ) y la corriente  $I_3$ , que circula por  $D_5$  (ver Figura 40). Para poder apreciar la onda completa de  $I_T$ ,

vuelve a aparecer simulada en la Figura 44. En la Figura 45 está la simulación de la tensión de salida ( $V_o$ ).

Las formas de onda simuladas coinciden con lo esperado.  $I_3$  es una señal de doble onda rectificadora de la señal  $I_T$ . Se aprecian las conmutaciones que realizan los interruptores en  $I_3$  porque cuando los interruptores están activados la corriente  $I_T$  circula por el secundario del transformador y  $I_3$  se hace cero. La tensión  $V_o$  no es constante y se debe a que la capacidad del condensador seleccionada para el circuito no termina de eliminar el rizado.

El interruptor conmuta a una frecuencia de 12kHz. En la Figura 46 se representa la forma de onda de la tensión que cae en el interruptor  $S_1$  ( $V_{s1}$ ). En esta figura también se pueden apreciar las conmutaciones que realiza el interruptor  $S_1$ . Cuando los interruptores están activados el transformador se cortocircuita y la tensión pasa a ser nula, pero mientras los interruptores están desactivados la tensión que cae en  $S_1$  es prácticamente la misma que  $V_o$  ( $V_{s1}$  es la suma de  $V_o$  y  $V_{D5ON}$ ). Si se amplía la gráfica, se pueden apreciar las conmutaciones que realiza el interrupto. Cuando  $V_{s1}$  es nulo el interruptor está en ON. Si se modificase el factor de servicio cambiaría el ancho de pulso.

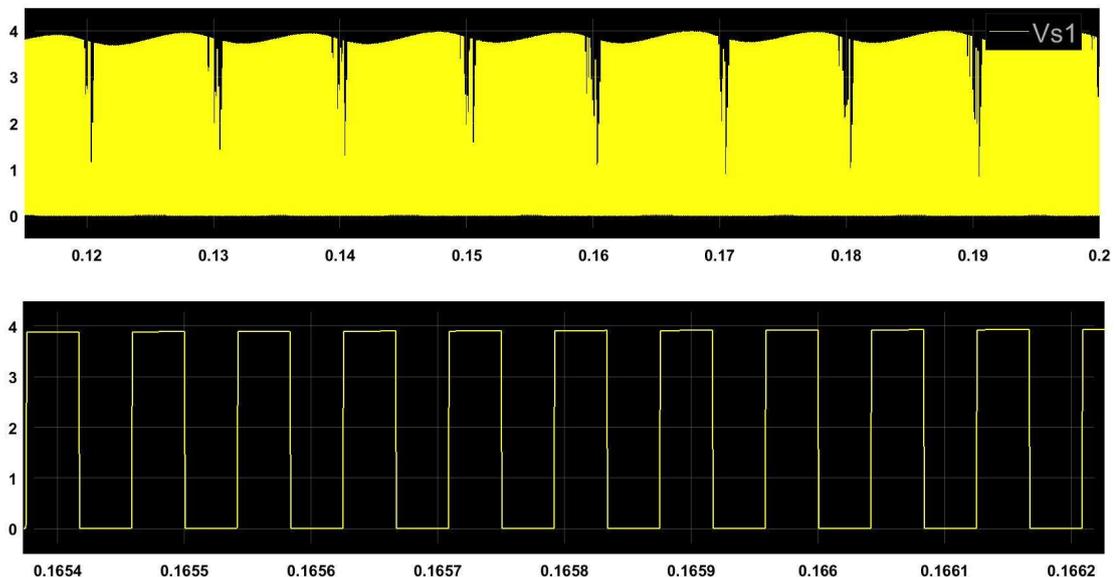


Figura 46: simulación del Convertidor CA-CC 2. Forma de onda de la tensión del interruptor ( $V_{s1}$ ). En la gráfica superior se aprecia la forma de onda de  $V_{s1}$ . En la gráfica inferior pueden verse las conmutaciones que realiza el interruptor.

### 3.2. RESULTADOS NUMÉRICOS

Cuando se ha simulado el comportamiento del Convertidor CA-CC 2 alimentado del transformador se han obtenido resultados que difieren de los cálculos previos. Esto se debe a que en los cálculos no se han incluido las pérdidas y que el transformador utilizado en la simulación no ha sido parametrizado previamente.

| <b>Convertidor CA-CC 2</b> |          |               |               |                           |
|----------------------------|----------|---------------|---------------|---------------------------|
|                            |          | Cálculos      | Simulación    |                           |
| <b>I1 rms (A)</b>          | <b>D</b> |               | Trafo         | Fuente de corriente ideal |
|                            |          | <b>Vo (V)</b> | <b>Vo (V)</b> | <b>Vo (V)</b>             |
| 1                          | 0,51     | 5             | 3,1           | 4,551                     |
| 1,2                        | 0,425    | 5             | 3,417         | 4,6                       |
| 1,4                        | 0,365    | 5             | 3,65          | 4,64                      |
| 1,6                        | 0,32     | 5             | 3,78          | 4,65                      |
| 1,8                        | 0,285    | 5             | 3,98          | 4,7                       |
| 2                          | 0,255    | 5             | 4,076         | 4,714                     |

*Tabla 4*

La simulación se ha llevado a cabo para distintos valores de I1 y de D. La tensión esperada en todos los casos era de 5V (como puede verse en la columna de Vo calculada). Debido a que los resultados obtenidos en la simulación con un transformador son muy distintos a los resultados calculados, se ha repetido la simulación utilizando una fuente de corriente ideal equivalente a la corriente inducida por el transformador. Los resultados siguen sin coincidir con los resultados calculado, pero se aproximan más. Estas diferencias pueden deberse a las pérdidas que no se han tenido en cuenta en los cálculos.

---

## 4. CONVERTIDOR CA-CC 3

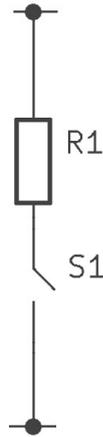
---

La segunda fase de Convertidor CA-CC 3 consiste en un convertidor elevador a partir del interruptor S1 (ver Figura 41). Según las condiciones de la señal de entrada, I1, se ajusta el factor de servicio de S1 para elevar o reducir la corriente. El interruptor conmuta a través de una señal PWM a un determinado factor de servicio (D). Mientras el S1 está activado la corriente  $i$  circula por la carga R1. En cuanto el interruptor se desactiva se abre el circuito por la carga y el valor de la carga equivalente se vuelve infinita.

El convertidor contiene un condensador que filtra la señal para reducir la variación de corriente. En el caso del Convertidor CA-CC 2 se añade el diodo D5 (ver Figura 40) con la función de evitar que el condensador se descargue por el interruptor mientras este está activado. En la topología de este circuito, el condensador no sufre un cortocircuito en ningún momento y se puede prescindir de D5.

### 4.1. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA EQUIVALENTE

Para obtener la relación entre la corriente y la tensión de salida es necesario determinar la resistencia equivalente entre R1 y S1 (ver Figura 41).



*Figura 47: Cálculo de la resistencia equivalente entre R1 Y S1*

$$D_0 = \frac{t_{ON}}{T} \quad (19)$$

Factor de servicio:

$$D = 1 - D_0 \quad (20)$$

Resistencia equivalente:

$$R_{eq} = R_1 \frac{t_{ON}}{T} + \infty \frac{t_{OFF}}{T} \quad (21)$$

$$p_{OUT} = v_{OUT} * i_{OUT} = v_{OUT} \frac{v_{OUT}}{R_{eq}} \quad (22)$$

$$\langle i \rangle = 0 \times D + \frac{v_{OUT}}{R_1} (1 - D) \quad (23)$$

$$v_{OUT} \frac{v_{OUT}}{R_{eq}} = v_{OUT} \frac{v_{OUT}}{R_1} (1 - D) \rightarrow R_{eq} = \frac{R_1}{(1-D)} \quad (24)$$

#### 4.2. CÁLCULO DE LA TENSIÓN DE SALIDA (VO) EN FUNCIÓN DE LA CORRIENTE (I1)

Corriente en el secundario del transformador:

$$I_T = \frac{I_1 \cdot 15}{220} \quad (25)$$

Corriente de carga media:

$$\langle i \rangle = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi I_T^p \sin(\alpha) d\alpha = \frac{1}{\pi} I_T^p [1 + 1] = \frac{2I_T^p}{\pi} \quad (26)$$

Tensión media de carga:

$$V_o \approx 0.9 I_T^{rms} R_{eq} = 0.9 I_T^{rms} \frac{R_1}{(1-D)} = 0.9 I_1^{rms} \frac{R_1}{(1-D)} \frac{15}{220} \quad (27)$$

La carga se fija para que a un factor de servicio  $D=0,5$  la tensión a la salida sea  $V_o=5V$ .

Valor de la carga de salida:

$$R_1 \approx \frac{V_o D}{0.9 I_T^{rms}} = \frac{5 \times 0.5}{0.9 \times \frac{15}{220}} = 40,74 \Omega \approx 40 \Omega \quad (28)$$

Para la capacidad del condensador se utiliza el valor calculado en el circuito 1.

#### 4.3. TENSIÓN DE SALIDA (VO) EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE SERVICIO (D)

La siguiente figura muestra la relación entre la tensión de salida,  $V_o$ , y el factor de servicio,  $D$ , para distintos valores de la corriente de entrada ( $I_1$ ). Para mantener una tensión constante de  $V_{out}=5V$  habrá que variar el factor de servicio entre 0,515 y 0,015 ante posibles variaciones de  $I_1$  (ver Figura 48).

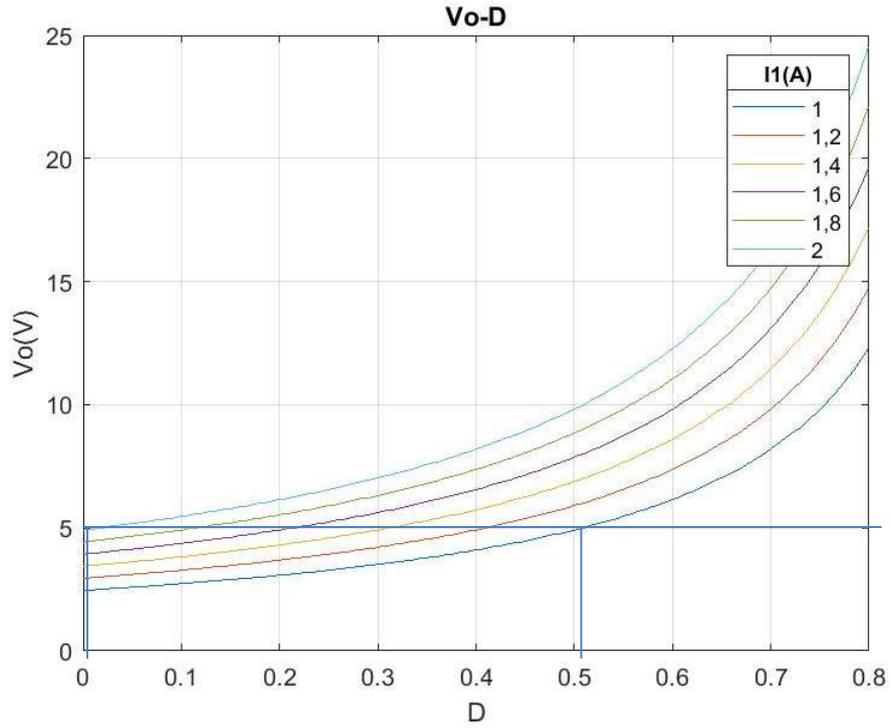


Figura 48: gráfica  $V_o$ - $D$  con los valores calculados para el Convertidor CA-CC 3

| Convertidor CA-CC 3 |       |           |
|---------------------|-------|-----------|
| $I_1$ rms (A)       | D     | $V_o$ (V) |
| 1                   | 0,515 | 5         |
| 1,2                 | 0,415 | 5         |
| 1,4                 | 0,315 | 5         |
| 1,6                 | 0,215 | 5         |
| 1,8                 | 0,115 | 5         |
| 2                   | 0,015 | 5         |

Tabla 5

En la *Tabla 5* se muestran los valores del factor de servicio calculados para distintos valores de  $I_1$  manteniendo la  $V_o$  constante a 5V del Convertidor CA-CC 3. Puede observarse en (29) que si aumenta  $I_1$  debe disminuir el factor de servicio.

---

## 5. SIMULACIÓN DEL CONVERTIDOR CA-CC 3

---

### 5.1. SIMULACIÓN CON $I_1=1A$ , $D=0,5$

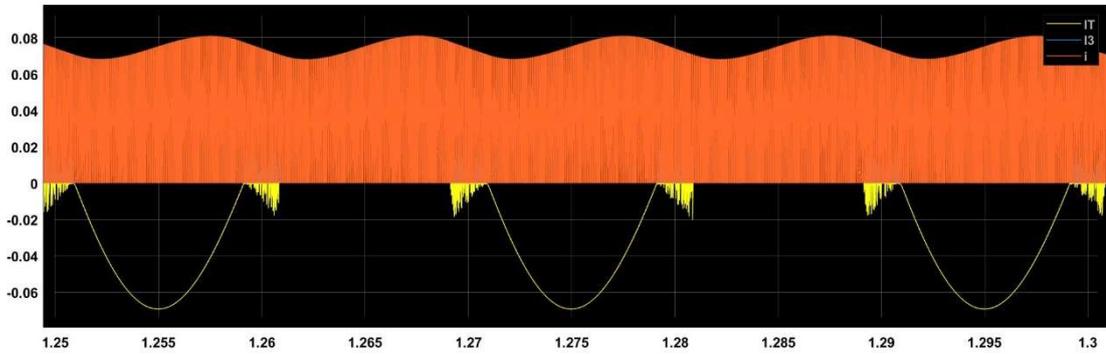


Figura 49: simulación del Convertidor CA-CC 3. Formas de onda de (amarillo) la corriente a la salida del secundario del transformador,  $I_T$ , y (naranja) corriente media de carga,  $i$

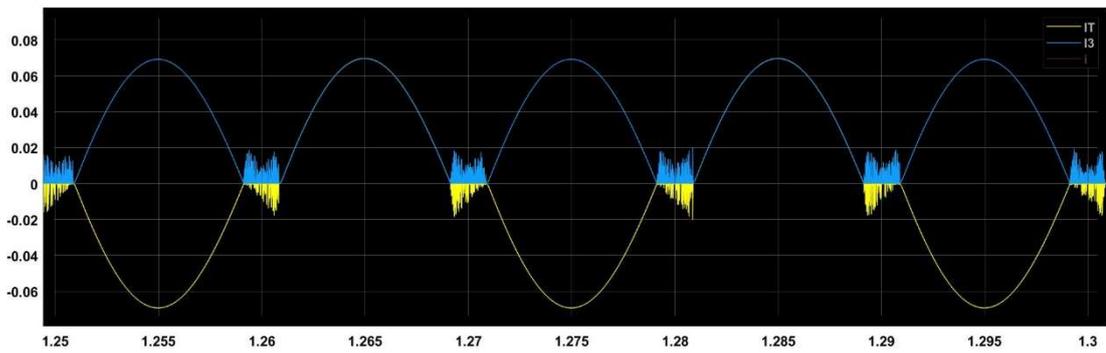


Figura 50: simulación del Convertidor CA-CC 3. Formas de onda de (amarillo)  $I_T$  y (azul)  $I_3$

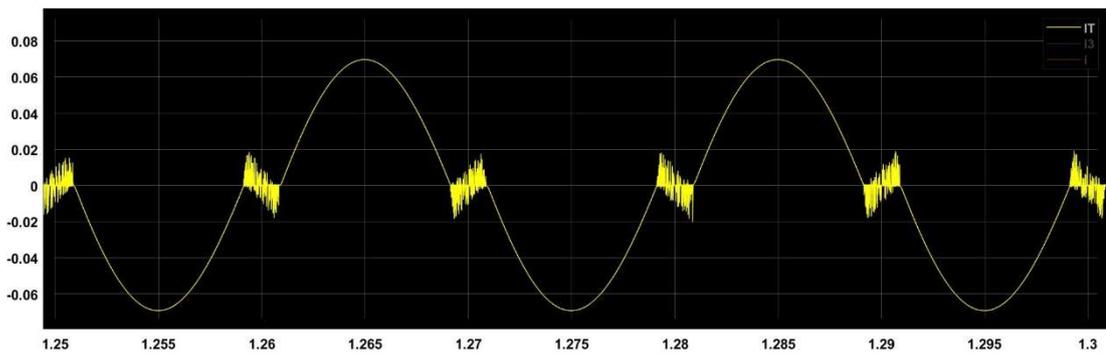


Figura 51: simulación del Convertidor CA-CC 3. Forma de onda de  $I_T$

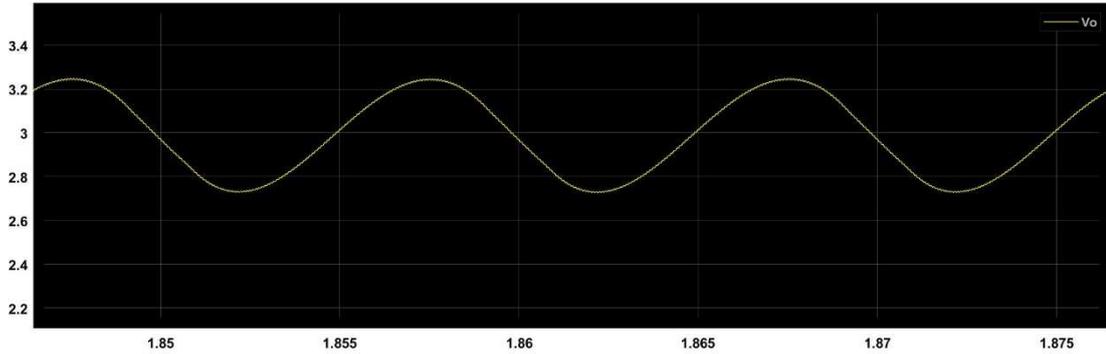


Figura 52: simulación del Convertidor CA-CC 3. Forma de onda de  $V_o$

En la Figura 49 aparecen simuladas la corriente secundaria del transformador ( $I_T$ ), la corriente rectificadora ( $I_3$ ) y la corriente media de carga ( $i$ ), ver Figura 41.  $I_T$  es una señal senoidal e  $I_3$  es la misma señal rectificadora. Estas dos señales pueden apreciarse mejor en la Figura 50 y la Figura 51 respectivamente. También se ha simulado la tensión de salida  $V_o$  en la Figura 52.

$V_o$  e  $i$  tienen prácticamente la misma forma de onda. La diferencia es que en  $i$  se aprecian las conmutaciones que realiza el interruptor S1. Cuando S1 está activado  $i$  circula por R1 pero mientras S1 permanezca desactivado,  $i$  es nula. Por lo tanto, cuando mayor sea el factor de servicio ( $D$ ) menor será  $i$ , porque permanece nula durante más tiempo. El interruptor conmuta a una frecuencia de 12kHz. La Figura 53 aparece simulada la corriente de carga  $i$  donde pueden apreciarse las conmutaciones más en detalle.

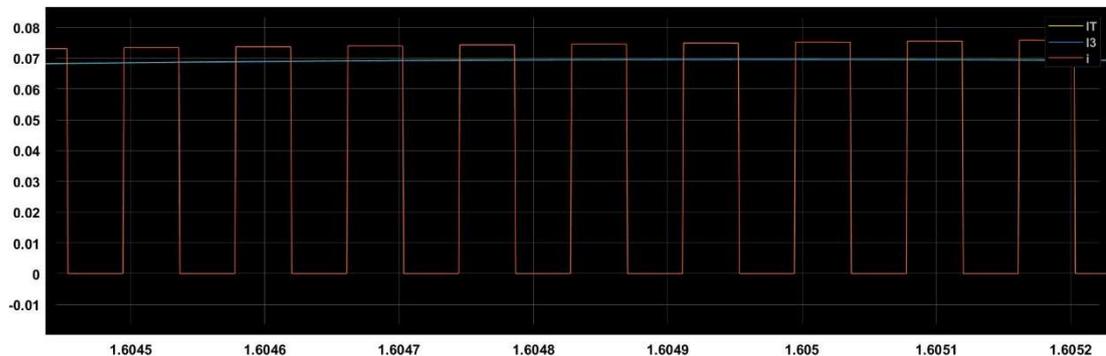


Figura 53: simulación del Convertidor CA-CC 3. Formas de onda de (azul)  $I_3$  y (naranja)  $i$

## 5.2. RESULTADOS NUMÉRICOS

Al igual que en los casos anteriores, cuando se ha simulado el comportamiento del Convertidor CA-CC 3 alimentado del transformador se han obtenido resultados que difieren de los cálculos previos. Esto se debe a que en los cálculos no se han incluido las pérdidas y que el transformador utilizado en la simulación no ha sido parametrizado previamente.

| Convertidor CA-CC 3 |          |               |               |                           |
|---------------------|----------|---------------|---------------|---------------------------|
|                     |          | Cálculos      | Simulación    |                           |
|                     |          |               | Trafo         | Fuente de corriente ideal |
| <b>I1 rms (A)</b>   | <b>D</b> | <b>Vo (V)</b> | <b>Vo (V)</b> | <b>Vo (V)</b>             |
| 1                   | 0,515    | 5             | 3,032         | 5,112                     |
| 1,2                 | 0,415    | 5             | 3,285         | 5,081                     |
| 1,4                 | 0,315    | 5             | 3,442         | 5,059                     |
| 1,6                 | 0,215    | 5             | 3,593         | 5,042                     |
| 1,8                 | 0,115    | 5             | 3,709         | 5,029                     |
| 2                   | 0,015    | 5             | 3,8           | 5,017                     |

*Tabla 6*

La simulación se ha llevado a cabo para distintos valores de I1 y de D. La tensión esperada en todos los casos era de 5V (como puede verse en la fila de Vo calculada). Debido a que los resultados obtenidos en la simulación con un transformador son muy distintos a los resultados calculados, se ha repetido la simulación utilizando una fuente de corriente ideal equivalente a la corriente inducida por el transformador. En este caso, los resultados de la simulación son muy próximos a los valores esperados.

# CAPÍTULO 4

## TOPOLOGÍA ELEGIDA

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

El presente capítulo contiene una explicación en detalle de los componentes utilizados para el circuito. Se lleva a cabo la selección del tipo de interruptor de potencia que se va a utilizar y el respectivo circuito de alimentación.

Se muestran las características de los convertidores, de salida 3,3 y 5V, y el resto de los componentes utilizados para el desarrollo del prototipo.

---

## 2. SELECCIÓN DEL INTERRUPTOR

---

### SEMICONDUCTORES DE POTENCIA

Al llevar a cabo el diseño del circuito se utilizan interruptores ideales. Están en cortocircuito cuando están activados y en circuito abierto en el caso de estar desactivados. El propósito es centrarse en el comportamiento del circuito antes de elegir el semiconductor. Una vez el circuito este diseñado, las características para clasificar a los dispositivos semiconductores servirán para seleccionar el dispositivo adecuado. La clasificación se centra en la capacidad de tensión, corriente que los interruptores son capaces de soportar y la velocidad a la que se apaga o enciende el interruptor.

Los semiconductores pueden clasificarse en tres grupos:

1. Diodos: la transición de un estado a otro está controlada por el funcionamiento del circuito.
2. Tiristores: la acción de activar el semiconductor está controlada por una señal de control externa al circuito, mientras que la acción de apagado viene determinada por el propio funcionamiento del circuito.

En los tiristores la corriente principal circula desde el ánodo al cátodo. Si el tiristor no está disparado no conduce. El dispositivo se dispara aplicando una corriente durante un periodo corto de tiempo. Una vez el tiristor se dispara, la acción de apagar el semiconductor depende del funcionamiento del circuito. El tiristor conduce al revés durante un periodo corto de tiempo antes de apagarse.

3. Transistores: se encienden y se apagan por señales de control externas al circuito. Los circuitos de excitación de los transistores se diseñan para que estén completamente saturados mientras se mantengan activados [11]. Este grupo de semiconductores incluye a los dispositivos BJTs, MOSFETs, GTO e IGBTs entre otros.

La Figura 54 representa el símbolo genérico de un interruptor controlado. La corriente únicamente circula cuando el interruptor está encendido. Este tipo de dispositivos cambian de estado prácticamente de manera instantánea y es necesaria una potencia pequeña para disparar los interruptores.

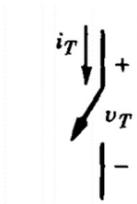


Figura 54: esquema general de un interruptor controlado [12]

Para el convertidor diseñado en el proyecto se selecciona un transistor. A la hora de elegir uno de estos dispositivos deben tenerse en cuenta dos características principales. La velocidad de conmutación y las pérdidas de potencia. Los MOSFET presentan la ventaja de que

funcionan con una velocidad alta de conmutación y por lo tanto tienen menos pérdidas de conmutación. Así pues, en los circuitos diseñados en el proyecto se emplearán interruptores MOSFETs.

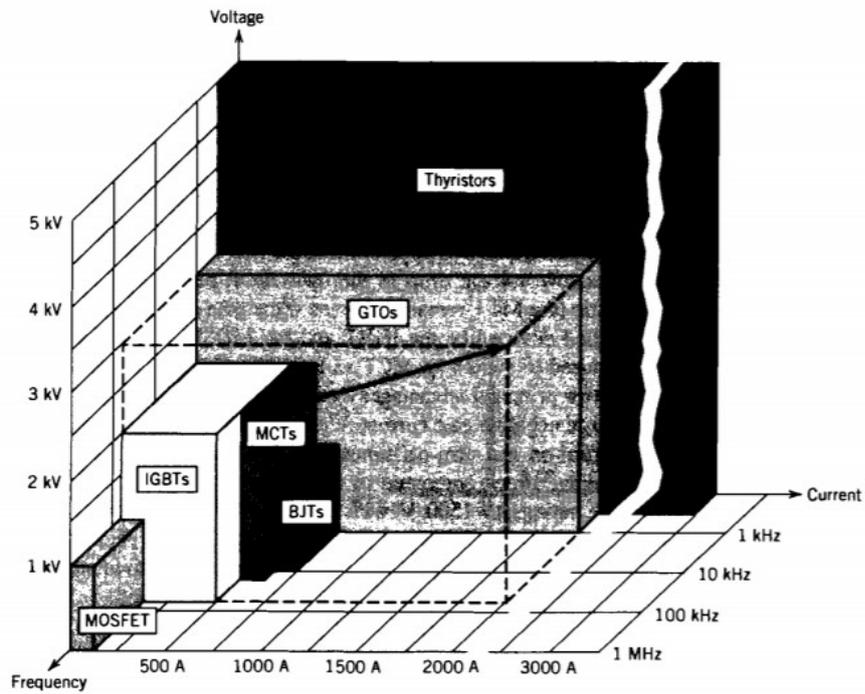


Figura 55: gráfico de barras para comparar los diferentes semiconductores según la tensión, corriente y la frecuencia de las interrupciones [10]

---

### 3. MOSFETS

---

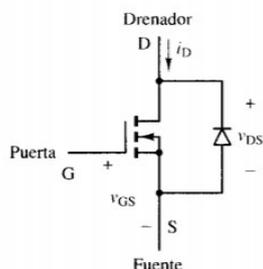


Figura 56: esquema de un transistor MOSFET de canal N con el diodo parásito [11]

El MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor*) está compuesto por tres semiconductores distintos. En el caso del MOSFET de canal N, dos de los semiconductores son de tipo N y el otro de tipo P. Un material tipo N tiene exceso de electrones y mientras que un material de tipo P tiene exceso de huecos. Entre el drenador (D), fuente (S) y el material P existe una capa aislante de óxido de silicio y por encima de esa capa hay una lámina conductora de aluminio, dónde se encuentra la puerta (G). Cuando se aplica una tensión entre G y S,  $V_{GS} > 0$ , se genera un campo eléctrico que forma un canal entre D y S para la circulación de electrones. Una vez se abre el canal, el MOSFET conduce y por lo tanto se encuentra encendido.

Durante la construcción del MOSFET aparece un diodo “parásito” entre D y S. Dependiendo del circuito, el diodo que contiene el MOSFET puede utilizarse dentro del funcionamiento del circuito, como sucede en el Convertidor CA-CC 1 diseñado.

Los MOSFETs destacan por tener un tiempo de transición de estado muy corto. Entre 10 y 100 ns [12] y se utilizan en convertidores que operan a altas frecuencias.

En el proyecto se ha utilizado el MOSFET **FDD8447L** [13]. Es un MOSFET de canal N con una resistencia  $r_{DS(on)} = 8,5\text{m}\Omega$  y soporta una tensión  $V_{DSmax} = 40\text{V}$  y una corriente  $I_{Dmax} = 50\text{A}$ . El tiempo de transición de estado es entre 12 y 20ns

---

## 4. DRIVER (U3)

---

Los transistores MOSFETs son los más sencillos de encender. A diferencia de otro tipo de semiconductores, en el caso de los MOSFETs no es necesario aplicar una corriente para mantener el transistor encendido. Para activar un MOSFET se aplica un pico de corriente que carga un condensador “parásito” entre G y S. El resto del tiempo el transistor se mantiene encendido sin el paso de corriente. Se mantiene la tensión  $V_{GS}$  hasta el momento que se apaga. Para desactivar el MOSFET se sigue el procedimiento contrario. Se aplica un pico de carga negativa para descargar el condensador  $C_{GS}$ . Los circuitos “drive” empleados para los MOSFETs son mucho más sencillos y eficientes que los utilizados para otro tipo de transistores.

El driver de un MOSFET es un tipo de amplificador de corriente que recoge la señal de disparo y produce una corriente alta que se conecta a la entrada G del MOSFET evitando que el circuito que produce el disparo original tenga que suministrar una corriente grande. La señal que recibe el driver podría proceder de un microprocesador. El microprocesador transmite una señal PWM de baja potencia. A través del driver se le proporcionan, al MOSFET, picos de carga que reducen el tiempo que tarda en cargarse el condensador  $C_{GS}$  y, por ende, el tiempo de transición de estado. Además, aumentan la eficiencia energética y térmica.

Para el convertidor se ha utilizado el driver **TC4422** [10]. La alimentación del driver,  $V_{DD}$ , debe ser entre 4,5 y 18V y es necesario aplicar una corriente entre 0,2 y 1,5 mA a la entrada. La tensión que proporciona el driver en la salida,  $V_{OUT}$ , será  $V_{DD}-0,025$ . La corriente máxima que el driver puede aportar a la salida es de 2A.

La Figura 57 muestra el diagrama de bloques que presenta el driver **TC4422**. En el input entra la señal que proporciona el microprocesador.  $V_{DD}$  es la tensión de alimentación. El convertidor **TPS55165Q1-EVM**, que se describirá más adelante, alimenta el driver con una tensión  $V_{DD}= 5V$ . Para el diseño de los circuitos se ha utilizado el driver **TC4421** que invierte la señal de entrada.

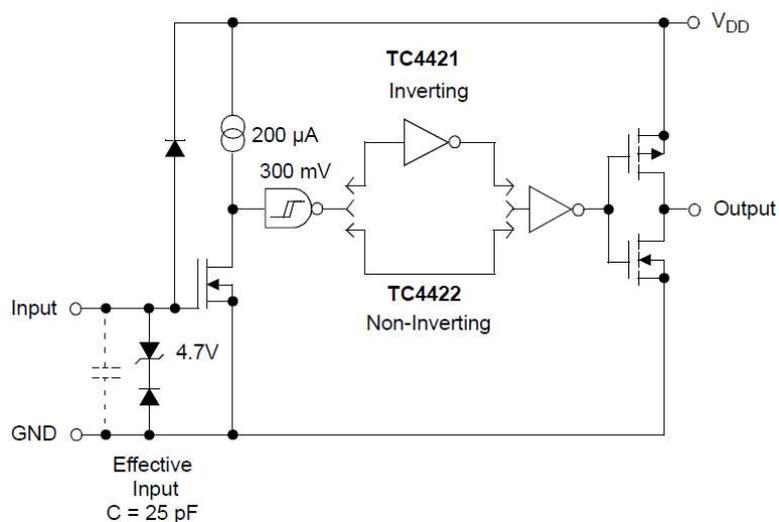


Figura 57: diagrama de bloques del driver TC442x [10]

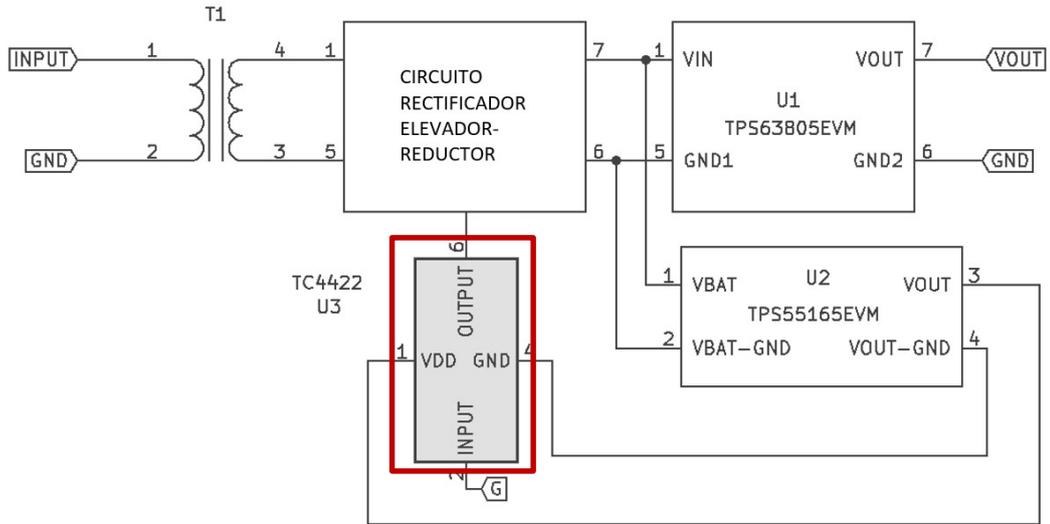


Figura 58: esquema general del prototipo señalada la conexión del driver TC4421

---

## 5. CONVERTIDOR TPS63805EVM-026 (U1)

---

Se utiliza el convertidor CC-CC reductor elevador **TPS63805EVM-026** [3] con *evaluation module* (EVM) que facilita el uso del convertidor. Está instalado para proporcionar una salida fija de 3,3V. El convertidor opera con una tensión de entrada,  $V_{IN}$ , entre 1,3 y 5,5V. Aun así, la tensión mínima necesaria para comenzar a funcionar es de 1,8V. La corriente máxima que puede aportar a la salida es de 2A. Por lo tanto, la potencia máxima que puede aportar la fuente de alimentación se ve restringida por ese convertidor y es 6,6W. Las condiciones de funcionamiento son idénticas para reducir o elevar la salida.

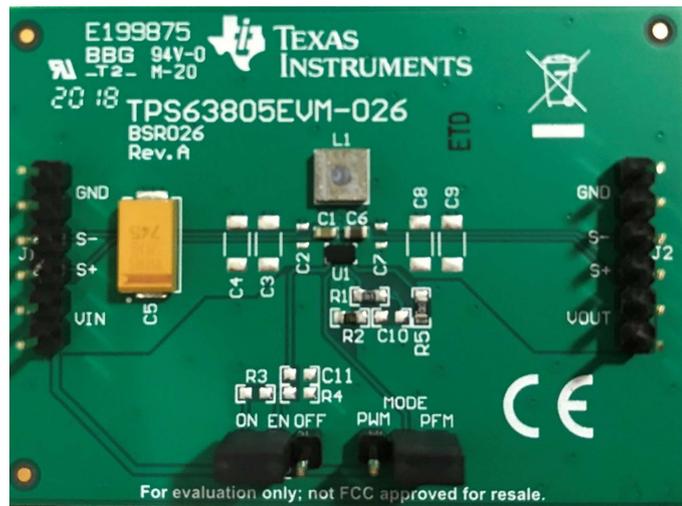


Figura 59: PCB del convertidor TPS63805EVM-026

El convertidor contiene dos jumpers. J1 habilita el funcionamiento del convertidor. En J2 se selecciona el funcionamiento en PWM.

El convertidor TPS63805EVM-026 se utiliza a la salida del convertidor CA-CC para proporcionar una salida fija de 3,3V asumiendo pequeñas variaciones de tensión a la salida del convertidor CA-CC. TPS63805EVM-026 puede funcionar como elevador o reductor de tensión y dependiendo del valor de la tensión  $V_o$  (ver Figura 27) elevará o reducirá la tensión. Generalmente funcionará reduciendo la tensión de entrada ( $V_o$ ). La salida del convertidor TPS63805EVM-026 es la salida del prototipo  $V_{out}$  (ver Figura 27).

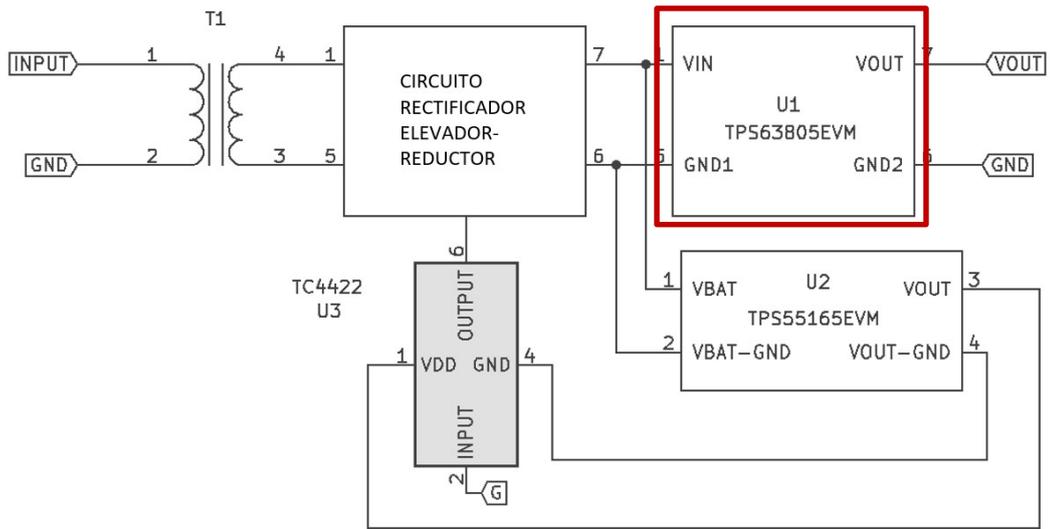


Figura 60: esquema general del prototipo señalada la conexión del convertidor TPS63805EVM-026

## 6. CONVERTIDOR TPS55165Q1-EVM (U2)

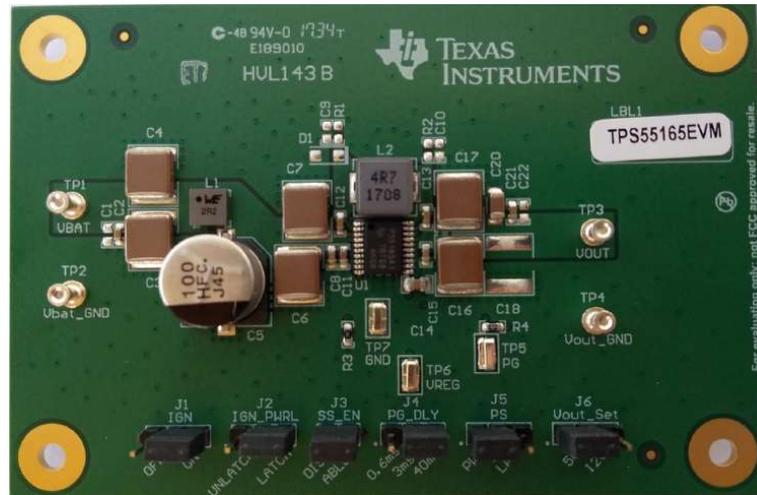


Figura 61: PCB del convertidor TPS55165Q1-EVM

El convertidor TPS55165Q1-EVM es un convertidor CC-CC reductor elevador con un *evaluation module* (EVM). La tensión de salida,  $V_{OUT}$ , se puede configurar a 5 o 12V. La tensión de entrada debe ser entre 2 y 36V, aunque la tensión inicial para poner el convertidor a funcionar es de 5,3V. La corriente máxima a la salida es de 1A.

La placa PCB tiene seis jumpers añadidos para configurar el funcionamiento del convertidor. J1 habilita el funcionamiento del convertidor (ON). J3, para *spread spectrum modulation*, reduce la amplitud del armónico cuando se habilita (*ABLED*). En J5 se escoge trabajar con PWM. En J6 se configura la tensión de salida a 5V, cabe la opción de configurarlo 12V. El resto de los jumpers se dejan con la configuración con las que viene por defecto. J2 en *UNLATCH* (sirve para mantener el dispositivo encendido en que caso de que el pin IGN se apaga) y J4 viene configurado sin jumper.

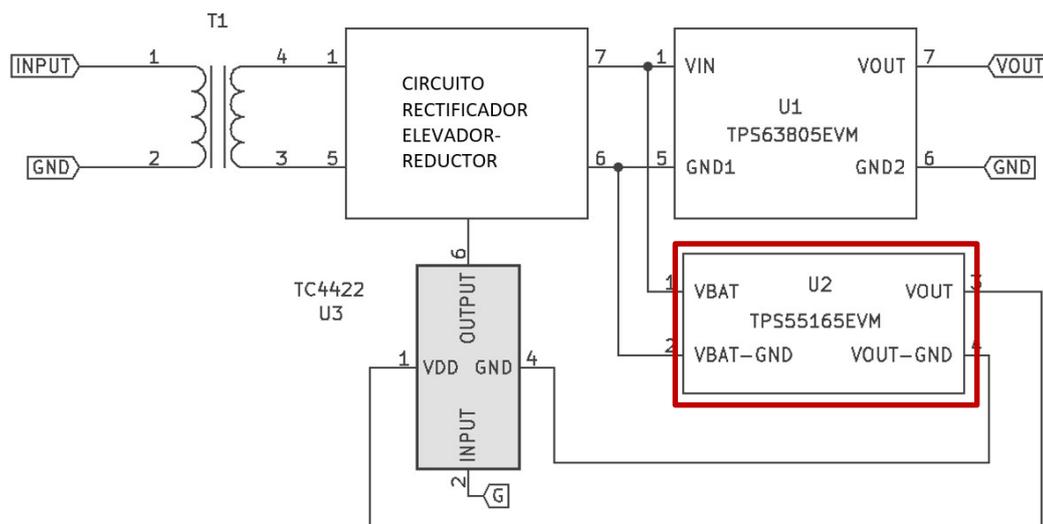


Figura 62: esquema general del prototipo señalada la conexión del convertidor TPS55165Q1-EVM

Este convertidor se encarga de la alimentación del driver. Se coloca en paralelo con la salida del convertidor CA-CC como se señala en la Figura 62.

---

## 7. EL RESTO DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS

---

- **Transformador de tensión EN-61558:**

El transformador utilizado en el prototipo es un transformador de tensión con una relación de espiras 220/15. Con 15V en el devanado primario y 220V en el devanado secundario. Funciona a 50Hz.

- **Puente rectificador GBJ2005-F**

En el circuito 2 y el circuito 3 se utiliza un puente rectificado para convertir CA en CC. El puente rectificador utilizado en los prototipos es GBJ2005-F. El convertidor soporta una tensión máxima, de ruptura, de 50V y una corriente máxima,  $I_{\max}$ , de 25A [14].

- **Diodo schottky 1N5822**

En el prototipo diseñado para el circuito 1 y para el circuito 2 se hace uso de diodos schottky. Se utilizan diodos 1N5822 que soportan una tensión máxima, tensión de ruptura, de 40V y una corriente máxima,  $I_{\max}$  mientras conduce de 3A [15].

- **Condensador EEH-ZC1V221P**

Se utiliza el condensador EEH-ZC1V221P de capacidad de 220 $\mu$ F [16].

- **Resistencia HS15 47R J/ HS25 160R J**

En el circuito 1 y el circuito 2 se utilizan resistencias de 160 $\Omega$ . En el circuito 3 se utiliza una resistencia de 47 $\Omega$  [17].

# CAPÍTULO 5

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

---

## 1. INTRODUCCIÓN

---

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos al ensayar los prototipos de los tres convertidores CA-CC diseñados en los capítulos anteriores. Para probar cada uno de los diseños se han ensayado para las condiciones de corriente de entrada ( $I_1$ ), factor de servicio ( $D$ ) y carga ( $R_1$ ) utilizadas en los cálculos.

El Convertidor CA-CC 1 y el Convertidor CA-CC 3 no han llegado a funcionar. Por lo tanto, los resultados que se presentan son los obtenidos del ensayo del Convertidor CA-CC 2. Los resultados que se muestran en este capítulo se han obtenido de las medidas y las imágenes capturadas del osciloscopio.

Para alimentar el prototipo se ha utilizado una toma de red de 220V y 50Hz para “simular” la extracción de energía de la línea. Se ha añadido una resistencia variable entre 110 y 220 $\Omega$  ( $R$ ), aproximadamente, entre la red y la toma al primario del transformador (ver Figura 63). De esta manera se ensaya el prototipo con una carga variable a la entrada,  $I_1$ , entre 1 y 2A.

La relación de transformación utilizada en el prototipo está sujeta a las condiciones a las que se ha trabajado al ensayar el circuito. En el caso de implantar la fuente de alimentación en a una línea eléctrica, la relación de transformación debería ajustarse a las condiciones de la línea.

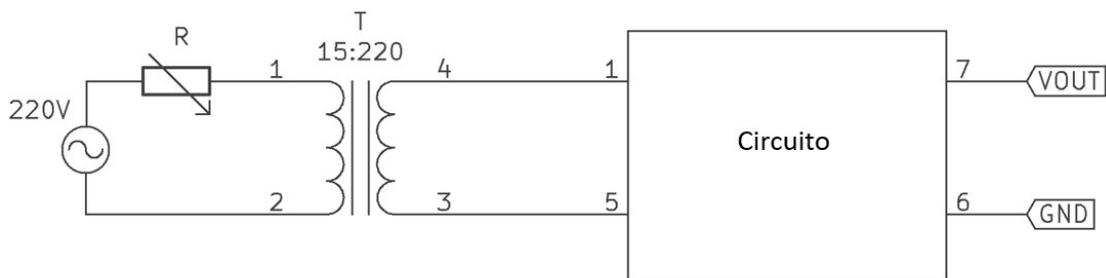


Figura 63: esquema del montaje del prototipo

En este proyecto no se ha llevado a cabo el diseño del microprocesador, por ejemplo, responsable de aportar una señal PWM al driver. Durante el ensayo, se ha utilizado un generador de señal para crear esta señal PWM,  $G$ , de frecuencia 10 kHz. La señal  $G$  se ha conectado a la entrada del driver (ver Figura 64). El generador de señal utilizado dispone de un factor de servicio variable. En los ensayos del prototipo se ha ido ajustando manualmente el factor de servicio según las condiciones del circuito.

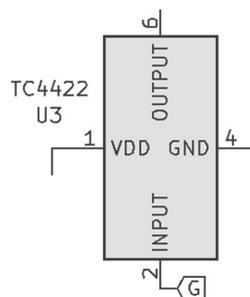


Figura 64: esquema del driver TC4422

## 2. RESULTADOS: VALORES MEDIDOS EN EL PROTOTIPO CON EL CONVERTIDOR CA-CC 2

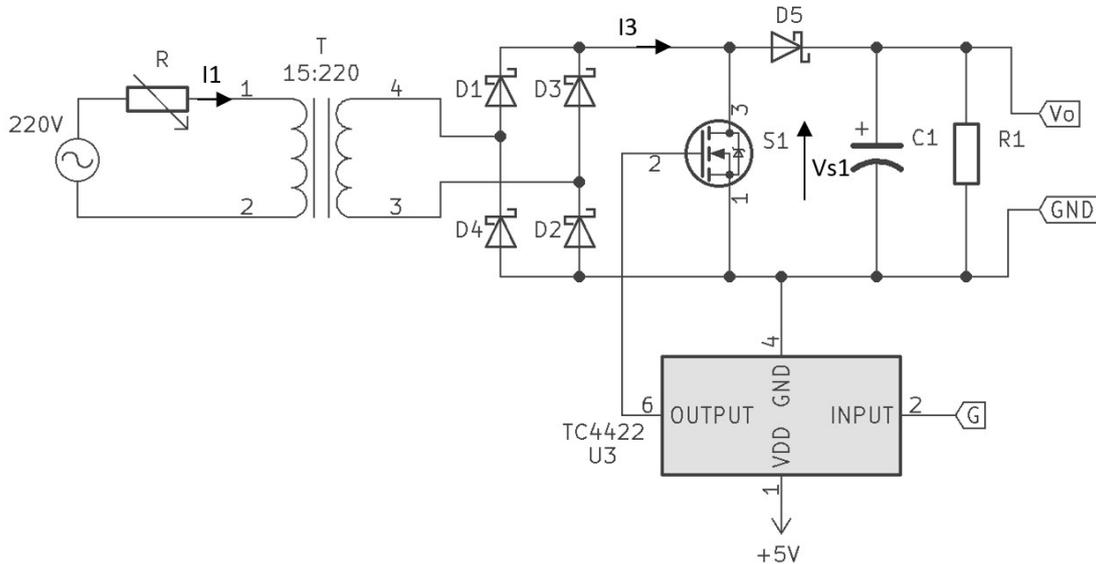


Figura 65: esquema del ensayo del Convertidor CA-CC 2 con el transformador

Se ha ensayado el circuito representado en la Figura 65 modificando el valor de la carga variable (R) y el factor de servicio D. La Tabla 7 muestra los valores reales, junto a los valores que se habían calculado anteriormente en el diseño del circuito, a los que se debe ajustar D para que la tensión de salida,  $V_o$ , sea constante ante las variaciones de  $I_1$ . En este caso, la carga  $R_1$  permanece fija a  $160\Omega$ .

| Convertidor CA-CC 2 |          |            |           |
|---------------------|----------|------------|-----------|
|                     | Cálculos | Resultados |           |
| $I_1$ rms (A)       | D        | D          | $V_o$ (V) |
| 1                   | 0,51     | 0,49       | 5         |
| 1,2                 | 0,425    | 0,411      | 5         |
| 1,4                 | 0,365    | 0,349      | 5         |
| 1,6                 | 0,32     | 0,308      | 5         |
| 1,8                 | 0,285    | 0,272      | 5         |
| 2                   | 0,255    | 0,246      | 5         |

Tabla 7

En la Tabla 7 puede observarse que el comportamiento del circuito es el mismo que el comportamiento teórico. En la próxima figura se han presentado estos resultados de forma gráfica. Visualmente se observa que los valores obtenidos se asemejan mucho a los valores calculados. Sin embargo, existe un pequeño error entre el D calculado y el D medido que disminuye a medida que la corriente aumenta.

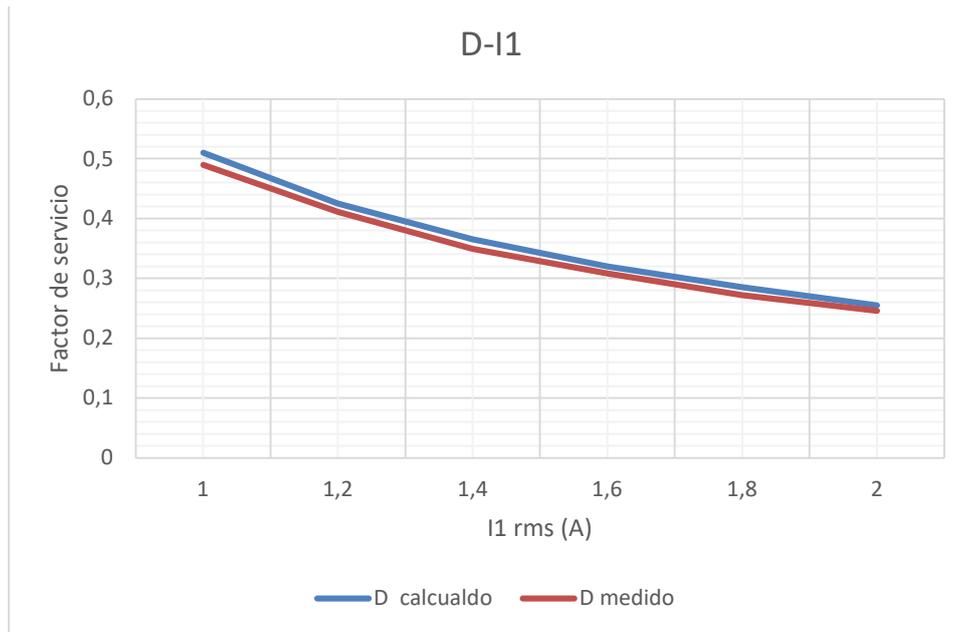


Figura 66: Gráfica D-I1. Compara el factor de servicio calculado frente al medido en el ensayo

A continuación, aparecen las imágenes tomadas con el osciloscopio de las formas de onda de la corriente de entrada al transformador (I1), la corriente a la salida del puente de diodos (I3), La tensión de salida del Convertidor CA-CC 2 (Vo) y la tensión que cae en el interruptor MOSFET (Vs1). Además, se puede observar el factor de servicio, con el que se está operando, a través de la tensión del interruptor (Vs1).



Figura 67: imagen del osciloscopio para una corriente de entrada  $I_1=1A$ , factor de servicio  $D=0,51$  y una tensión de salida  $V_o=5V$



Figura 68: imagen del osciloscopio para una corriente de entrada  $I_1=1A$ , factor de servicio  $D=0,51$  y una tensión de salida  $V_o=5V$

A partir de estas imágenes se puede entender el comportamiento del circuito.  $I_1$  (amarillo), la corriente del primario del transformador (en un dispositivo real sería la corriente que circula por la línea), es una señal senoidal que tiene un valor eficaz  $I_1^{RMS} = 0,984 A$  (ver Figura 67). El transformador induce una corriente en las espiras del secundario ( $I_T$ ), con una relación de transformación 15:220. Esta corriente  $I_T$  circula por el puente de diodos y se obtiene una corriente,  $I_3$  (verde), que es una señal de doble onda, con un valor eficaz  $I_3^{RMS} = 0,049 A$ . La tensión de salida del Convertidor CA-CC 2,  $V_o$  (rosa), no llega a ser una señal continua, y mantiene un rizado a 100Hz. El valor medio de  $V_o$  medido por el osciloscopio es  $V_o=4,968 V$ . Por último, con la señal  $V_{s1}$  se observan las conmutaciones que realiza el interruptor  $S_1$ . Cada vez que el interruptor se activa la tensión  $V_{s1}$  es nula. El interruptor conmuta a una frecuencia de 10kHz. En la Figura 68 se observan más en detalle las conmutaciones del interruptor.

## 2.1. ENSAYO DEL PROTOTIPO COMPLETO

En el diseño del circuito se ha fijado una carga de  $160\Omega$  y se ha estudiado el comportamiento del circuito para esa carga determinada. Al ensayar el circuito con una carga  $R_1$  de  $160\Omega$  se ha comprobado que el circuito funcionaba correctamente. Al añadir los convertidores  $U_1$  y  $U_2$  la carga de salida cambia y, por lo tanto, y cae el valor de la tensión de salida,  $V_o$ . Se recogen los valores obtenidos con el circuito de la Figura 69; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para estudiar el circuito ante cambios en la carga de salida.

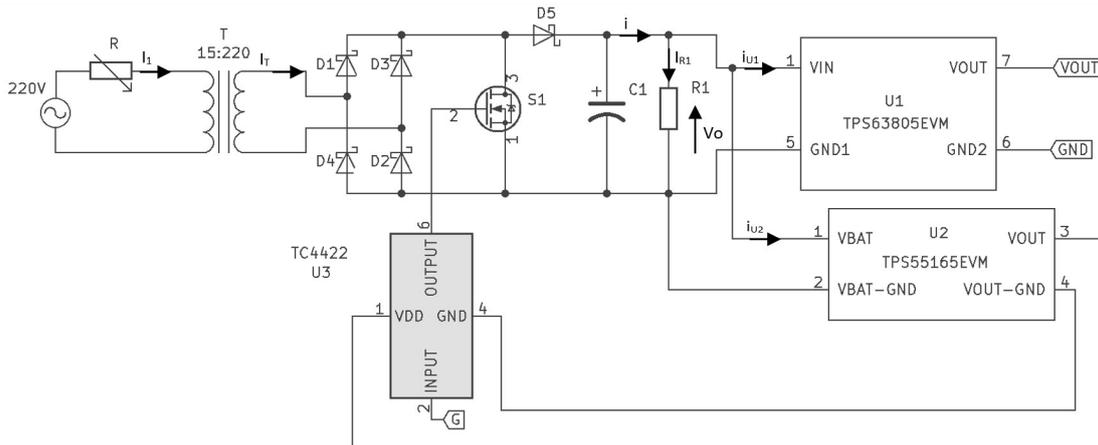


Figura 69: esquema del ensayo del prototipo con el Convertidor CA-CC 2

En el siguiente ensayo se conectan los convertidores  $U_1$  y  $U_2$ . En el momento en el que se conectan los convertidores la tensión cae drásticamente. Modificando el factor de servicio, apenas aumenta la tensión, así que se opta por elevar el valor de la corriente de entrada,  $I_1$ , y con ello, aumentar la potencia aportada. De esta manera aumenta el valor de la tensión  $V_o$  y ambos convertidores tienen una tensión de entrada ( $V_o$ ) suficiente para proporcionar una tensión de salida ( $V_{out}$ ) de 3,3V y VDD de 5V.

La corriente  $i$  alimenta a la carga  $R_1$ , al convertidor  $U_1$  y al convertidor  $U_2$ . Para elevar el valor de  $i$ . Se obtienen los siguientes resultados: (Para  $D=0,51$  y  $R_1=160$ )

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| $I_1^{rms}$           | 1,96A  |
| $I_T^{rms}$           | 132mA  |
| $\langle V_o \rangle$ | 4,21V  |
| $i$                   | 57,2mA |
| $i_{R1}$              | 26,9mA |
| $i_{U1}$              | 13,5mA |
| $i_{U2}$              | 15,8mA |

Tabla 8

Para comprobar la coherencia entre los resultados y las relaciones teóricas:

$$I_T = \frac{I_1 * 15}{220} = \frac{1,96 * 15}{220} = 133mA \quad (29)$$

$$\langle i \rangle = 0,9 * I_T^{rms} * D = 0,9 * 133 * 0,5 = 59,85mA \quad (30)$$

$$\langle i \rangle = i_{R1} + i_{U1} + i_{U2} \quad (31)$$

$$V_o = R_1 * i_{R1} = 160 * 26,9 = 4,3V \quad (32)$$

Efectivamente, los resultados coinciden con las ecuaciones planteadas en los capítulos anteriores.

A continuación, se vuelve a ensayar el prototipo conectando los convertidores U1 y U2 y suprimiendo la resistencia R1 (D=0,5 y R1=∞):

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| $I_1^{rms}$           | 0,92A  |
| $I_T^{rms}$           | 66,1mA |
| $\langle V_o \rangle$ | 3,61V  |
| $i$                   | 28,6mA |
| $i_{U1}$              | 13,2mA |
| $i_{U2}$              | 14,9mA |

Tabla 9

$$I_T = \frac{I_1 * 15}{220} = \frac{0,92 * 15}{220} = 62,7mA \quad (33)$$

$$\langle i \rangle = 0,9 * I_T^{rms} * D = 0,9 * 62,7 * 0,5 = 28,22mA \quad (34)$$

$$\langle i \rangle = i_{U1} + i_{U2} \quad (35)$$

Al igual que en el caso anterior, los resultados cumplen las ecuaciones planteadas en el proyecto.

En la Figura 70 aparece la tensión Vo (rosa), VDD (verde) e Vout (azul) del circuito de la Figura 69. La tensión Vo mantiene el rizado del segundo armónico. Este rizado permanece en la tensión Vo debido a que el condensador no ha terminado de eliminarlo. Aun así, a partir de la Figura 70 se comprueba que la tensión final (Vout) de la fuente de alimentación es continua y la tensión que alimenta el driver (VDD) también. Esto sucede gracias a conectar los convertidores U1 y U2 que, por la realimentación negativa del circuito electrónico, eliminan rizado del segundo armónico.

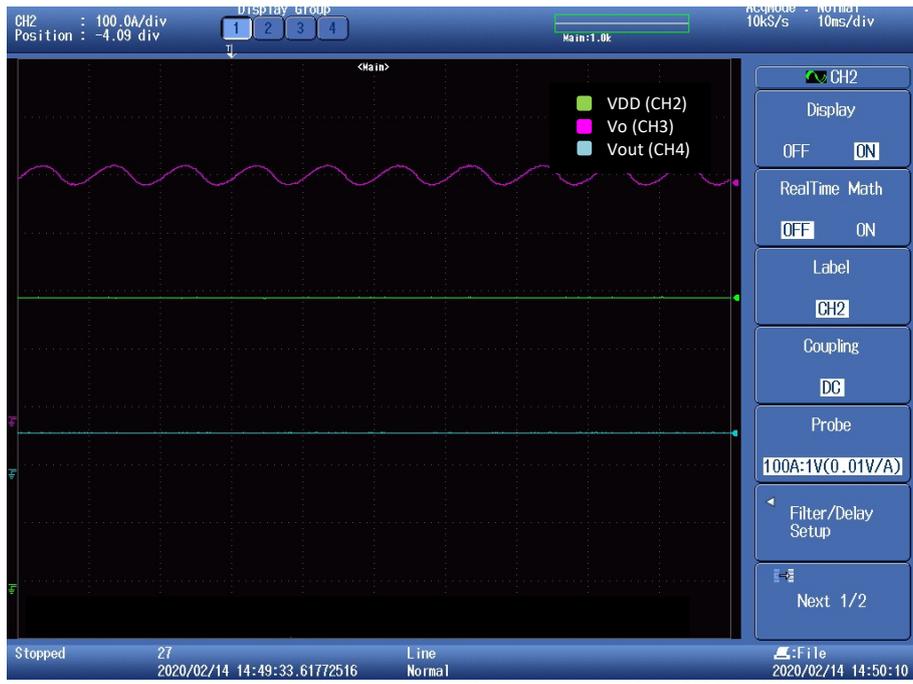


Figura 70: imagen del osciloscopio de las tensiones  $V_o$ ,  $V_{DD}$  y  $V_{out}$

---

### 3. CONCLUSIONES

---

El objetivo principal de este proyecto era montar una fuente de tensión por medio de un método de extracción de energía a partir de la línea eléctrica. Durante el trabajo se han analizado distintos métodos de extracción de energía a través del campo eléctrico y electromagnético y se ha decidido trabajar con un transformador que extrae energía de la línea por inducción. El transformador depende únicamente de la corriente que circula por la línea y, por lo tanto, el dispositivo podría utilizarse en líneas eléctricas de baja, media y alta tensión.

Se han llevado a cabo tres ensayos donde se han probado los circuitos diseñados: el Convertidor CA-CC 1, el Convertidor CA-CC 2 y el Convertidor CA-CC 3. El resultado es que ni el primer ni tercer convertidor han llegado a funcionar.

Primero se llevó a cabo el ensayo del **Convertidor CA-CC 1**. El circuito no respondió correctamente y, en consecuencia, se fundió uno de los MOSFETs. La causa de que se estropease el componente puede ser por haber esperado que los diodos “parásitos” de los dos MOSFETs utilizados (S1 y S2) funcionasen de la misma manera que los diodos schottky utilizados (D1 y D2) para construir el puente de diodos. Quizás los diodos Ds1 y Ds2, de los MOSFETs, no puedan soportar la misma corriente que circula por los diodos D1 y D2, y se estropeen.

Al ensayar el **Convertidor CA-CC 3** se llega a la conclusión de que no es un diseño adecuado para utilizar en la fuente de alimentación. Cuando se planteó el circuito el diseño se centró en que, a través de la ecuación (27), se pudiese mantener constante el valor de la tensión de salida,  $V_o$ , controlando el factor de servicio. Pero, analizando el circuito en profundidad, el problema radica en haber colocado la carga en serie con el interruptor (ver Figura 41). Por lo tanto, mientras S1 este activado la corriente circula por la carga, R1, pero cada vez que el interruptor se desactiva se vuelve un circuito abierto y la carga deja de estar alimentada. De forma que, aunque la tensión media a la salida permanezca constante ante las variaciones de las variables, el circuito conectado al convertidor no está bien alimentado.

Finalmente, se demuestra que el **Convertidor CA-CC 2** funciona correctamente:

- Los valores medidos se aproximan mucho a los cálculos teóricos (ver Figura 66). Al analizar las medidas se demuestra que el funcionamiento del prototipo es muy similar al teórico. Existe un error muy pequeño entre el valor calculado y el medido.
- La corriente que circula por el primario en el ensayo es entre 1 y 2A y por tanto, la corriente inducida es muy pequeña. Además, la potencia entregada en el dispositivo se ve restringida por el convertidor conectado a la salida (U1) y la potencia máxima que el prototipo puede entregar es de 6,6W [3].
- La tensión de salida de la fuente de alimentación,  $V_{out}$ , es continua. A partir de la realimentación negativa de los convertidores U1 y U2 se elimina el rizado del segundo armónico de la tensión  $V_o$ .

En definitiva, se cumplen los objetivos planteados en el proyecto. Se ha creado una fuente de alimentación que extrae energía por inducción y la transforma, a través de un circuito electrónico, en una tensión continua de 3,3V. Se ha conseguido controlar la tensión de salida,  $V_o$ , con el factor de servicio  $V_o$ .

En este proyecto se llevó a cabo el estudio de una alternativa a la alimentación de los equipos de instrumentación tendidos en la línea eléctrica. Se ha construido un prototipo que

responde a una fuente de alimentación y que podría incluirse en la línea eléctrica. Esta, junto con otras alternativas que se hayan propuesto, pueden reemplazar el uso de baterías en la línea eléctrica, que encarecen la implantación de los sistemas de monitorización y, además, exigen un plan de reemplazo periódico. El resultado de esta fuente de alimentación es una solución sencilla y robusta.

---

## 4. TRABAJO FUTURO

---

En este proyecto se ha construido un prototipo de una fuente de alimentación de 3,3V que extrae la energía a partir de un transformador. Sin embargo, es necesario incluir en el prototipo un sistema de control, para controlar el mando de forma automática. Hasta ahora, el proyecto responde a las variaciones de corriente,  $I_1$ , y de carga,  $R_1$ , manteniendo la tensión de salida,  $V_o$ , en 5V. Pero, el ajuste de  $V_o$ , a partir del factor de servicio, se realiza manualmente. En esta sección se deja propuesto como podría resolverse la automatización de D.

La Figura 71 es un diagrama de bloques del prototipo, la planta  $P(s)$ , con un control,  $C(s)$ , en lazo cerrado.

- Entrada: tensión de referencia ( $V_{ref}=5V$ ) y las perturbaciones ( $\Delta I_1$  y  $\Delta R_1$ )
- Mando: factor de servicio (D), variable a controlar
- Salida: tensión de salida ( $V_o$ )

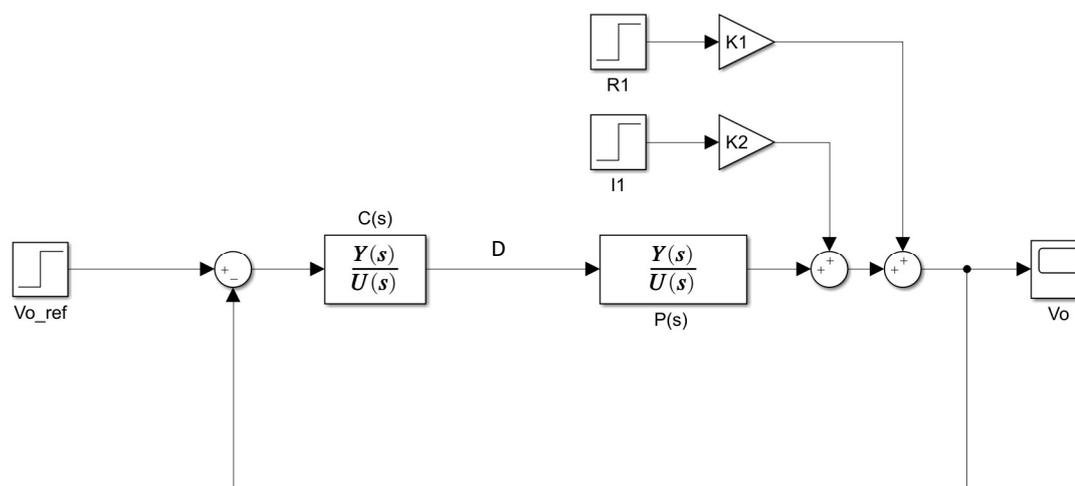


Figura 71: Diagrama de bloques del prototipo con el control

Es necesario diseñar el control  $C(s)$ . Una opción podría ser diseñar un control PI para eliminar el error completamente en régimen permanente, entre la salida y la tensión de referencia, aunque sería muy lento. Otra opción sería utilizar un control PID.

Una vez se diseña el control se obtiene la lógica matemática. Para controlar el mando de manera automática es necesario implementar la lógica matemática en un hardware. Podría programarse en un microprocesador, pero puede que esta opción consumiera mucha potencia. Una segunda opción sería utilizar un circuito analógico con la misma lógica matemática.

En el hardware planteado (ver Figura 72), entran las medidas ( $V_{o\_ref}$ ,  $\Delta I_1$ ,  $\Delta R_1$  y  $V_o$ ) y, en el caso del microprocesador el output sería la señal PWM y, en el caso del circuito electrónico, la tensión ( $V_{f\_s}$ ). Cuando se diseña el circuito electrónico es necesario añadirle un circuito integrado LM 555, por ejemplo.

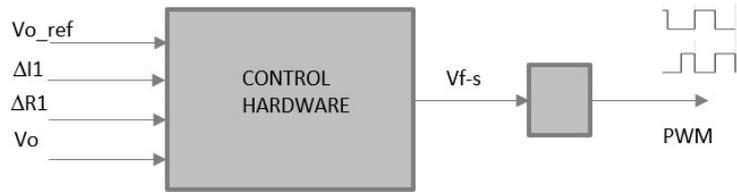


Figura 72: esquema hardware

El circuito integrado LM 555 [18] es un comparador con el que se puede generar una señal PWM comparando el valor de la tensión de entrada ( $V_{f-s}$ ) con pulsos en rampa (ver Figura 73).

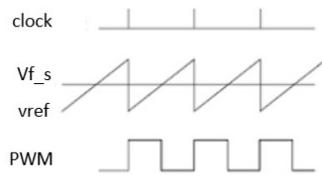


Figura 73

# ANEXO I

## PRESUPUESTO

La Figura 74 presenta el presupuesto calculado para la realización del prototipo. Se han contado los componentes utilizados en la construcción de los tres convertidores diseñados en el proyecto. El resto de los componentes se han mantenido para el ensayo de cada uno de los circuitos.

Además, se han añadido, de manera aproximada, las horas de trabajo dedicadas al montaje de los prototipos.

| Nº | Producto            | Nº ref. fabric. | Precio unitario € | Nº de unidades | Precio total €  |
|----|---------------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------------|
| 1  | Transformador       | EN-61558        | 49,39             | 1              | 49,39           |
| 2  | Convertidor CC-CC   | TPS63805EVM-026 | 45,25             | 1              | 45,25           |
| 3  | Convertidor CC-CC   | TPS55165Q1-EVM  | 60,75             | 1              | 60,75           |
| 4  | Puente rectificador | GBJ25005-F      | 1,736             | 2              | 3,472           |
| 5  | MOSFET              | FDD8447L        | 0,818             | 4              | 3,272           |
| 6  | Driver MOSFET       | TC4421          | 2,55              | 3              | 7,65            |
| 7  | Diodo schottky      | 1N5822          | 0,33              | 3              | 0,99            |
| 8  | Condensador 220µF   | EEH-ZC1V221P    | 2,68              | 3              | 8,04            |
| 9  | Resistencia 47Ω     | HS15 47R J      | 1,94              | 1              | 1,94            |
| 10 | Resistencia 160Ω    | HS25 150R J     | 1,78              | 2              | 3,56            |
| 11 | horas de trabajo    |                 | 8                 | 120            | 960             |
|    | <b>Gasto total</b>  |                 |                   |                | <b>1144,314</b> |

Figura 74: tabla del presupuesto de la realización del prototipo

# ANEXO II

## OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, donde se programaron 17 objetivos. Estos objetivos van desde la eliminación de la pobreza hasta combatir el cambio climático. Para poder llegar a cumplir estos objetivos, es realmente importante que cada uno genere un impacto positivo desde su profesión. Asimismo, al realizar un Trabajo de Fin de Grado también se le debe dar importancia al impacto que pueda generar en la sostenibilidad. En este caso, el **Prototipo de fuente de alimentación de 3,3V** podría contribuir a alguno de los ODSs.

La realización de este trabajo podría reducir de manera indirecta el impacto ambiental del sistema de distribución eléctrica. En el proyecto se ha buscado un método alternativo para la alimentación de los sistemas de monitorización de las líneas eléctricas de alta o media tensión. La propuesta desarrollada podría contribuir, a través de un método simple y con una instalación sencilla, a construir una red monitorizada y más inteligente.

Contribuir a una red eléctrica más inteligente, puede reducir el impacto ambiental, proponer un sistema energético eficiente y sostenible, reducir las pérdidas con altos niveles de calidad y permitir potenciar el uso de energías renovables. Estas consecuencias entran dentro de algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: ODS 7, energía asequible y no contaminante, ODS11, ciudades y comunidades sostenibles, y ODS13, acción por el clima.

La reducción de las pérdidas producidas en las distribuciones de las líneas eléctricas se consigue gracias a que es capaz de detectar potenciales fallos que pueden en tiempo real. Manteniendo monitorizados parámetros como la temperatura, vibraciones, corrosión del material [8] o el voltaje o corriente [2] en las líneas, estas podrán operar de manera más eficiente.

Una red inteligente también obtiene información de proveedores y consumidores, de tal forma que consigue optimizar el uso de energías renovables. Las energías renovables presentan el reto de que no pueden producir energía de manera constante y requieren almacenamiento. A través de la red inteligente es posible pronosticar la demanda de energía y la producción eléctrica necesaria a largo plazo. Ello permite optimizar el uso energías renovables.

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] H. H. a. J. W. Feng Guo, «Energy Harvesting Devices for High Voltage Transmission Line Monitoring,» de *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, USA, 2011.
- [2] D. D. F. L. Rohit Moghe, «Powering Low-Cost Utility Sensors using Energy Harvesting,» de *Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications*, Birmingham, UK, 2011.
- [3] Texas Instruments, «TPS63805EVM-026,» 06 2018. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/slvubg1/slvubg1.pdf>. [Último acceso: 14 01 2020].
- [4] Española, Red Eléctrica, «Red Eléctrica Española,» 24 11 2019. [En línea]. Available: <https://www.ree.es/es/conocenos/ree-en-2-minutos>. [Último acceso: 13 12 2019].
- [5] X. H. L. T. J. G. a. H. L. Wei Wang, «Optimization Design of an Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines,» *Energies*, vol. 9, n° 4, p. 16, 2016.
- [6] D. Gabor, *Inventing the Future*, Michigan: Secker & Warburg, 1963.
- [7] T. K. M. B. a. O. K. Xinming Zhao, «Energy harvesting for overhead power line monitoring,» de *International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, Chemnitz, Germany, 2012.
- [8] T. B. a. G. B. Hubert Zangl, «A Feasibility Study on Autonomous Online Condition Monitoring of High-Voltage Overhead Power Lines,» *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 58, n° 5, pp. 1789 - 1796, 2009.
- [9] Texas Instruments, «TPS5516xQ1-EVM Evaluation Module for 1-A Single Inductor Buck-Boost Converter,» 11 2017. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/slvuay1/slvuay1.pdf>. [Último acceso: 11 01 2020].
- [10] Microchip, «TC4421/TC4422 9A High-Speed MOSFET Drivers,» 29 11 2012. [En línea]. Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/20001420f.pdf>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [11] D. W. Hart, *Introduction to Power Electronics*, Valparaiso, Indiana: Prentice Hall, 1997.
- [12] W. R. a. T. U. Ned Mohan, *Power Electronics: Converters, Applications and design*, New York: JOHN WILEY & SONS INC, 1995.
- [13] Fairchild, «FDD8447L 40V N-Channel PowerTrench MOSFET,» 03 2015. [En línea]. Available: <https://www.mouser.com/datasheet/2/149/FDD8447L-888879.pdf>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [14] Diodes Incorporated, «GBJ25005 - GBJ2510 25A GLASS PASSIVATED BRIDGE RECTIFIER,» 10 2009. [En línea]. Available: <https://docs.rs-online.com/8dbc/0900766b81384098.pdf>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [15] ST, «1N582x Low Drop Power Rectifier,» 2003. [En línea]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/1n5822.pdf>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [16] Panasonic, «Conductive Polymer Hybrid Aluminum Electrolytic Capacitors,» 01 04 2019. [En línea]. Available: [http://www.farnell.com/datasheets/2842915.pdf?\\_ga=2.62661995.610303632.1579196442-71057171.1571675285&\\_gac=1.58701912.1578393956.Cj0KCQiA9dDwBRC9ARIsABbedBOEp78IQ-DmjaNUS4P\\_hGL29Rvr9yWLiUqsL\\_xOF1blODRMLopNa6waAjj7EALw\\_wcB](http://www.farnell.com/datasheets/2842915.pdf?_ga=2.62661995.610303632.1579196442-71057171.1571675285&_gac=1.58701912.1578393956.Cj0KCQiA9dDwBRC9ARIsABbedBOEp78IQ-DmjaNUS4P_hGL29Rvr9yWLiUqsL_xOF1blODRMLopNa6waAjj7EALw_wcB). [Último acceso: 10 01 2020].
- [17] Arcol, «HS Aluminium Housed Resistors,» 14 12 2008. [En línea]. Available: <http://www.arcolresistors.com/wp-content/uploads/2014/03/HS-Datasheet.pdf>. [Último acceso: 10 01 2020].
- [18] «LM555QML,» TEXAS INSTRUMENTS, 08 2015. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm555qml.pdf>. [Último acceso: 01 03 2020].
- [19] H. Farhangi, «The path of the smart grid,» *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, n° 1, pp. 18 - 28, 2010.

- [20] R. K. Khosrow Moslehi, «A Reliability Perspective of the Smart Grid,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, n° 1, pp. 57 - 64, 2012.
- [21] Balogh, Laszlo, «Fundamentals of MOSFET and IGBT Gate Driver Circuits, Texas Instruments,» 03 2017. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/ml/slva618a/slva618a.pdf>. [Último acceso: 12 01 2020].
- [22] Endesa, «Redes inteligentes-Endesa,» [En línea]. Available: <https://www.endesa.com/es/sostenibilidad/a201610-redes-inteligentes-smart-grids.html>. [Último acceso: 2020 01 22].