



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

**MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**  
**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**DISEÑO EN MATLAB DE UN RECTIFICADOR DE  
BAJA POTENCIA PARA ALIMENTACIÓN**

Autor: D. Roberto Soladana Monasterio  
Tutor: D. Juan Ignacio Lobo Salgado

Valladolid, mayo, 2022



## RESUMEN

Hoy en día, los rectificadores son utilizados en multitud de aplicaciones, tanto domésticas, en los cargadores de teléfonos móviles, como industriales, en el uso de fuentes de alimentación para cargas en corriente continua, motores o autómatas.

El objetivo de este trabajo de fin de máster es realizar diferentes diseños de rectificadores de baja potencia en MATLAB, un software muy utilizado en ingeniería.

Como introducción a los convertidores CA/CC, primero se describe su funcionamiento y los semiconductores implicados en la rectificación. Posteriormente, se muestran las librerías y bloques utilizados para la realizar las simulaciones en el software de MATLAB, en el entorno Simulink.

Después, se explican las diferentes topologías de rectificadores y se implementan en el software, obteniéndose los resultados más característicos, como las formas de onda y rendimientos de los montajes.

Finalmente, se obtienen los resultados de la simulación, las conclusiones en base a los mismos y se realiza un estudio económico del proyecto llevado a cabo.

**PALABRAS CLAVE:** Electrónica de potencia, rectificadores, semiconductores, control, MATLAB.

## ABSTRACT

Nowadays, rectifiers are used in a multitude of applications, both domestic, in mobile phone chargers, and industrial, in the use of power supplies for direct current loads, engines or automatons.

The purpose of this thesis is to carry out different designs of low power rectifiers in MATLAB, a software widely used in engineering.

As an introduction to AC/DC converters, their functioning and the semiconductors involved in rectification are firstly described. Later, the libraries and blocks used to perform the simulations in MATLAB, in the Simulink environment, are shown.

Afterwards, the different topologies of rectifiers are explained and implemented in the software, obtaining the most characteristic results, such as the waveforms and performance of the topologies.

Finally, the results of the simulation are obtained, the conclusions based on them, and an economic study of the project is carried out.

**KEYWORDS:** Power electronics, rectifiers, semiconductors, control, MATLAB.



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

---

**Máster en Ingeniería Industrial**



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1.- Introducción a los sistemas electrónicos de potencia .....	1
1.2.- Objetivos.....	5
2.- ESTUDIO DE SEMICONDUCTORES: DIODOS Y TIRISTORES .....	7
2.1.- Diodos.....	7
2.2.- Tiristores .....	11
3.- LIBRERIAS DE SIMULINK, MATLAB .....	15
4.- ANÁLISIS DE TOPOLOGÍAS DE RECTIFICADORES DE BAJA POTENCIA.....	19
4.1.- Introducción a los rectificadores de potencia .....	19
4.2.- Rectificadores no controlados .....	24
4.3.- Rectificadores controlados .....	33
5.- DISEÑO Y SIMULACIÓN CON MATALAB DE LAS CONFIGURACIONES VÁLIDAS .....	37
5.1.- Media onda no controlado .....	37
5.2.- Media onda controlado .....	50
5.3.- Puente no controlado .....	63
5.4.- Puente controlado .....	71
6.- ESTUDIO ECONÓMICO .....	79
6.1- Etapas del proyecto.....	79
6.2.- Presupuesto .....	80
7.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	83
7.1.- Conclusiones.....	83
7.2.- Líneas futuras .....	84
8.- BIBLIOGRAFÍA .....	85



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

---

**Máster en Ingeniería Industrial**

# 1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1.- Introducción a los sistemas electrónicos de potencia

### Definición

La Electrónica de Potencia se encarga de la aplicación de los dispositivos semiconductores al control y la conversión de la energía eléctrica.

- **Control:** Los sistemas electrónicos de potencia regulan la cantidad y el sentido de la energía eléctrica transmitida entre dos sistemas eléctricos (generalmente uno de ellos será la fuente de energía y el otro la carga).

- **Conversión:** Los sistemas electrónicos de potencia son capaces de modificar las características de la energía eléctrica transmitida (Valor eficaz, frecuencia, número fases...) para adecuarla a los sistemas eléctricos conectados.



Figura 1. Concepto de Sistema Electrónico de Potencia. Elaboración propia

Aunque la conversión de energía eléctrica pueda realizarse también mediante procedimientos electromecánicos, los sistemas electrónicos de potencia presentan una serie de ventajas:

- Mayor flexibilidad y más posibilidades de control.
- Mayor estabilidad y mayor rapidez de respuesta.
- Ausencia de vibraciones.
- Menor mantenimiento

En la figura 2 se muestra un diagrama de bloques general de un sistema electrónico de potencia, en el que se incluyen los siguientes elementos:

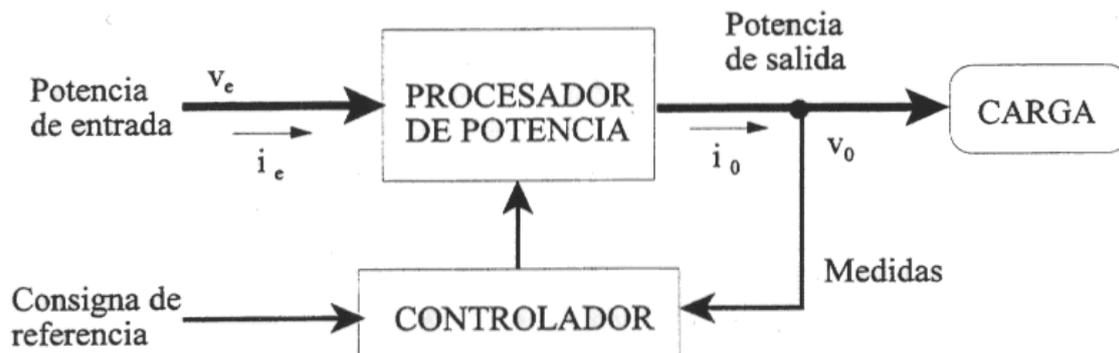


Figura 2. Diagrama general de un Sistema Electrónico de Potencia. Fuente: [1]

- **Potencia de entrada:** Procedente de la fuente de energía primaria (red de CA, baterías, generadores fotovoltaicos...).
- **Potencia de salida:** Tendrá las características que necesita la carga (tensión, frecuencia, número de fases) que pueden no coincidir con las del sistema de alimentación.
- **Procesador de potencia:** Estructura formada por dispositivos semiconductores de potencia (y a veces también pasivos: L, C y R). Los semiconductores controlados dispondrán además de su circuito de excitación. Los semiconductores trabajarán en conmutación: bloqueo y conducción.

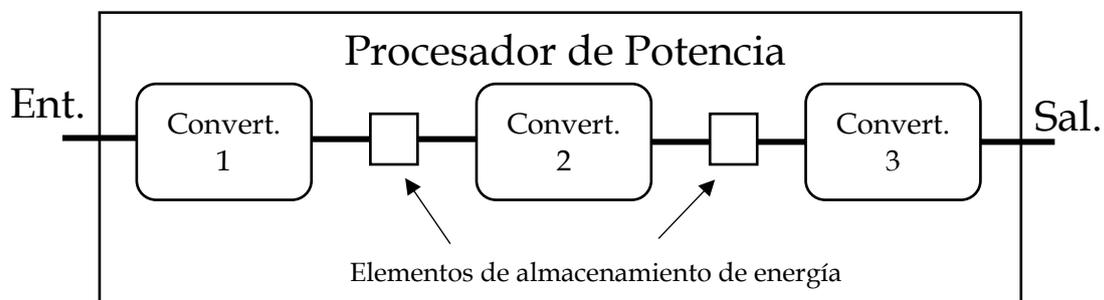


Figura 3. Procesador de potencia formado por tres convertidores. Elaboración propia

La conversión de energía realizada por el procesador de potencia puede llevarse a cabo en varias etapas, cada una de las cuales es desarrollada por un convertidor de potencia. El desacople entre los convertidores se consigue intercalando elementos de almacenamiento de energía (condensadores o bobinas).

La figura 4 muestra un ejemplo típico de un procesador de potencia formado por dos convertidores:

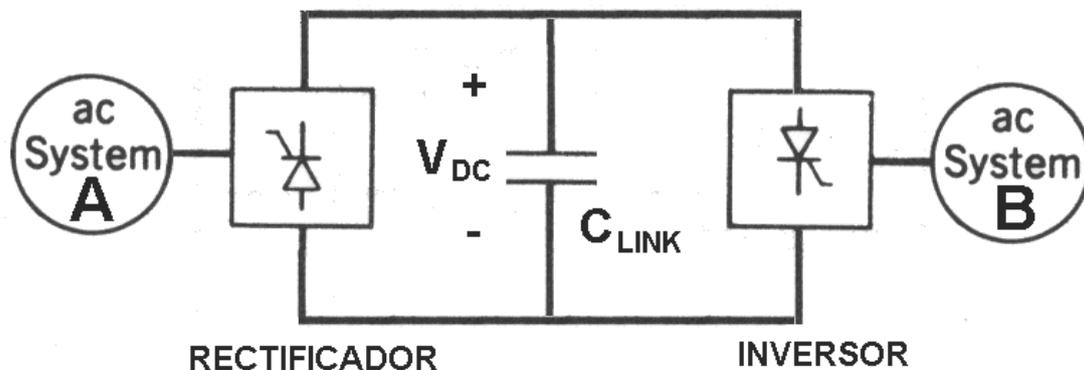


Figura 4. Ejemplo: Conversión CA/CA mediante una etapa intermedia de CC. Fuente: [1]



- **Controlador:** Dispositivo electrónico encargado de generar las necesarias órdenes de control de los semiconductores. La actuación de los semiconductores se determina en función de las consignas aplicadas al sistema y de la situación actual del sistema establecida por las medidas adecuadas. El control estará implementado por un procesador digital: Microprocesador, microcontrolador, PIC, DSP, etc.

## Aplicaciones

Se pueden destacar los siguientes ámbitos de aplicación de la electrónica de potencia:

### 1. Sistemas Eléctricos de Potencia:

- Acondicionamiento de redes de distribución (compensación de reactiva, filtrado de armónicos, equilibrado de fases).
- Transporte (FACTS - Aumento de la capacidad de las redes actuales, enlaces en continua HVDC).

### 2. Aplicaciones industriales:

- Hornos de inducción. Soldadura eléctrica.
- Procesos electroquímicos (galvanoplastia, metalizados, anodizado, etc).
- Accionamiento de motores CC o CA (control de par y velocidad en puentes y grúas, bobinadoras, trenes de laminación, etc).
- Sistemas de alimentación ininterrumpida para cargas críticas.
- Robótica (control de par, posición y velocidad de los motores).

### 3. Energías renovables:

- Control de aerogeneradores (velocidad variable).
- Plantas fotovoltaicas (aisladas, conectadas a red).
- Cargadores de baterías.
- Células de combustible ('fuel cells').

### 4. Aplicaciones domésticas:

- Alimentación de equipos electrónicos (imagen y sonido, telefonía, máquinas herramientas, computadores, etc).
- Equipos de iluminación de bajo consumo (balastos para fluorescentes, iluminación por LED).
- Reguladores de iluminación.
- Placas de inducción.
- Accionamientos de motores en electrodomésticos.

### 5. Transportes:

- Vehículos eléctricos e híbridos (carretillas, vehículos urbanos, etc).
- Trenes, metro, AVE. Vehículos espaciales.

### Clasificación de los convertidores de potencia

La clasificación más habitual se realiza en función de las características de la energía eléctrica en la entrada y en la salida del convertidor. Se distinguen de esta forma 4 categorías:

Convertidores CA/CC	
Convertidores CA/CA	
Convertidores CC/CA	
Convertidores CC/CC	

Figura 5. Clasificación de los convertidores de potencia. Fuente: [1]



## 1.2.- Objetivos

- Explicar el funcionamiento básico de los convertidores de potencia y sus aplicaciones.
- Explicar el comportamiento de los dispositivos semiconductores involucrados en los convertidores de CA/CC, los diodos y los tiristores.
- Explicar los principales bloques y librerías de Simulink (MATLAB) necesarios para llevar a cabo las simulaciones, para la obtención de datos y para la visualización de gráficas.
- Describir los tipos de rectificadores atendiendo a diferentes criterios.
- Definir los parámetros característicos más importantes para el análisis de los rectificadores.
- Analizar las distintas topologías de rectificadores y explicar cómo influye el tipo de carga en las formas de onda de corrientes y tensiones por las mismas.
- Implementar en Simulink las topologías más interesantes y realizar las simulaciones de cada una.
- Analizar los resultados obtenidos de cada simulación, como las formas de onda que no se podrían calcular de forma analítica de una manera sencilla.
- Obtener el rendimiento de cada topología para diferentes cargas y comparar los distintos montajes.
- Realizar un estudio económico para tener una idea aproximada del coste que tendría realizar un proyecto con características similares.



---

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

---

Máster en Ingeniería Industrial

## 2.- ESTUDIO DE SEMICONDUCTORES: DIODOS Y TIRISTORES

### 2.1.- Diodos

Los diodos son dispositivos semiconductores formados por dos regiones de silicio con dopado de distinto signo (unión PN) que permiten el paso de la corriente en un único sentido.

Los diodos de potencia se caracterizan porque en estado de conducción, deben ser capaces de soportar una alta intensidad con una pequeña caída de tensión. En sentido inverso, deben ser capaces de soportar una fuerte tensión negativa de ánodo con una pequeña intensidad de fuga.

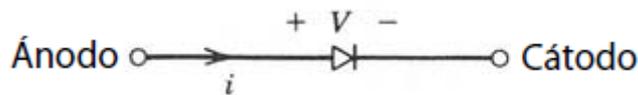


Figura 6. Simbología de un diodo. Fuente: [3]

### Ecuación del diodo

Se puede modelar el comportamiento de un diodo mediante la siguiente expresión:

$$I_{PN} = I_s \cdot \left( e^{\frac{qV_{PN}}{KT}} - 1 \right)$$

Siendo:

$I_{PN}$ : la corriente por el diodo

$I_s$ : la corriente de saturación del diodo

$V_{PN}$ : la caída de tensión del diodo

$q$ : la carga del electrón

$K$ : la constante de Boltzman

$T$ : la temperatura de la unión

## Características estáticas

A partir de la expresión anterior, se puede graficar la curva característica I-V de un diodo como en la siguiente figura:

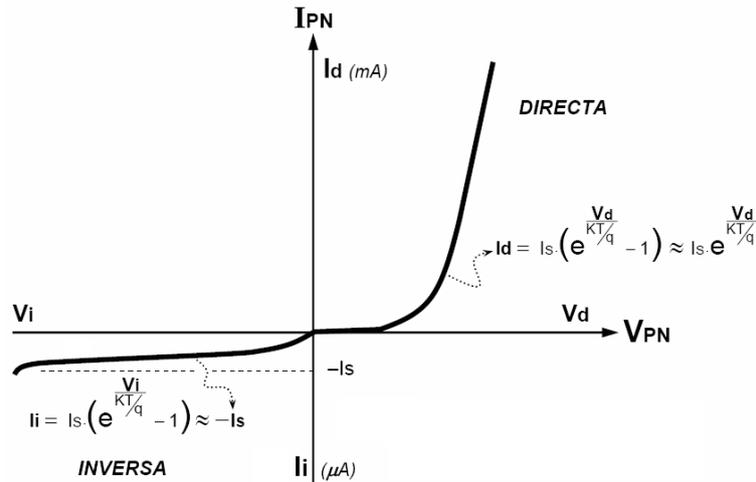


Figura 7. Característica I-V de un diodo. Fuente: [4]

Se pueden apreciar dos zonas diferenciadas, según la polarización de la unión PN, polarización directa y polarización inversa.

### Polarización directa

Cuando se aplica una tensión positiva entre ánodo y cátodo, el diodo se polariza en directa. Esto quiere decir que el diodo conduce (funcionando como un interruptor cerrado), siempre y cuando se supere la tensión umbral, típicamente de unos 0.6V.

### Polarización inversa

Cuando se aplica una tensión negativa entre ánodo y cátodo, el diodo se polariza en inversa. Esto quiere decir que el diodo funciona en modo bloqueo (como un interruptor abierto). Realmente circulará una corriente en sentido contrario (corriente de fuga) del orden de los nano amperios, por lo que se puede considerar despreciable.

### Modelos estáticos del diodo

Los distintos modelos del diodo en su región directa se representan en la figura 8. Estos modelos facilitan los cálculos a realizar, para lo cual se deberá escoger el modelo adecuado según el nivel de precisión que se necesite.

Estos modelos se suelen emplear para cálculos a mano, reservando modelos más complejos para programas de simulación. Dichos modelos suelen ser proporcionados por el fabricante, e incluso pueden incluirse en las librerías del programa.

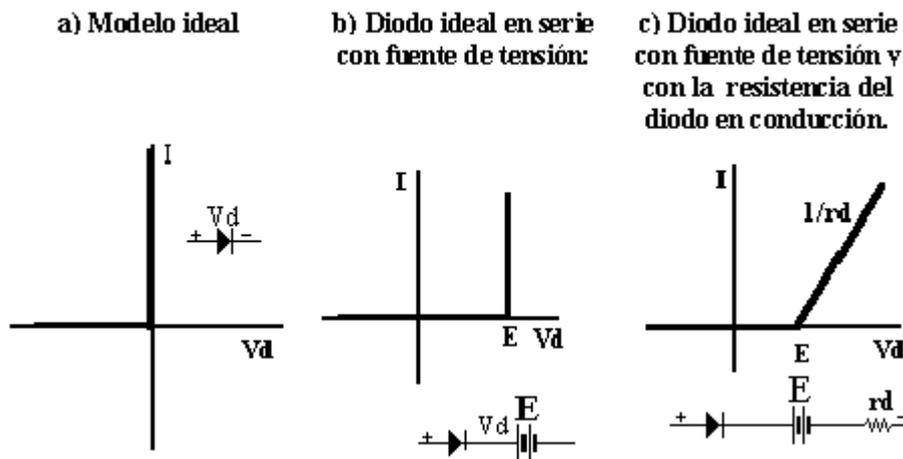


Figura 8. Modelos estáticos de un diodo. Fuente: [2]

### Características dinámicas

Un aspecto importante a señalar en los diodos de potencia es su comportamiento en conmutación, fundamentalmente cuando pasan de conducción a bloqueo (Reverse Recovery). Durante esa transición, la corriente no se extingue instantáneamente, sino que durante un tiempo ( $t_{rr}$ ) el diodo conduce en sentido contrario, lo que puede provocar cortocircuitos en los dispositivos de potencia.

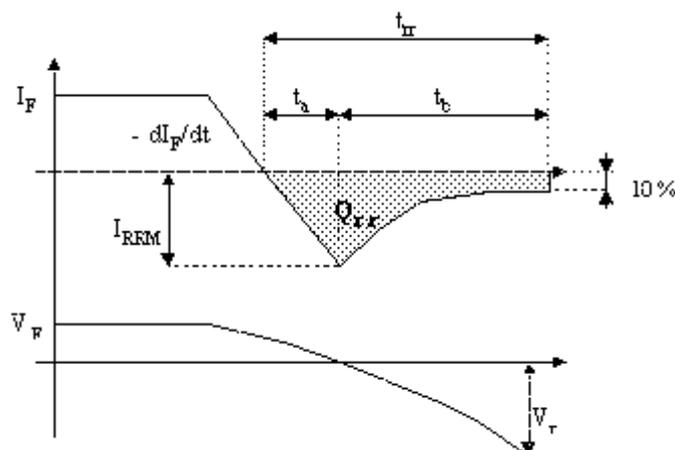


Figura 9. Evolución de la corriente y tensión durante el paso de conducción a bloqueo. Fuente: [2]



Además, la disipación de potencia durante la conmutación no es nula ya que se produce circulación de corriente a medida que va creciendo la tensión inversa aplicada al diodo.

El proceso de bloqueo del diodo viene caracterizado por tres parámetros: La duración del proceso ( $t_{rr}$ ), la máxima corriente conducida en inversa ( $I_{RRM}$ ) y la carga transferida durante la conmutación ( $Q_{rr}$ ). Precisamente estos parámetros son los que diferencian fundamentalmente los distintos tipos de diodos.

## Tipos de diodos

### a) Diodos de uso general:

- Manejan altos niveles de corriente (hasta  $5000 A_{AV}$ ) y tensión inversa (hasta  $6000 V_{pico}$ )
- Su tiempo de recuperación en inversa,  $t_{rr}$ , es elevado (hasta  $25 \mu s$ ).
- Se utilizan en aplicaciones de rectificación o baja velocidad de conmutación, en las cuales, el tiempo de recuperación no es un parámetro crítico.

### b) Diodos de recuperación rápida:

- Poseen un tiempo de recuperación reducido, en torno a  $5 \mu s$ .
- Manejan corrientes menores (hasta  $800 A_{AV}$ ).
- Suelen utilizarse para frecuencias de conmutación medias en convertidores CC/CC y CC/CA.

### c) Diodos Schottky:

- Son los diodos más rápidos y los que tienen menores pérdidas por conducción y conmutación ( $Q_{rr}$  muy pequeño).
- Tienen valores máximos de tensión inversa reducidos (hasta  $200 V$ ).

## 2.2.- Tiristores

Los tiristores son dispositivos semiconductores formados por cuatro capas y tres terminales, como se puede observar en la figura 10.

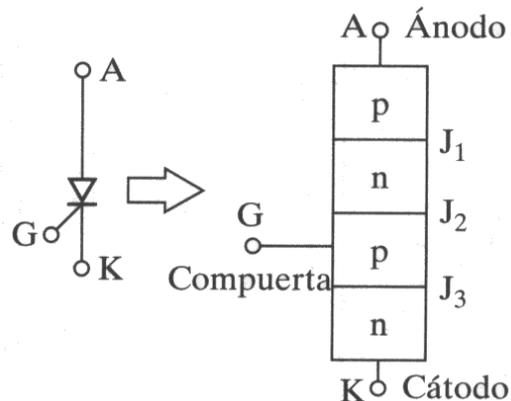


Figura 10. Simbología y estructura básica de un tiristor. Fuente: [1]

Permiten la corriente en un sentido, como los diodos. La principal diferencia con los diodos que cuando la tensión entre ánodo y cátodo supera el valor umbral, el tiristor no conducirá hasta que se active la puerta.

Un parámetro importante de los tiristores es el ángulo de disparo, que es el instante en el que se alimenta la puerta del tiristor y este empieza a conducir, como se puede observar en la figura 11.

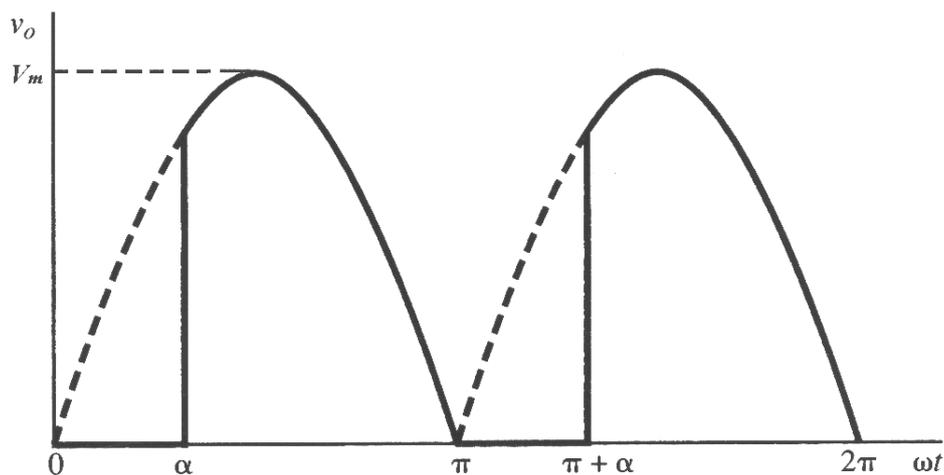


Figura 11. Ángulo de disparo  $\alpha$  de un tiristor. Fuente: [1]

Teniendo un control sobre la puerta se puede obtener una tensión de salida de corriente continua de magnitud variable.

Además, los tiristores soportan elevadas tensiones y elevadas corrientes (altas potencias).

## Características estáticas

En la siguiente figura se puede observar la curva característica I-V de un tiristor:

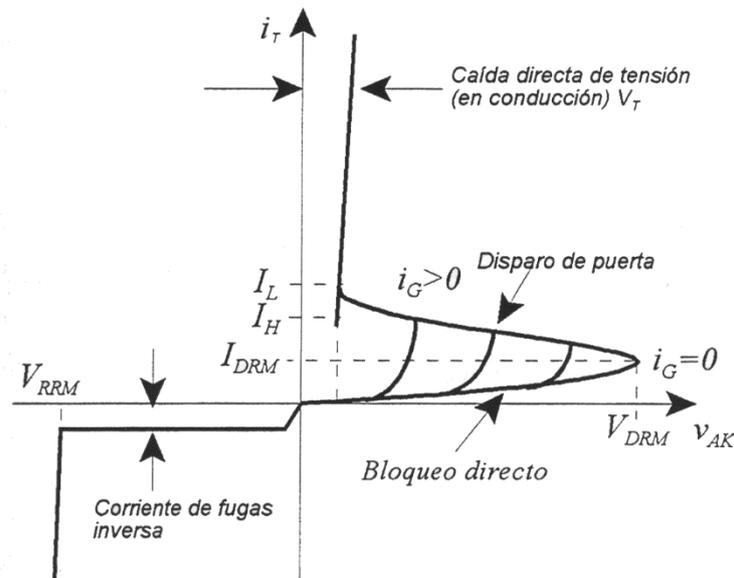


Figura 12. Curva característica de un tiristor. Fuente: [1]

Se pueden apreciar distintas regiones, según la tensión aplicada entre ánodo y cátodo y el control de la puerta.

### a) Polarización inversa (Tensión ánodo-cátodo negativa):

- Se comporta como un diodo en inversa (Uniones J1 y J3 en inversa). Circula por él únicamente una corriente de fuga.
- El aumento de la tensión aplicada en inversa puede producir la avalancha de las uniones J1 y J3 y el aumento súbito de corriente (ruptura en sentido inverso).

### b) Polarización directa (Tensión ánodo-cátodo positiva):

#### b.1) Bloqueo directo:

- El tiristor se comporta como un interruptor abierto (tiristor desactivado - OFF). Soporta grandes caídas de tensión en directa con corrientes de fugas muy pequeñas (unión J2 en inversa).
- Si la tensión directa aplicada supera un cierto umbral, la unión J2 entra en avalancha y el tiristor comienza a conducir (Activación del tiristor por tensión directa).

b.2) Conducción:

- El tiristor se comporta como un interruptor cerrado (tiristor activado - ON). Su caída de tensión es muy pequeña y la corriente está sólo limitada por el circuito externo.
- El tiristor en conducción puede modelarse a partir de una tensión directa,  $V_T$ , y una resistencia dinámica directa,  $r_D$ :

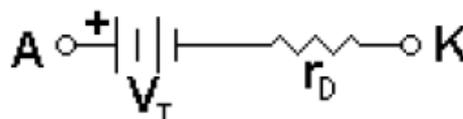


Figura 13. Modelo de un tiristor. Fuente: [1]

- Normalmente, la conducción se inicia aplicando una tensión positiva entre la puerta y el cátodo (disparo del tiristor).
- Si la corriente que establece el circuito por el tiristor es superior a  $I_L$  (corriente de enganche) el estado de conducción se mantiene, aunque desaparezca la tensión positiva en la puerta.
- El tiristor sólo puede bloquearse por la aplicación de una tensión ánodo-cátodo negativa o por la extinción de la corriente que establece el circuito a través del tiristor (corriente inferior a  $I_H$ , corriente de mantenimiento).
- Aunque el tiristor puede activarse por una sobretensión directa, no es una forma práctica de hacerlo.

### Características dinámicas

El proceso de apagado es similar al de extinción en un diodo de potencia.

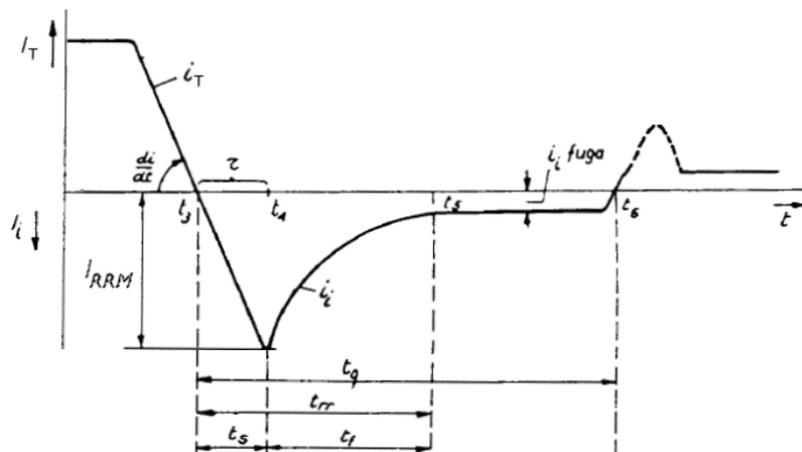


Figura 14. Evolución de la corriente durante el paso de conducción a bloqueo en un tiristor.



El proceso de extinción viene caracterizado por los parámetros  $t_{rr}$ ,  $I_{RRM}$  y  $Q_{rr}$ . Pero en los tiristores se define además un nuevo parámetro,  $t_q$  (Turn-off time), tiempo de extinción. Durante ese intervalo de tiempo no se puede reaplicar tensión directa al tiristor pues se produciría un nuevo encendido.

## Tipos de tiristores

De forma genérica se denomina tiristor al “Rectificador controlado de silicio” (SCR), pero la familia de los tiristores incluye otros, entre ellos:

- **GTO** (Gate turn-off thyristor). Estos dispositivos admiten el apagado por puerta mediante un pulso de corriente negativa de valor muy elevado (prácticamente un tercio de la corriente principal). Su empleo hoy en día es poco significativo, ya que si la corriente manejada no es extremadamente alta se pueden sustituir por dispositivos controlados como el IGBT y, en el caso de corrientes muy altas, se utilizan dispositivos como el MCT y el IGCT que son evoluciones tecnológicas del GTO original.
- **MCT**: (MOS-Controlled Thyristor): Combina un GTO y dos MOSFET para reducir su corriente de puerta en la apertura.
- **IGCT**: (Integrated gate-commutated Thyristor): Integra un GTO junto con su circuito de activación (driver). Reduce la corriente de puerta y mejora la velocidad de conmutación.
- **LASCR**: (Light activated SCR): Tiristor activado por luz. Su aplicación principal lo constituyen los sistemas eléctricos de alta tensión en el que la generación de disparos eléctricos es poco eficaz.
- **TRIAC**: Tiristor bidireccional de baja potencia (equivalente a dos SCR en antiparalelo con puerta común).

### 3.- LIBRERIAS DE SIMULINK, MATLAB

Para simular las topologías que se estudiarán en el siguiente apartado, se utilizará la librería Simscape Electrical.

Simscape Electrical proporciona bibliotecas de componentes para modelar y simular sistemas eléctricos, electrónicos y mecánicos. Incluye modelos de semiconductores, motores y componentes para aplicaciones como accionamientos electromecánicos, redes inteligentes y energías renovables.

La biblioteca Simscape Electrical Specialized Power Systems contiene modelos de equipos de potencia típicos, como transformadores, máquinas, accionamientos eléctricos y electrónica de potencia. También contiene modelos de control, medición y generación de señales que pueden utilizarse para desarrollar algoritmos de control de sistemas de potencia.

A continuación, se van a comentar los bloques más importantes de esta librería para realizar las simulaciones.

#### Fuentes

El bloque fente de tensión senoidal se utilizará para simular la tensión monofásica de alimentación. Se modelará con una  $V_M = 325V$  y una frecuencia de 50Hz.



Figura 15. Bloque fuente de tensión en Simulink. Elaboración propia

#### Elementos pasivos

Bloque RLC: este bloque permite elegir todas las posibles combinaciones entre resistencia, inductancia y capacitancia. Para las simulaciones se utilizará la carga puramente resistiva, carga RL y RLC.



Figura 16. Bloque RLC en Simulink. Elaboración propia

Bloque de tensión en continua: este bloque se puede utilizar como fuente o como carga. En nuestro caso se utilizará como elemento pasivo para simular cargas RE y cargas RLE.

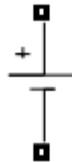


Figura 17. Bloque fuente de tensión en continua. Elaboración propia

### Sensores

Medición de corriente: para visualizar la corriente por la carga se utilizará este bloque en serie con la misma, como si se tratara de un amperímetro.

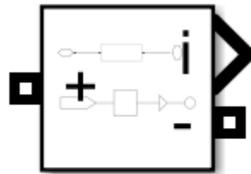


Figura 18. Bloque medición de corriente en Simulink. Elaboración propia

Medición de tensión: para visualizar las formas de onda de tensión en la carga se utilizará este bloque en paralelo a la misma, como si se tratase de un voltímetro.

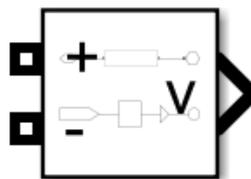


Figura 19. Bloque medición de tensión en Simulink. Elaboración propia

Medición de valor medio y RMS: estos bloques permiten visualizar los valores medio y RMS de una señal.



Figura 20. Bloques medición de valor medio y RMS en Simulink. Elaboración propia

Se utilizarán para comprobar medir la tensión y corriente de salida de cada topología, observando cómo varían, por ejemplo, según el ángulo de disparo, para comparar la salida de un rectificador sin filtro y uno con filtro o para obtener su rendimiento.

### Electrónica de potencia

Tiristor: el bloque simula un tiristor, con su ánodo, cátodo y puerta. Es el elemento principal de los rectificadores controlados. Tiene dos terminales de entrada y dos de salida. La entrada *g* es para controlar el ángulo de disparo de la puerta, la entrada *a* y salida *k* es para alimentar el tiristor y la salida *m* para visualizar la corriente y tensión por el mismo.

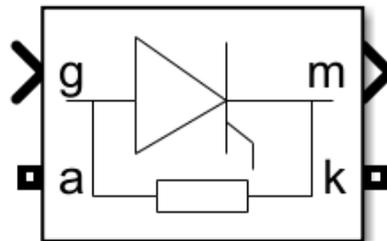


Figura 21. Bloque tiristor en Simulink. Elaboración propia

Diodo: el bloque simula un diodo, que es el elemento principal de los rectificadores no controlados. Tiene las mismas características que el modelo del tiristor sin la entrada de control de la puerta.

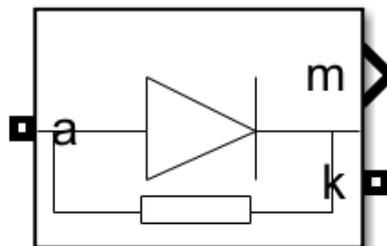


Figura 22. Bloque diodo en Simulink. Elaboración propia

### Powergui

La biblioteca Specialized Power Systems Fundamental Blocks contiene el bloque powergui, que proporciona herramientas para el análisis de circuitos eléctricos. Sirve para realizar simulaciones en tiempo continuo, tiempo discreto o fasorial. Sin este bloque, la simulación no se podría realizar.



Figura 23. Bloque Powergui en Simulink. Elaboración propia

### Otros bloques de Simulink

Pulse generator: para simular los diferentes ángulos de disparo de los tiristores se utilizará este bloque, introduciendo la frecuencia de 50Hz (0.02s), el retardo del disparo en segundos y el ancho del pulso.



Figura 24. Bloque Pulse generator en Simulink. Elaboración propia

Scope: este bloque es el que permite la visualización de una señal evolucionando en el tiempo. Se utilizará en conjunto con los medidores de tensión y corriente para visualizar las formas de onda.

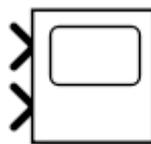


Figura 25. Bloque Scope en Simulink. Elaboración propia

Display: la salida del bloque display es un valor numérico. Puede especificarse el formato del número (binario, octal, hexadecimal...). Se utilizará en conjunto con el bloque RMS y el de valor medio para visualizar el valor numérico de la tensión y corriente de entrada y salida de diferentes cargas y así obtener el rendimiento de cada montaje más fácilmente.

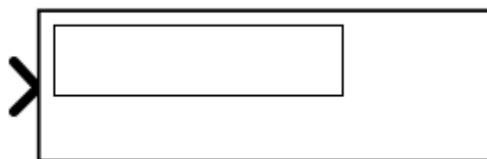


Figura 26. Bloque Display en Simulink. Elaboración propia

## 4.- ANÁLISIS DE TOPOLOGÍAS DE RECTIFICADORES DE BAJA POTENCIA

### 4.1.- Introducción a los rectificadores de potencia

Un rectificador es un convertidor de potencia que transforma la corriente alterna en corriente continua. Se basan principalmente en la conmutación de dispositivos semiconductores, como son los diodos y tiristores.

Esta conmutación introducirá armónicos de corriente y tensión en el sistema de alimentación y en la salida de los convertidores, por lo que se suelen utilizar filtros a la salida del convertidor (condensadores y bobinas) que atenúan las ondas de frecuencias distintas a la fundamental.

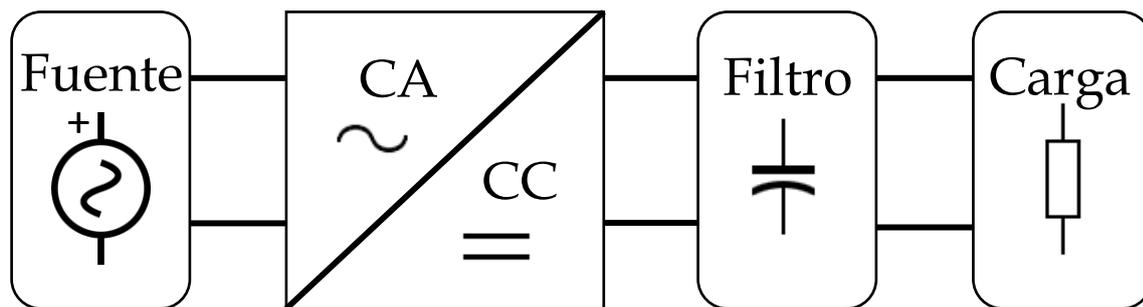


Figura 27. Rectificador genérico con filtro C. Elaboración propia

### Clasificación de los convertidores CA/CC

Los rectificadores se pueden clasificar atendiendo a diferentes criterios:

- Según número de fases: Monofásicos, trifásicos, hexafásicos...
- Según el control:
  - No controlados:
    - No se puede controlar la magnitud de la tensión continua, que será siempre fija. Se construyen con diodos.
  - Controlados
    - Se puede regular la magnitud de la tensión continua mediante el control de la zona de conducción de los semiconductores de cada fase.
    - Tradicionalmente se construyen con tiristores de los que se controla el instante de comienzo de conducción (control por fase). La extinción se produce de forma natural: cuando pasa la corriente por cero o cuando se dispara el tiristor de otra fase hacia el que se desvía la corriente continua.



- Semicontrolados:
  - Se construyen de forma mixta con diodos y tiristores y pueden controlar la magnitud de la tensión continua de salida, aunque de manera menos flexible.
- Según la estructura:
  - Simple: Entre cada fase de entrada (alterna) y la salida (continua) existe sólo un único polo de potencia
  - En puente: La carga es alimentada por una matriz de conversión en cada extremo (una de ánodo común y otra de cátodo común).

### Requisitos exigidos a un convertidor CA/CC de calidad

Para identificar un rectificador de calidad se observarán una serie de características:

- a) Que produzca a su salida tensión continua con un contenido mínimo de armónicos.
- b) Que no distorsione las corrientes de entrada (debe mantenerlas tan senoidales como sea posible para no afectar a otros dispositivos conectados a la red).
- c) Que no desfase tensión y corriente de entrada, es decir, que su factor de potencia sea cercano a la unidad.

### Parámetros importantes en rectificadores

Para poder definir cuantitativamente un rectificador se necesitarán una serie de parámetros, tanto a la entrada del rectificador como a la salida.

#### Parámetros de salida

Valor medio de la tensión y la corriente de salida

$$V_{oAV} = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt \qquad I_{oAV} = \frac{1}{T} \int_0^T I_o(t) dt$$

Valor eficaz de la tensión y la corriente de salida

$$V_{orms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_o^2(t) dt} \qquad I_{orms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_o^2(t) dt}$$

Factor de forma del rectificador: FF

$$FF = \frac{V_{orms}}{V_{oAV}}$$

Este parámetro indica la relación entre el valor eficaz y el valor medio. Un valor elevado indicará que la onda tiene poca componente continua y mucha alterna.



Eficiencia de un rectificador:  $\eta$

$$\eta = \frac{P_{cc}}{P_{ca}} = \frac{V_{oAV} \cdot I_{oAV}}{V_{orms} \cdot I_{orms}}$$

Valor eficaz de la componente alterna de la salida

$$V_{oCA} = \sqrt{V_{orms}^2 - V_{oAV}^2}$$

Factor de rizado (ripple factor): RF

$$RF = \frac{V_{oCA}}{V_{oAV}} = \sqrt{FF^2 - 1}$$

Este parámetro está relacionado con el factor de forma. Si la tensión de salida fuera puramente continua, el rizado sería nulo.

Parámetros de entrada

Factor de Potencia de Desplazamiento: DPF

DPF =  $\cos\phi$ , siendo  $\phi$  es el desfase entre las componentes fundamentales de  $i_s(t)$  y  $v_s(t)$ .

Factor de Potencia: PF

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_{srms} \cdot i_{s1rms} \cdot \cos\phi}{V_{srms} \cdot i_{srms}} = \frac{i_{s1rms} \cdot \cos\phi}{i_{srms}}$$

donde  $i_{s1}$  es la componente fundamental de  $i_s(t)$ . Si  $v_s(t)$  es senoidal pura, solo la componente fundamental de  $i_s(t)$  produce potencia activa. Si la carga del rectificador es puramente resistiva, se puede calcular PF como:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V_{orms} \cdot i_{orms}}{V_{srms} \cdot i_{srms}}$$

Corriente de distorsión en la entrada:  $i_{dis}(t)$

$$i_{dis}(t) = i_s(t) - i_{s1}(t) = \sum_{n \neq 1} i_{sn}(t)$$

$$i_{disrms} = \sqrt{i_{srms}^2 - i_{s1rms}^2} = \sum_{n \neq 1} \sqrt{i_{snrms}^2}$$



Distorsión armónica total de la corriente de entrada: THD

$$THD = \sqrt{\frac{i_{srms}^2 - i_{s1rms}^2}{i_{s1rms}^2}} = \sqrt{\left(\frac{i_{srms}}{i_{s1rms}}\right)^2 - 1} = \frac{i_{disrms}}{i_{s1rms}}$$

Factor de cresta: CF

$$CF = \frac{i_{spico}}{i_{srms}}$$

Los parámetros de rendimiento de un rectificador ideal serán:

$$\begin{aligned} \eta &= 100\% & FF &= 1 & V_{oCA} &= 0 \\ DPF &= PF = 1 & THD &= 0 & RF &= 0 \end{aligned}$$

En general, la determinación analítica de los parámetros de rendimiento de un rectificador será compleja y se necesitará utilizar una herramienta de simulación.

## Aplicaciones de los rectificadores de baja potencia

La principal aplicación de los rectificadores es para variadores de velocidad de motores CC. También se utiliza para alimentar dispositivos electrónicos, ya que prácticamente todos requieren corriente continua, por lo que se utilizan rectificadores dentro de las fuentes de alimentación.

Los motores de corriente continua fueron los primeros que se utilizaron para aplicaciones que requirieran el control de su velocidad y posición. El desarrollo de la electrónica de potencia ha permitido realizar reguladores de velocidad para los motores de corriente alterna con la misma eficiencia que en el caso de los motores de continua, a los que están sustituyendo en muchas aplicaciones. Los motores CC tienen importantes inconvenientes frente a los de alterna:

- Necesitan alimentación de potencia eléctrica en continua (menos habitual que la alterna).
- Para la misma potencia sus dimensiones y coste son mayores.
- Necesitan mayor mantenimiento debido a la utilización de colector.

Sin embargo, los motores CC ofrecen las siguientes ventajas que justifican su utilización:

- Pueden proporcionar altos pares de arranque.
- Su margen de velocidad es grande, por encima y por debajo de su valor nominal.
- Su procedimiento de regulación es más sencillo y económico que los correspondientes a los motores de inducción.

Los variadores de velocidad trabajan habitualmente con motores de excitación independiente y con motores serie (típicos en tracción). Su estructura incluye por separado la alimentación de la armadura y la excitación:

a) Para la alimentación de la armadura se utilizan dos alternativas:

- Mediante rectificador controlado.
- Mediante convertidor CC/CC.

b) La excitación suele suministrarse mediante un rectificador, que deberá ser controlado si se desea alcanzar velocidades superiores a la nominal.

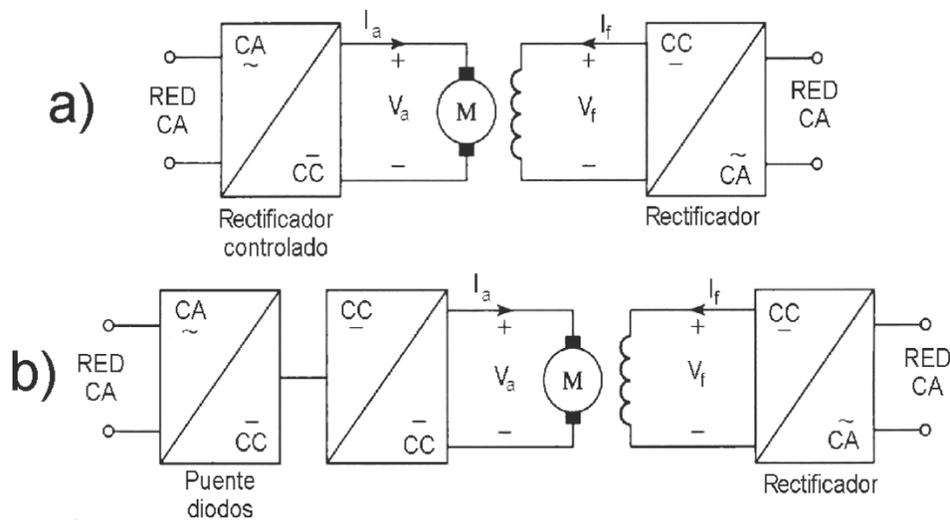


Figura 28. Alternativas de estructura de los variadores de continua. Fuente: [1]

A continuación, se estudiarán las diferentes topologías de los rectificadores monofásicos, especialmente los rectificadores no controlados y controlados.

## 4.2.- Rectificadores no controlados

### Circuito básico (Media onda)

Como introducción al análisis de rectificadores se estudiará el rectificador de media onda con distintas cargas. El propósito del análisis es puramente didáctico ya que el rectificador de media onda no se utiliza en circuitos industriales.

#### 1) Carga R

El circuito básico con carga R se representa en la figura 29.

Por la carga circulará corriente únicamente por el semiperiodo positivo de la onda de tensión y por el semiperiodo negativo la corriente será nula.

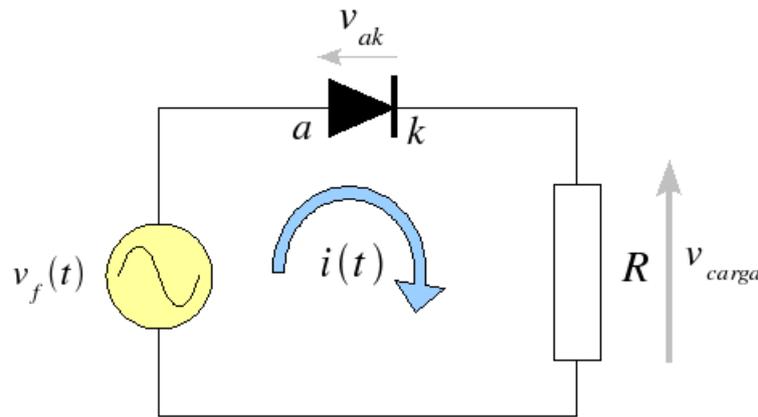


Figura 29. Rectificador no controlado de media onda, carga R. Fuente: [6]

A continuación, se van a obtener los parámetros de salida del rectificador:

Tensión media en la carga R

$$V_{carga_{AV}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_M \cdot \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{V_M}{\pi}$$

Corriente media por la carga R

$$I_{carga_{AV}} = \frac{V_{carga_{AV}}}{R} = \frac{V_M}{\pi R}$$

Tensión eficaz en la carga R

$$V_{carga_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_M \cdot \text{sen}(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_M}{2}$$



Corriente eficaz por la carga R

$$I_{carga_{RMS}} = \frac{V_{carga_{RMS}}}{R} = \frac{V_M}{2R}$$

Factor de forma

$$FF = \frac{V_{carga_{RMS}}}{V_{carga_{AV}}} = \frac{V_M/2}{V_M/\pi} = \frac{\pi}{2}$$

Eficiencia del rectificador

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{\frac{V_M}{\pi} \cdot \frac{V_M}{\pi R}}{\frac{V_M}{2} \cdot \frac{V_M}{2R}} = \frac{4}{\pi^2}$$

Factor de rizado

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1}$$

Se han podido obtener estos parámetros de manera analítica debido a que es un circuito básico con una carga puramente resistiva, pero a medida que la carga se vuelva más compleja como una carga RL, se añadan filtros, etc., estos parámetros serán más complicados de obtener, por ello en el siguiente apartado del trabajo se tratará de simular estos modelos más complejos con el fin de obtener las curvas características de forma clara y sencilla.

## 2) Carga RL

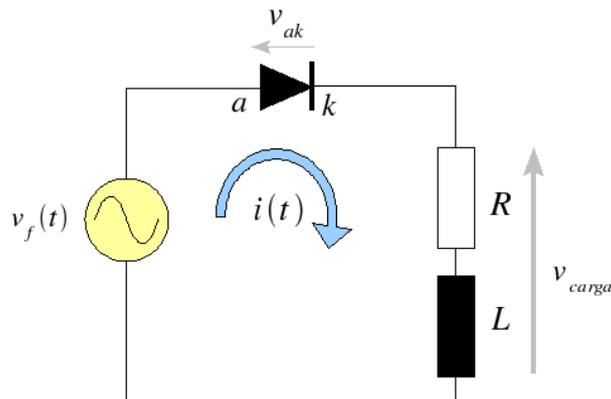


Figura 30. Rectificador no controlado de media onda, carga RL. Fuente: [6]

Para el análisis con la carga RL, estudiaremos como se comportaría el circuito sin el diodo, dividiendo el problema en diferentes tramos:

La fuente alimenta las cargas y la bobina se empieza a cargar con polaridad positiva.

Un tiempo después, la fuente de tensión pasa por cero, pero sigue circulando corriente en el mismo sentido debido a que la bobina se está descargando para mantener la corriente.

Una vez se ha descargado la bobina, se empieza a cargar, pero con polaridad negativa. Esos voltio-segundos que almacena la inductancia son los que utiliza para mantener transitoriamente la corriente por la resistencia, hasta que se agotan y la corriente se anula.

Al añadir el diodo, la diferencia con el análisis anterior es que la corriente no puede cambiar de sentido. La bobina mantiene la corriente, aun con la tensión negativa de la fuente, hasta que haya descargado sus voltio-segundos.

Debido a este comportamiento del circuito, el cálculo de los parámetros se obtendrá mediante simulación.

### 3) Carga RL con diodo de libre circulación

Esta topología es similar a la anterior, pero se ha añadido un diodo denominado diodo de circulación.

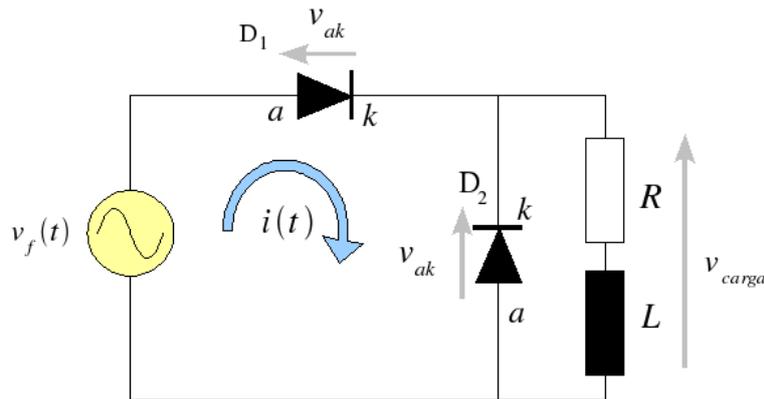


Figura 31. Rectificador no controlado de media onda, carga RL con diodo de libre circulación. Fuente: [6]

Este diodo se conecta en antiparalelo a la carga cuando hay una inductancia para servir de camino alternativo a la descarga de la energía almacenada cuando están abiertos los polos principales del convertidor.

El efecto del diodo es evitar que aparezca tensión negativa en la carga, con lo que aumenta el valor medio de la tensión de salida. La corriente que circulaba por D1 se transfiere a D2 en un proceso denominado conmutación de diodos.

### 4) Carga R con filtro

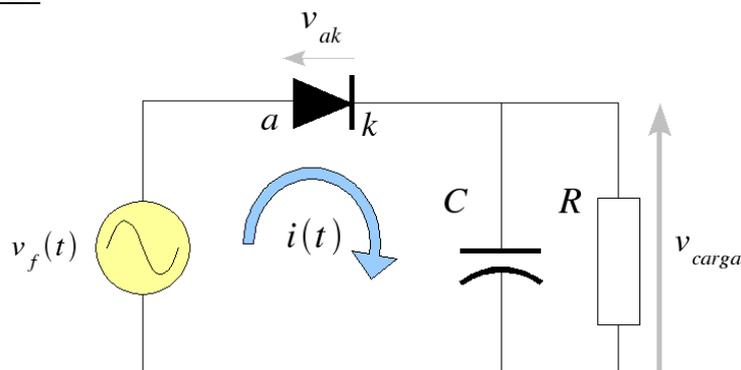


Figura 32. Rectificador no controlado de media onda, carga R y filtro C. Fuente: [6]

El filtro consta de un condensador paralelo a la carga. Durante el semiciclo positivo ascendente, el condensador se empieza a cargar. Cuando empieza a disminuir la tensión de la fuente, el condensador se empezará a descargar hacia la carga, proporcionando una tensión en ella de corriente continua con rizado.

Durante este período el diodo no conducirá, lo que implica que las pérdidas del convertidor por conducción del diodo serán menores. Cuando la tensión de la fuente vuelve a ser mayor, cargará el condensador y el diodo volverá a conducir.

### 5) Carga RE

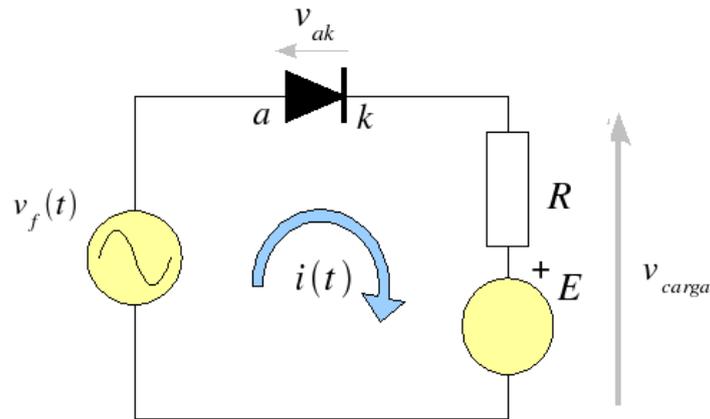


Figura 33. Rectificador no controlado de media onda, carga RE. Fuente: [6]

El diodo dejará de conducir cuando la tensión de la fuente sea menor a la tensión de la carga E y conducirá cuando la tensión sea mayor.

$V_f = V_M \cdot \text{sen}(\theta)$ . Si igualo  $V_f = E$ , obtendré el  $\theta_1$  a partir del cual conducirá el diodo.

Además, dejará de conducir en  $\theta_2 = 180 - \theta_1$ .

La corriente por la carga será:

$$I_s(\theta) = \begin{cases} \frac{V_f(\theta) - E}{R}, & \theta \in [\theta_1, \theta_2] \\ 0, & \theta \notin [\theta_1, \theta_2] \end{cases}$$

## 6) Carga RLE

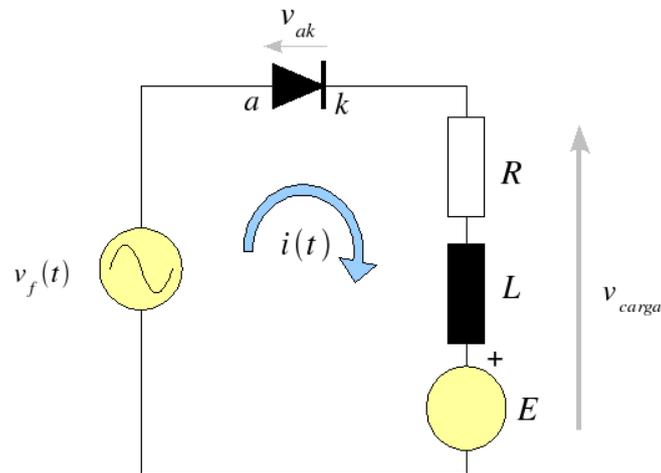


Figura 34. Rectificador no controlado de media onda, carga RLE. Fuente: [6]

La carga RLE puede simular una carga de tipo motor.

Ocurre lo mismo que en el caso RE, pero añadiendo el efecto de la inductancia.

## 7) Carga RLC

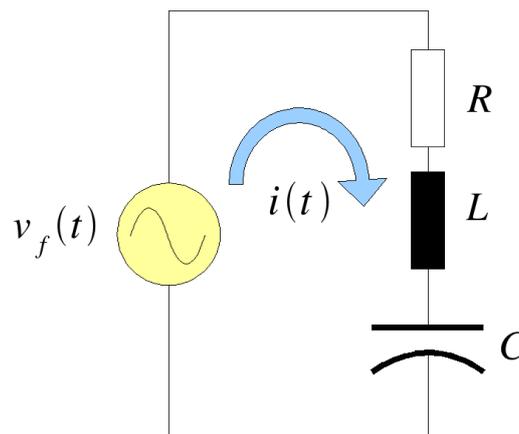


Figura 35. Rectificador no controlado de media onda, carga RLC. Fuente: [6]

Para analizar este caso deberá de realizarse una simulación, ya que las formas de onda se verán condicionadas por los valores de L y C. Este tipo de cargas son poco comunes ya que tienen efectos que no proporcionan una utilidad real.

## Circuito en puente (Onda completa)

El diseño en puente permite aprovechar la corriente del semiperiodo negativo de la onda de tensión de la fuente, por lo que a este tipo de diseños se le llama rectificador de onda completa.

### 1) Carga R

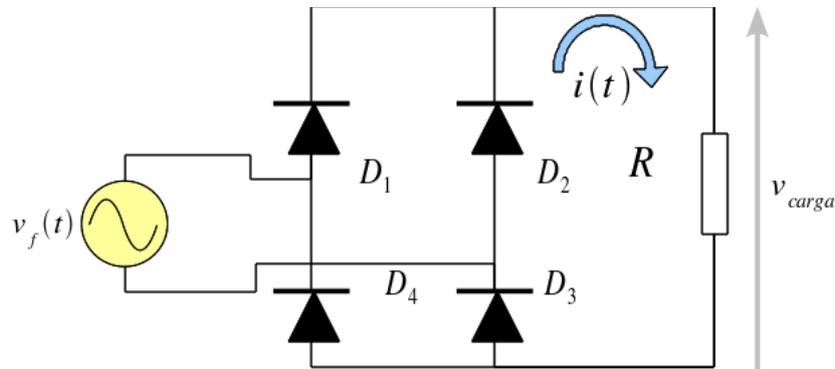


Figura 36. Rectificador no controlado de onda completa, carga R. Fuente: [6]

Los diodos conducen por parejas: D1 y D3 en un semiciclo, y D2 y D4 en el siguiente.

La corriente por la carga siempre tiene el mismo sentido.

Como en el caso del circuito básico, vamos a obtener los parámetros de salida del convertidor con carga puramente resistiva:

Tensión media en la carga R

$$V_{carga_{AV}} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_M \cdot \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{2V_M}{\pi}$$

Corriente media por la carga R

$$I_{carga_{AV}} = \frac{V_{carga_{AV}}}{R} = \frac{2V_M}{\pi R}$$

Tensión eficaz en la carga R

$$V_{carga_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_M \cdot \text{sen}(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_M}{\sqrt{2}}$$

Corriente eficaz por la carga R

$$I_{carga_{RMS}} = \frac{V_{carga_{RMS}}}{R} = \frac{V_M}{\sqrt{2}R}$$

Factor de forma

$$FF = \frac{V_{carga_{RMS}}}{V_{carga_{AV}}} = \frac{V_M/\sqrt{2}}{2V_M/\pi} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}}$$

Eficiencia del rectificador

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{\frac{2V_M}{\pi} \cdot \frac{2V_M}{\pi R}}{\frac{V_M}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_M}{\sqrt{2}R}} = \frac{8}{\pi^2}$$

Factor de rizado

$$RF = \sqrt{FF^2 - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} - 1}$$

Comparando los resultados con el caso del rectificador de media onda con carga R, vemos que la eficacia del rectificador es el doble, y las corrientes y tensiones son mayores, ya que aprovecha la semionda negativa de la fuente.

## 2) Carga R con filtro

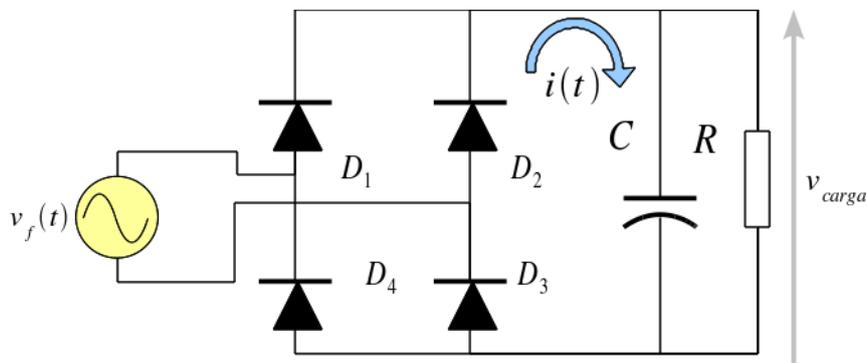


Figura 37. Rectificador no controlado de onda completa, carga R con filtro C. Fuente: [6]

Al igual que en el rectificador de media onda, el filtro ayuda a obtener una salida de corriente continua más pura.

### 3) Carga RL

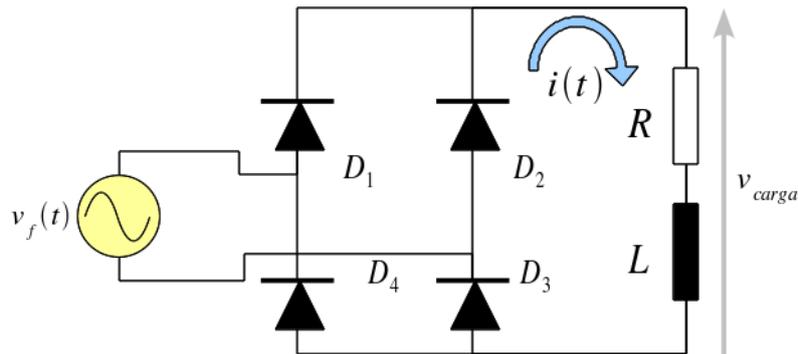


Figura 38. Rectificador no controlado de onda completa, carga RL. Fuente: [6]

Después del transitorio inicial, la corriente por la carga alcanza una evolución periódica estable. La corriente se transfiere desde un par de diodos al otro cuando cambia la polaridad del generador.

La tensión en la carga RL es una senoide rectificada en onda completa, como en el caso de carga resistiva, pero la corriente nunca llega a cero. La corriente en la carga se calcula estudiando cada componente de frecuencia de la tensión de la carga por separado y combinando los resultados:

$$I_{carga_{AV}} = \frac{V_{carga_{AV}}}{R}$$

$$I_{carga_n} = \frac{V_{carga_n}}{R} = \frac{V_{carga_n}}{|R + jn\omega L|}$$

### 4) Carga RLE (Conducción continua y discontinua)

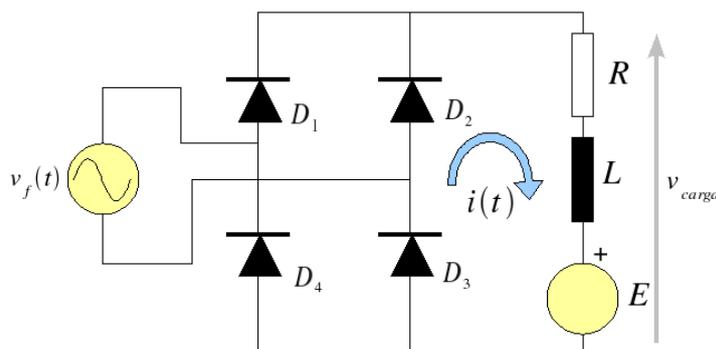


Figura 39. Rectificador no controlado de onda completa, carga RLE. Fuente: [6]

Dependiendo de los valores de las componentes R-L-E de la carga, la corriente de salida puede ser continua (nunca vale cero) o discontinua (vale cero durante algún intervalo del periodo).

### 4.3.- Rectificadores controlados

Como ya se comentó anteriormente, los rectificadores controlados se construyen con tiristores en vez de diodos y ofrecen tensión de salida controlable. La tensión de salida se varía controlando el ángulo de disparo  $\alpha$  de los tiristores (control por fase).

Un tiristor controlado por fase:

- Se activa aplicando un pulso a la puerta cuando está polarizado en directa.
- Se desactiva:
  - Cuando se extingue la corriente que conduce (cargas R o R-L con inductancias pequeñas).
  - Al disparar otro transistor del rectificador, que recibe la corriente que el primero conducía (cargas muy inductivas).

Para elegir los tiristores se han de tomar como intensidades medias y eficaces las más desfavorables que corresponden a  $\alpha = 0$  (trabajando como si fueran diodos).

#### Circuito básico (Media onda)

##### 1) Carga R

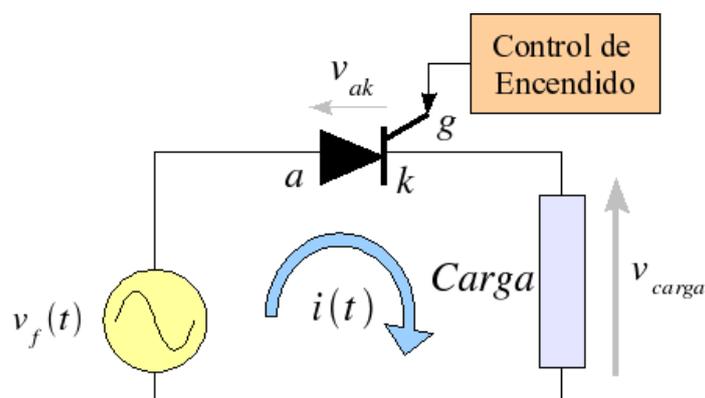


Figura 40. Rectificador controlado de media onda, carga R. Fuente: [6]

El tiristor está polarizado en directa desde  $\omega t = 0$ , pero su conducción se retrasa hasta  $\omega t = \alpha$ . Se puede variar  $\alpha$  entre 0 y  $\pi$ , para controlar la tensión de salida del rectificador.

El tiristor estará conduciendo desde su disparo en  $\omega t = \alpha$  hasta  $\omega t = \pi$ , instante en el que la polarización es negativa y la corriente se extingue.



El rendimiento de un rectificador controlado se puede medir con los mismos parámetros que los de los rectificadores no controlados.

En este caso, los parámetros de rendimiento del rectificador dependerán del valor de  $\alpha$  con el que esté trabajando.

Tensión media en la carga R

$$V_{carga_{AV}} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_M \cdot \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{V_M}{2\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

Corriente media por la carga R

$$I_{carga_{AV}} = \frac{V_{carga_{AV}}}{R} = \frac{V_M}{2\pi R} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

Tensión eficaz en la carga R

$$V_{carga_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (V_M \cdot \text{sen}(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_M}{2} \cdot \sqrt{\frac{2\pi - 2 + \text{sen}(2\alpha)}{2\pi}}$$

Corriente eficaz por la carga R

$$I_{carga_{RMS}} = \frac{V_{carga_{RMS}}}{R} = \frac{V_M}{2R} \cdot \sqrt{\frac{2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)}{2\pi}}$$

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{\frac{V_M}{2\pi} \cdot \frac{V_M}{2\pi R} \cdot (1 + \cos\alpha)^2}{\frac{V_M}{2} \cdot \frac{V_M}{2R} \cdot \left( \sqrt{\frac{2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)}{2\pi}} \right)^2} \rightarrow$$

$$\eta = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha))}$$

## Circuito en puente (Onda completa)

### 1) Carga R

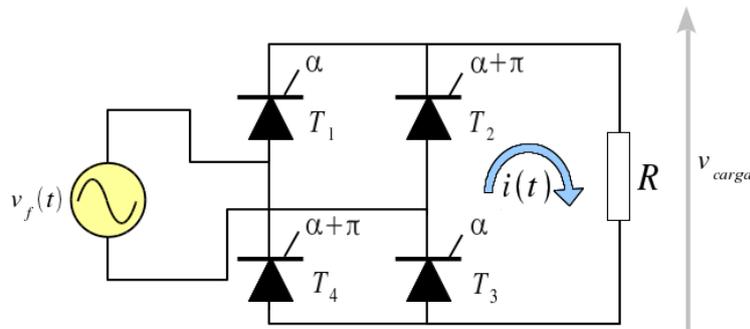


Figura 41. Rectificador controlado de onda completa, carga R. Fuente: [6]

Al igual que el puente de diodos, los tiristores deben ser disparados por parejas, T1-T3 y T2-T4.

T1-T3 están polarizados en directa durante el primer semiciclo, pero no conducirán hasta que no reciban el disparo ( $\omega t = \alpha$ ). Análogamente, T3 y T4 lo harán en el segundo semiciclo.

En caso de carga resistiva,  $\alpha$  puede variar entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ . La corriente por la carga se extingue cada vez que la tensión de la fuente cambia de polaridad.

Tensión media en la carga R

$$V_{carga_{AV}} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_M \cdot \text{sen}(\theta) d\theta = \frac{V_M}{\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

Corriente media por la carga R

$$I_{carga_{AV}} = \frac{V_{carga_{AV}}}{R} = \frac{V_M}{\pi R} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

Tensión eficaz en la carga R

$$V_{carga_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (V_M \cdot \text{sen}(\theta))^2 d\theta} = \frac{V_M}{2} \cdot \sqrt{\frac{2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)}{\pi}}$$



Corriente eficaz por la carga R

$$I_{carga_{RMS}} = \frac{V_{carga_{RMS}}}{R} = \frac{V_M}{2R} \cdot \sqrt{\frac{2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)}{\pi}}$$

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{\frac{V_M}{\pi} \cdot \frac{V_M}{\pi R} \cdot (1 + \cos\alpha)^2}{\frac{V_M}{2} \cdot \frac{V_M}{2R} \cdot \left(\sqrt{\frac{2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha)}{\pi}}\right)^2} \rightarrow$$
$$\eta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha))}$$

En este apartado hemos visto cómo interpretar los diferentes tipos de rectificadores, como hallar parámetros como el rendimiento, corrientes y tensiones medias, eficaces, etc.

Una vez analizadas las topologías de los rectificadores monofásicos, se va a proceder a la simulación de las mismas en Simulink (MATLAB) y, así, poder visualizar las curvas más características ante las diferentes cargas.

## 5.- DISEÑO Y SIMULACIÓN CON MATALAB DE LAS CONFIGURACIONES VÁLIDAS

Una vez estudiadas las diferentes topologías de rectificadores pasaremos a simular en Simulink cada una de ellas.

Principalmente se observarán las formas de onda de tensión y corriente a la salida del rectificador (en la carga) y el rendimiento de cada configuración.

Se utilizará para la simulación una tensión de 230Vrms y una frecuencia de 50Hz. El resto de parámetros se indican según el tipo de carga que se esté analizando.

### 5.1.- Media onda no controlado

- Carga R ( $R=50\Omega$ )

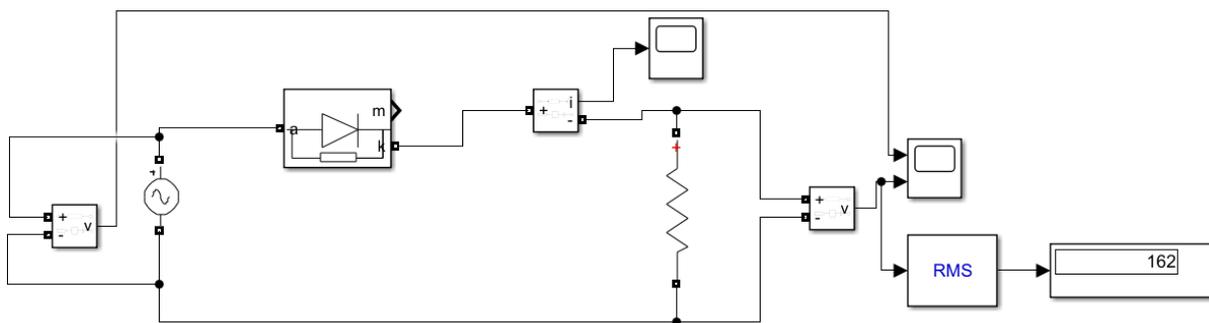


Figura 42. Rectificador no controlado de media onda, carga R en Simulink. Elaboración propia

#### Tensiones

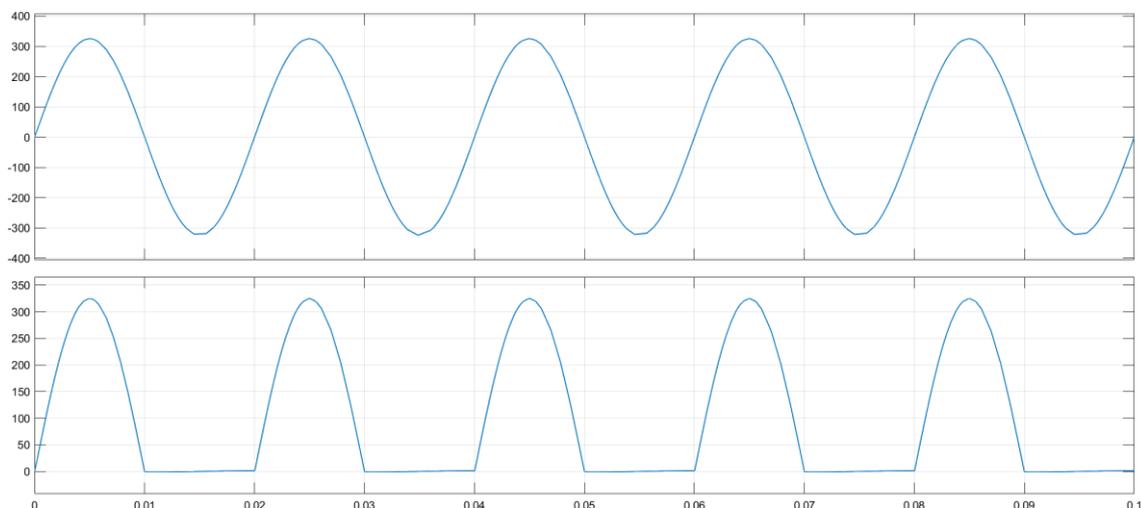


Figura 43. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R. Elaboración propia

En la figura 43 se puede observar claramente la tensión de salida. Durante el semiciclo positivo el diodo conduce y durante el semiciclo negativo no conduce.

La carga es puramente resistiva, por lo que la corriente tiene la misma forma de onda que la tensión de salida ( $I_s = V_s/R$ ), como se observa en la figura 44.

### Corriente

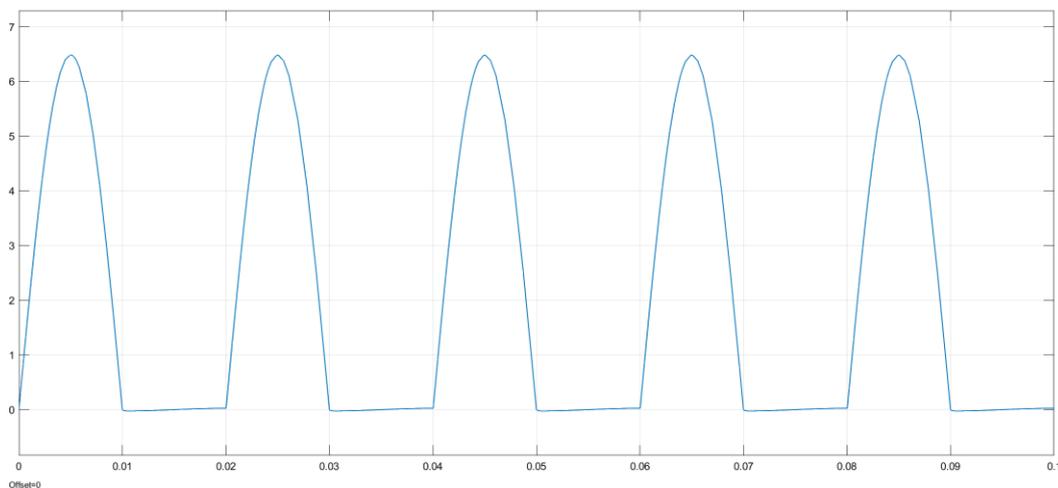


Figura 44. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{103 \cdot 2,06}{162 \cdot 3,24} = 0,4045$$

En el apartado anterior calculamos el rendimiento para este tipo de montaje de forma analítica:

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{\frac{V_M}{\pi} \cdot \frac{V_M}{\pi R}}{\frac{V_M}{2} \cdot \frac{V_M}{2R}} = \frac{4}{\pi^2} = 0,4053$$

Vemos que son valores muy similares, la mínima diferencia se produce en que en la simulación tiene en cuenta las pérdidas en el diodo (tensión mínima para la conducción, resistencia interna y capacidad interna).

- Carga RL ( $R=50\Omega$ ,  $L=70\text{mH}$ )

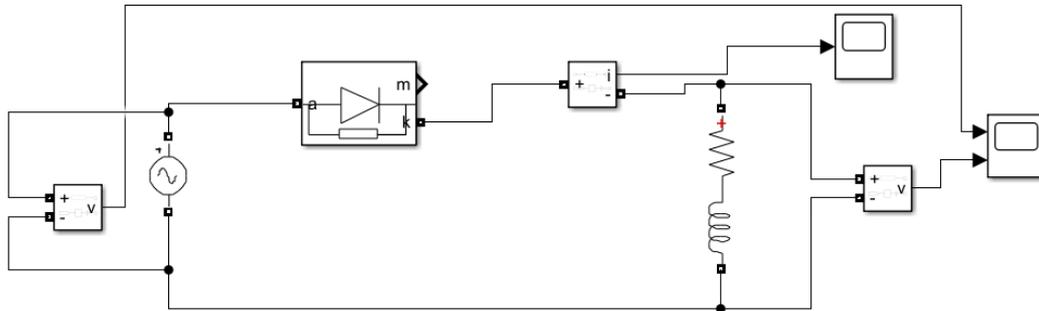


Figura 45. Rectificador no controlado de media onda, carga RL en Simulink. Elaboración propia

### Tensiones

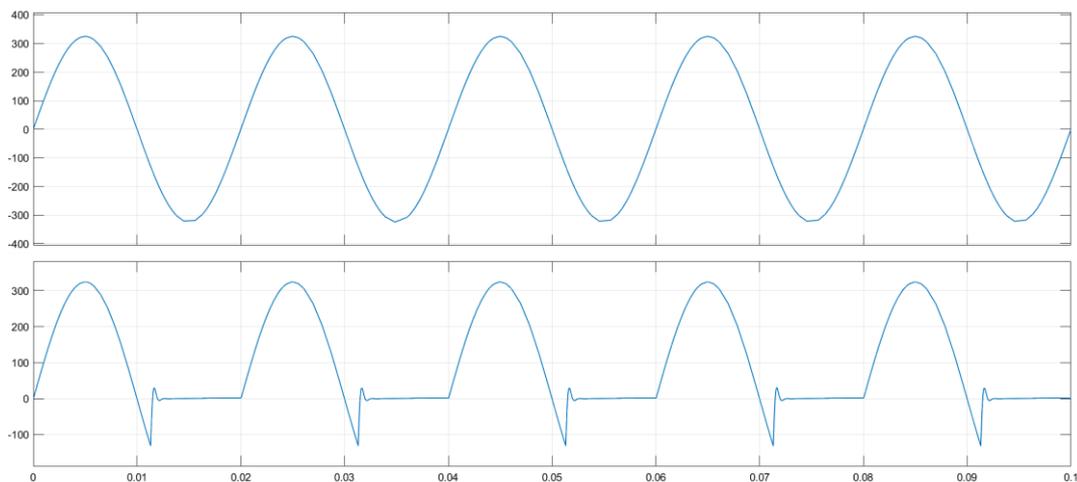


Figura 46. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RL. Elaboración propia

### Corriente

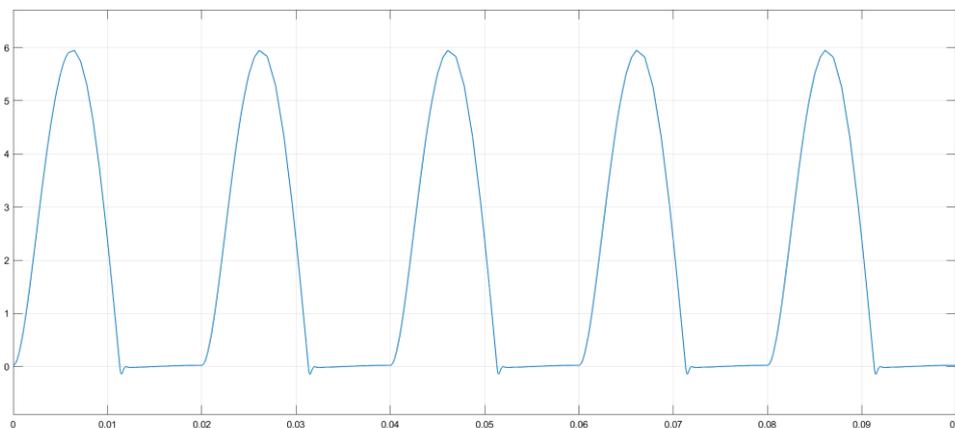


Figura 47. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RL. Elaboración propia

Como se explicó en el apartado anterior, la tensión por la carga toma valores negativos, debido a que la inductancia, que se ha cargado durante el semiciclo positivo. Cuando la tensión de la fuente pasa por cero, la bobina se descarga para mantener la corriente por la carga, polarizándose en sentido inverso.

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{98,73 \cdot 1,975}{163,3 \cdot 3,02} = 0,3952$$

El rendimiento de este montaje es menor, ya que la tensión media disminuye al tomar valores negativos.

• **Carga RL diodo libre circulación (R=50Ω, L=70mH)**

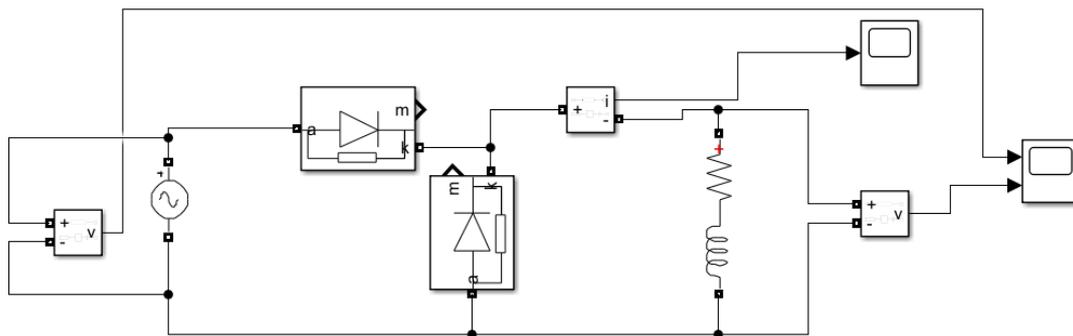


Figura 48. Rectificador no controlado de media onda, carga RL con diodo de libre circulación en Simulink. Elaboración propia

Tensiones

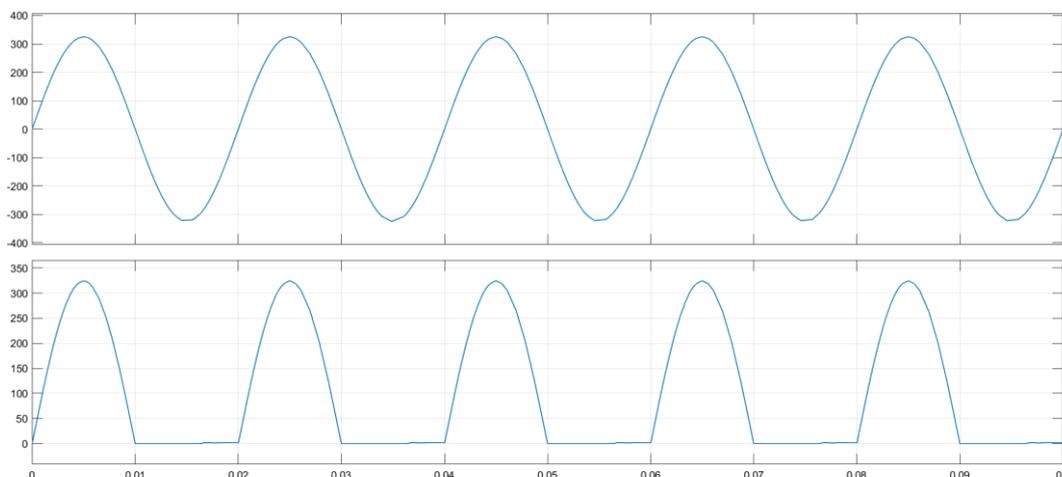


Figura 49. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R con diodo de libre circulación. Elaboración propia

### Corriente

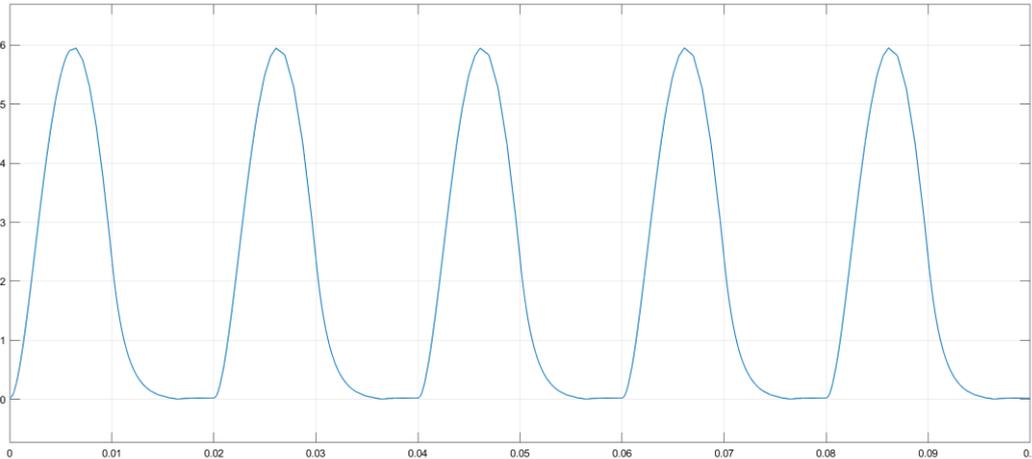


Figura 50. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R con diodo de libre circulación. Elaboración propia

El diodo libre de circulación, colocado en antiparalelo a la carga, permite un camino a la corriente cuando la bobina se descarga y evita que se produzca una tensión negativa en la carga, como se observa en la figura 50.

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{103 \cdot 2,06}{162 \cdot 3,032} = 0,4322$$

El rendimiento de este montaje es superior, ya que al evitar que la tensión sea negativa, su valor medio es mayor.

- **Carga R con filtro C elevado (R=50Ω, C=5000μF)**

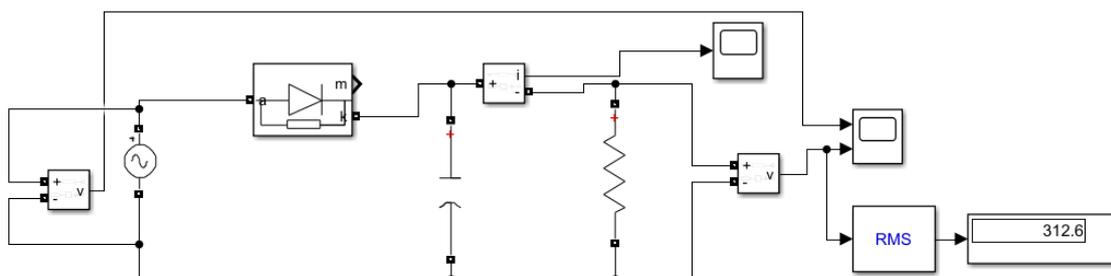


Figura 51. Rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro en Simulink. Elaboración propia

## Tensiones

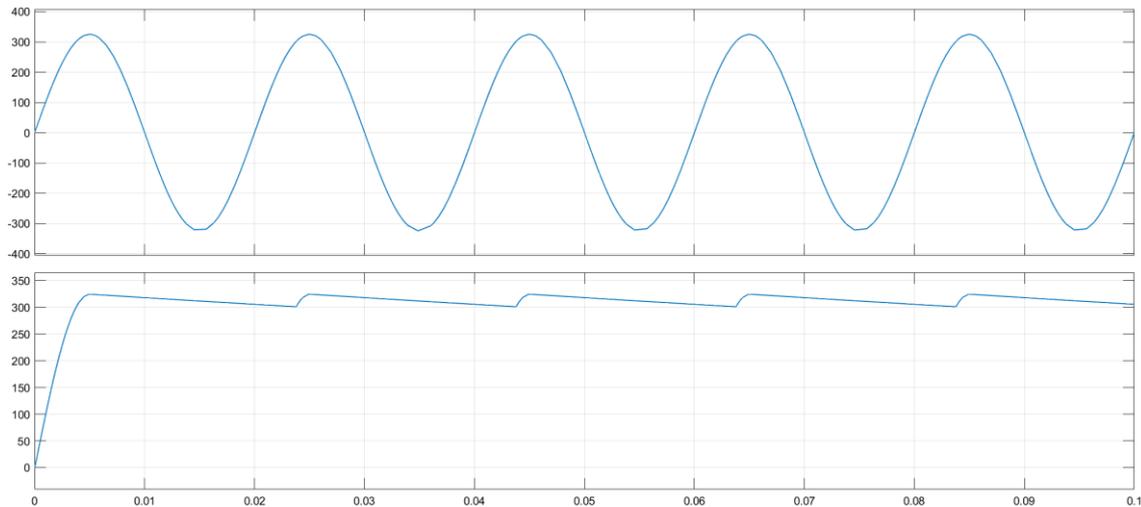


Figura 52. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C. Elaboración propia

En la figura 53 vemos como se obtiene una corriente continua con un rizado muy pequeño debido al filtro. El filtro es un condensador que se coloca paralelo a la carga. Este se encarga de alisar las ondas de corriente y tensión y así obtener una corriente continua más pura, lo que implica que el valor medio y eficaz de la tensión de salida será mayor.

## Corriente

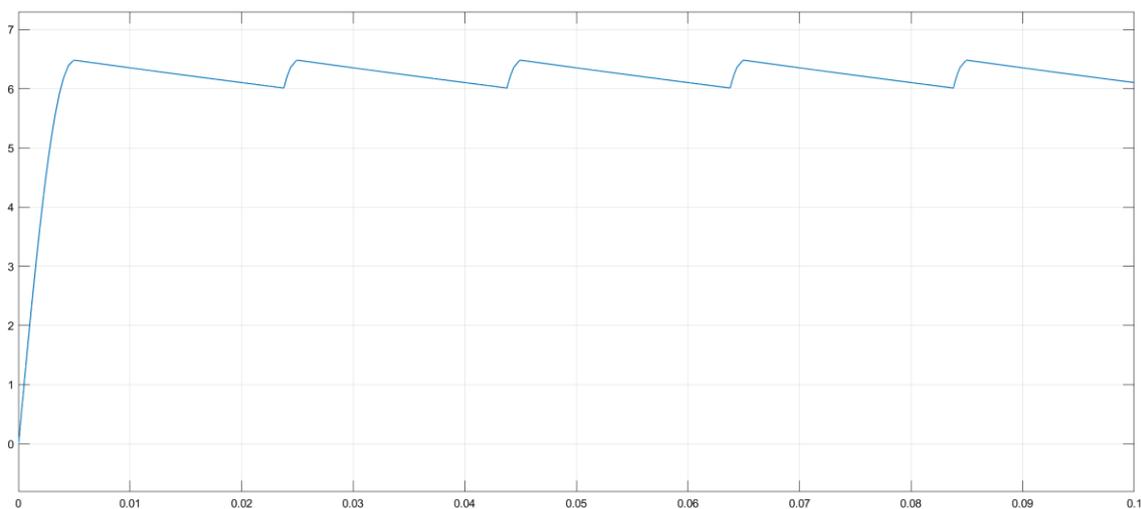


Figura 53. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C. Elaboración propia

### Corriente por la carga y por el condensador

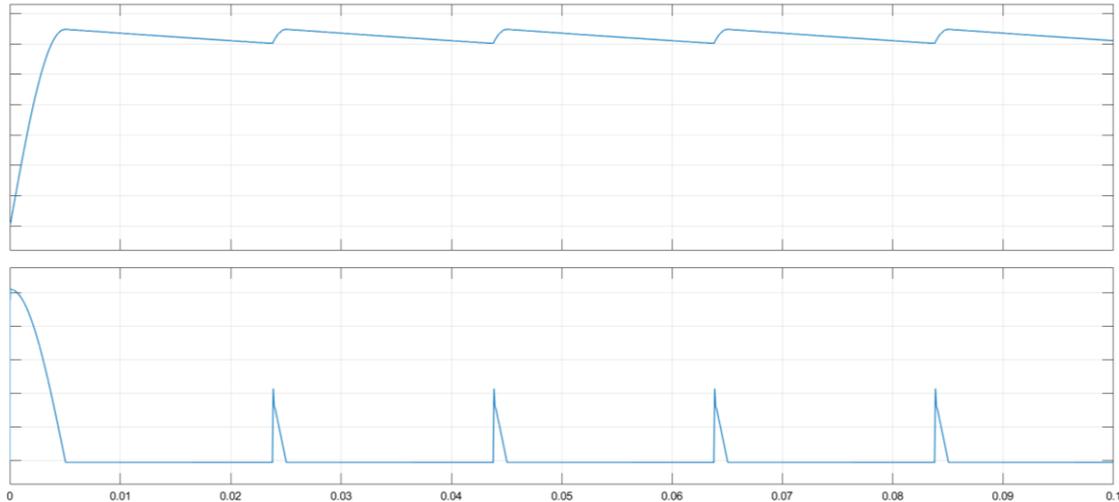


Figura 54. Corriente por la carga y por el filtro. Elaboración propia

En la parte de debajo de la figura 54 podemos observar la corriente por el condensador.

Inicialmente se va cargando hasta que la tensión de la fuente empieza disminuir. El condensador proporciona la corriente a la carga durante casi todo el período (la corriente es negativa ya que sale del condensador).

Después hay un pequeño período en el que empieza a cargarse de nuevo y vuelve a descargarse. Ese período que se está cargando el condensador coincide con el período de conducción del diodo, como explicamos en el apartado anterior.

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{312,6 \cdot 6,251}{312,6 \cdot 6,253} = 0,9995$$

El rendimiento de un rectificador con un filtro adecuado puede ser casi del 100%, ya que el valor eficaz y el valor medio a la salida son prácticamente iguales.

- **Carga R con filtro C más pequeño ( $R=50\Omega$ ,  $C=500\mu\text{F}$ )**

### Tensiones

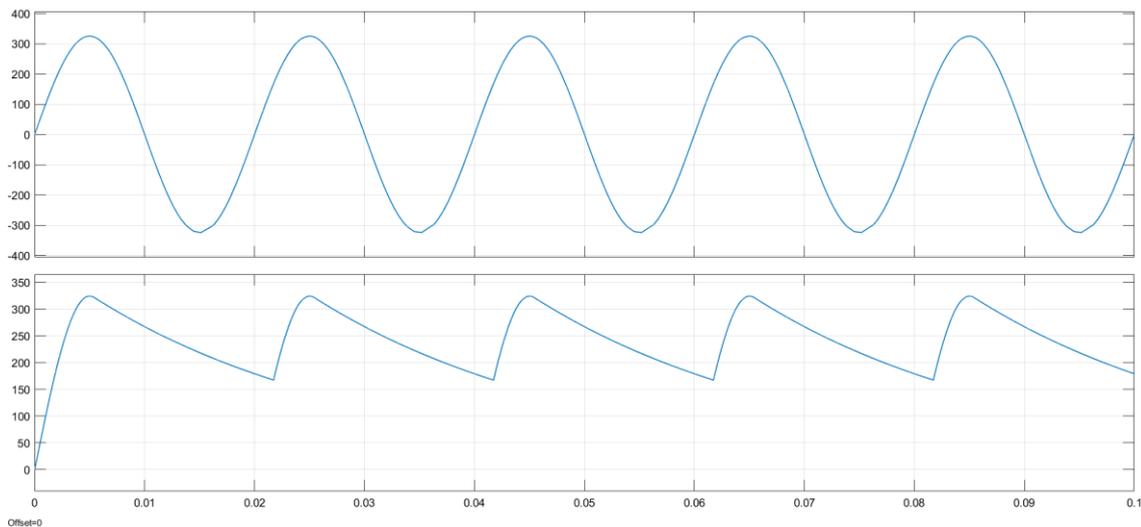


Figura 55. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C pequeño. Elaboración propia

### Corriente

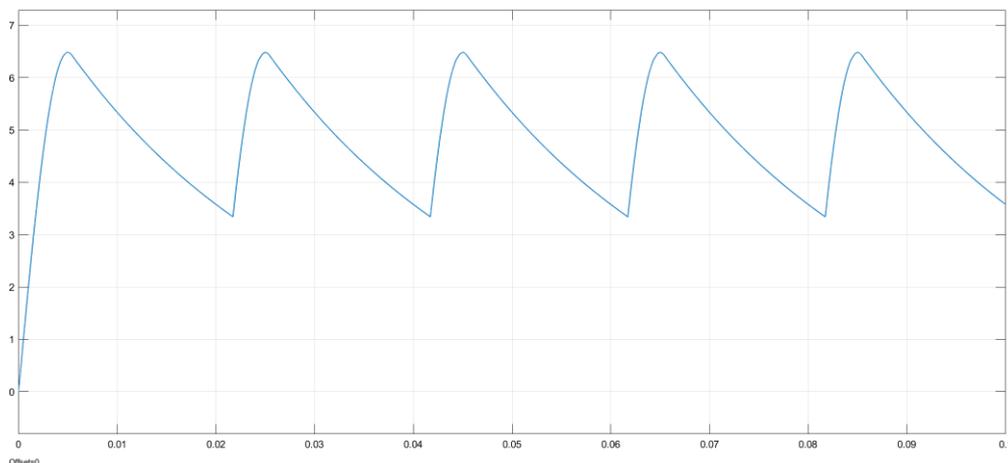


Figura 56. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C pequeño. Elaboración propia

En la figura 56 vemos como se obtiene una corriente continua con un rizado mayor. El filtro se ha simulado con un valor de capacidad menor y así observar más claramente el rizado a la salida. El período de funcionamiento del diodo será mayor que con el otro filtro, pero menor que si el filtro no se utilizara.

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{243,2 \cdot 4,864}{247,8 \cdot 4,957} = 0,9631$$

Vemos que el rendimiento sigue siendo bastante elevado aun con un rizado mayor. A la hora de elegir un filtro se tendrá en cuenta el coste de utilizar un filtro con elevada capacidad y poco rizado o uno con mayor rizado y menor coste.

- **Carga RE (R=50Ω, E=100V)**

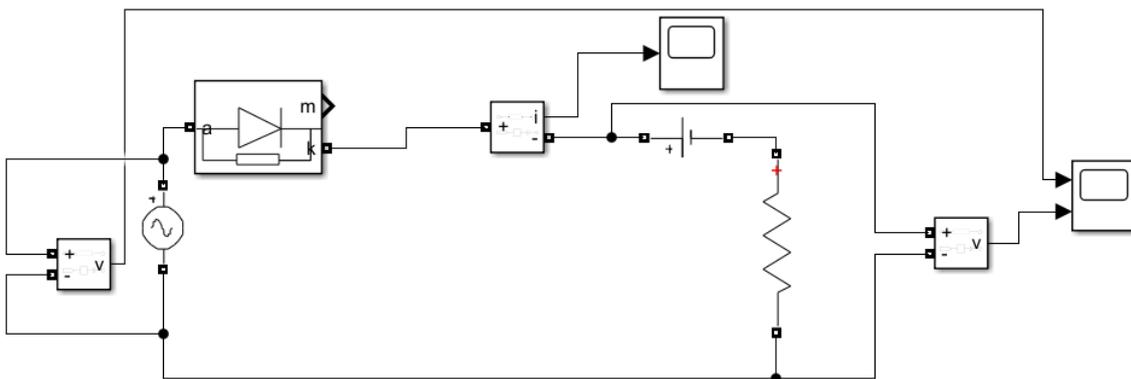


Figura 57. Rectificador no controlado de media onda, carga RE en Simulink. Elaboración propia

### Tensiones

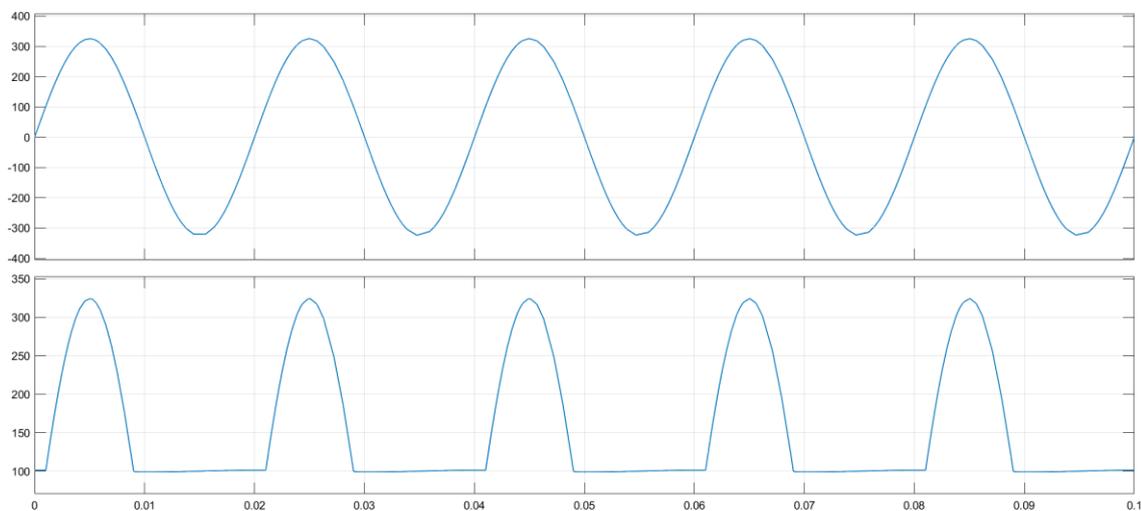


Figura 58. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RE. Elaboración propia

## Corriente

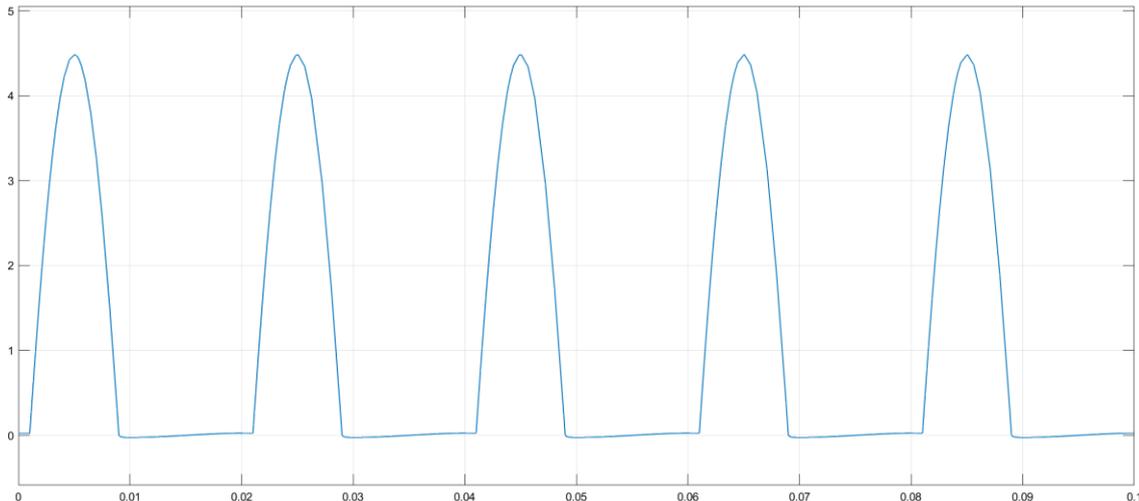


Figura 59. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RE. Elaboración propia

Como explicamos en el análisis topológico, la tensión por la carga no será menor a la tensión de la carga  $E$ , 100V en este ejemplo.

Podemos obtener los períodos de funcionamiento del diodo y comprobar si se ajustan a los valores simulados.

Para ello imponemos la condición recién citada:  $V_f = E$ , siendo  $V_f = V_M \cdot \text{sen}(\theta)$ .

$$325 \cdot \text{sen}(\theta) = 100 \rightarrow \theta_1 = 17,92^\circ.$$

$$\theta_2 = 180 - \theta_1 = 162,08^\circ.$$

El diodo empezará a conducir a partir de  $\theta_1$  y dejará de conducir a partir de  $\theta_2$ . Esto se puede observar en las figuras 58 y 59 como la tensión y corriente empieza a aumentar en un tiempo distinto de 0.

## Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{158 \cdot 1,161}{178,6 \cdot 2,029} = 0,5062$$

Vemos que el rendimiento es ligeramente mayor que una carga puramente resistiva. Esto se debe a que la tensión media y eficaz de salida son más parecidas debido a la restricción de la tensión mínima de  $E$  ( $\neq 0$ ).

- **Carga RLE** ( $R=50\Omega$ ,  $L=70\text{mH}$ ,  $E=100\text{V}$ )

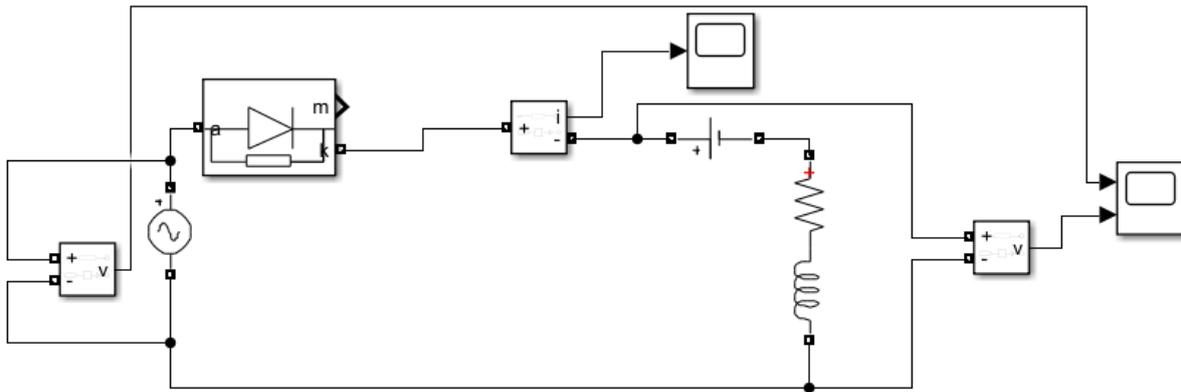


Figura 60. Rectificador no controlado de media onda, carga RLE en Simulink. Elaboración propia

En la figura 61 podemos observar los efectos de la inductancia. La tensión pasa a tener valores inferiores a  $E$ , ya que la bobina se está descargando e intenta mantener la corriente por ella a costa de polarizarse con una tensión negativa.

### Tensiones

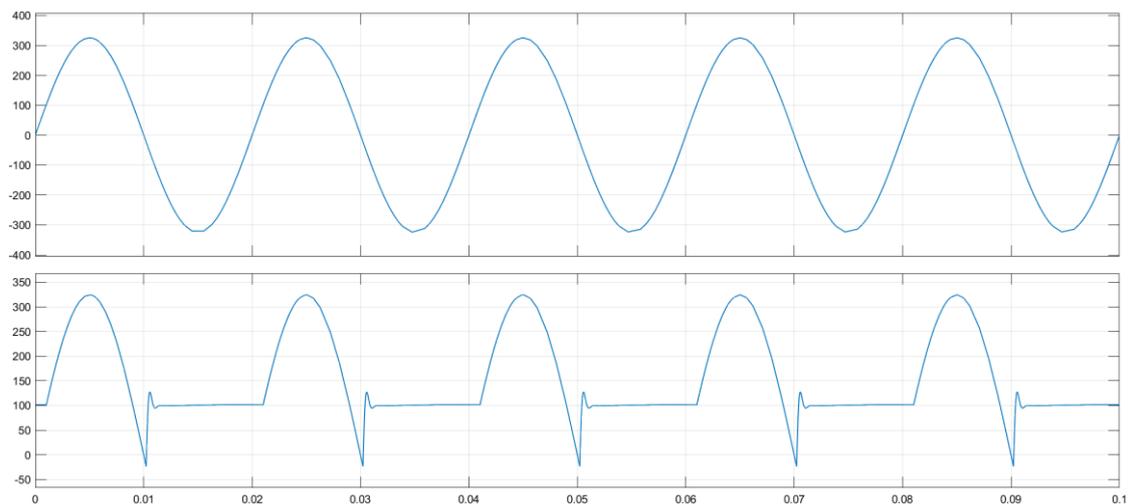


Figura 61. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RLE. Elaboración propia

### Corriente

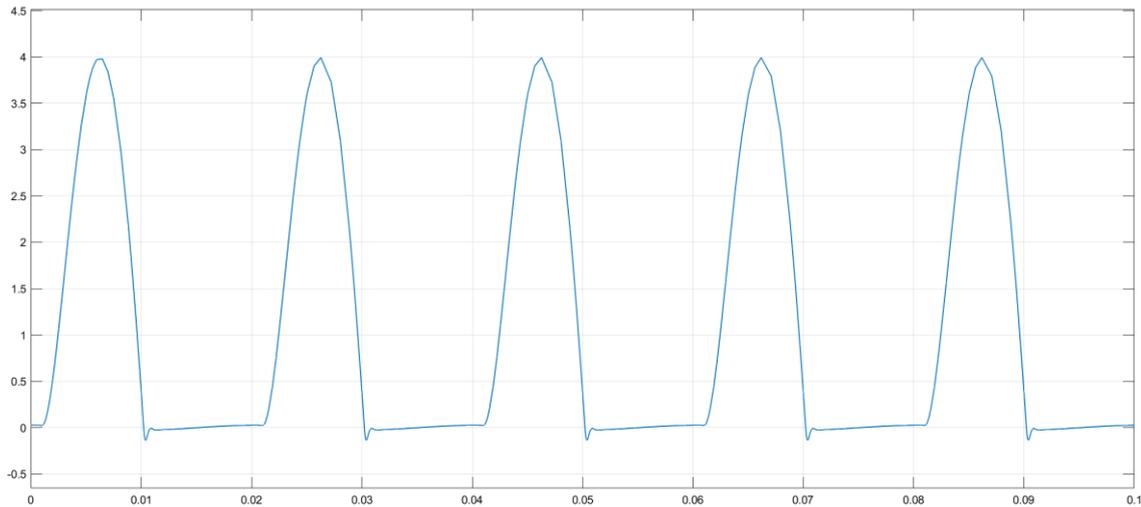


Figura 62. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RLE. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{154,4 \cdot 1,088}{177,6 \cdot 1,838} = 0,5144$$

Como en el caso de la carga RE, los rendimientos son mayores que si no existiera la carga E.

- **Carga RLC** ( $R=50\Omega$ ,  $L=3\text{mH}$ ,  $C=500\mu\text{F}$ )

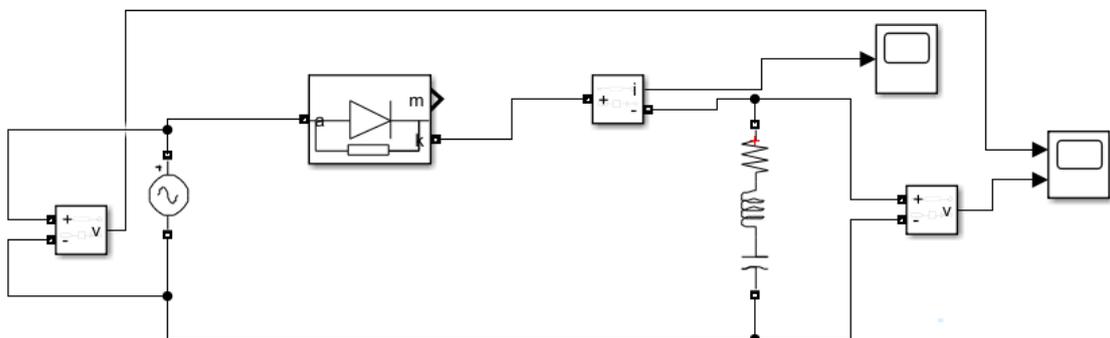


Figura 63. Rectificador no controlado de media onda, carga RLC en Simulink. Elaboración propia

### Tensiones

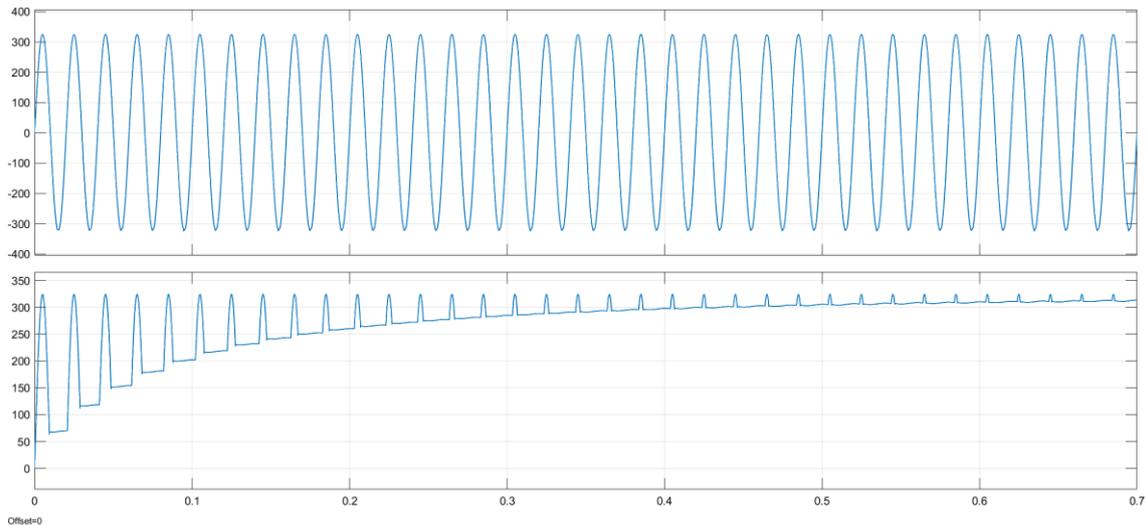


Figura 64. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RLC. Elaboración propia

### Corriente

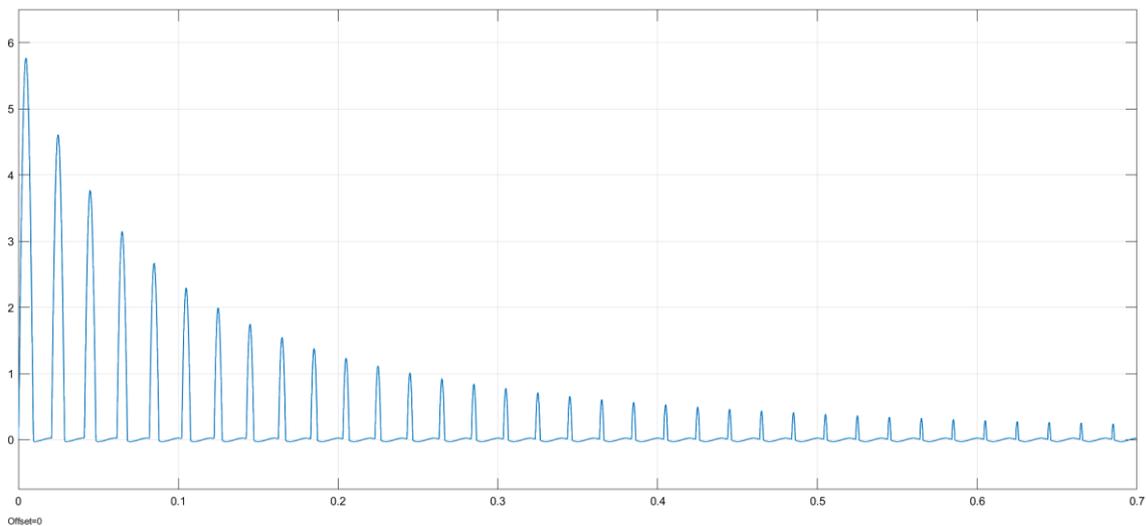


Figura 65. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RLC. Elaboración propia

En esta configuración vemos como ocurren simultáneamente los efectos del condensador y de la bobina. En un tiempo mayor la tensión será próxima a la de la fuente y la corriente será nula, es decir, los efectos del condensador serán predominantes frente a los de la bobina.

## 5.2.- Media onda controlado

- Carga R ( $R=50\Omega$ )

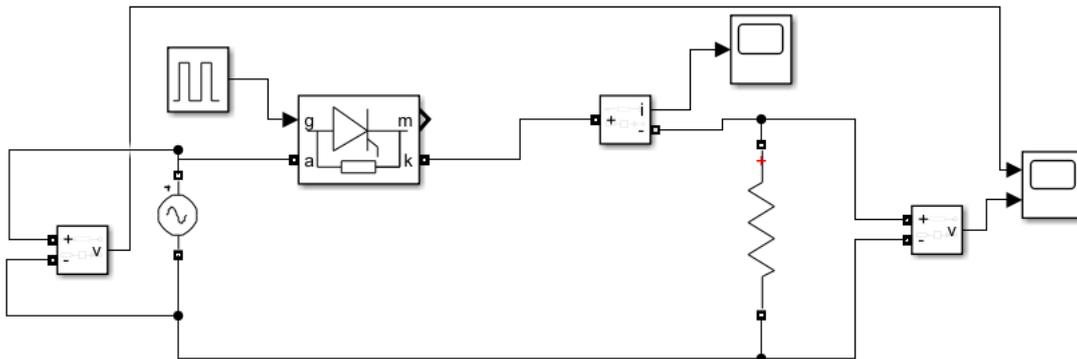


Figura 66. Rectificador controlado de media onda, carga R en Simulink. Elaboración propia

Un rectificador de media onda controlado utiliza un tiristor en lugar de un diodo. El tiristor conducirá dependiendo del ángulo de disparo, que puede variar desde  $0^\circ$  (funcionamiento como diodo) hasta  $180^\circ$  (no conduce en ningún momento del ciclo).

Por ello, a continuación, se muestran las formas de onda y rendimientos para el mismo montaje, pero con diferentes ángulos de disparo.

- Ángulo de disparo:  $30^\circ$

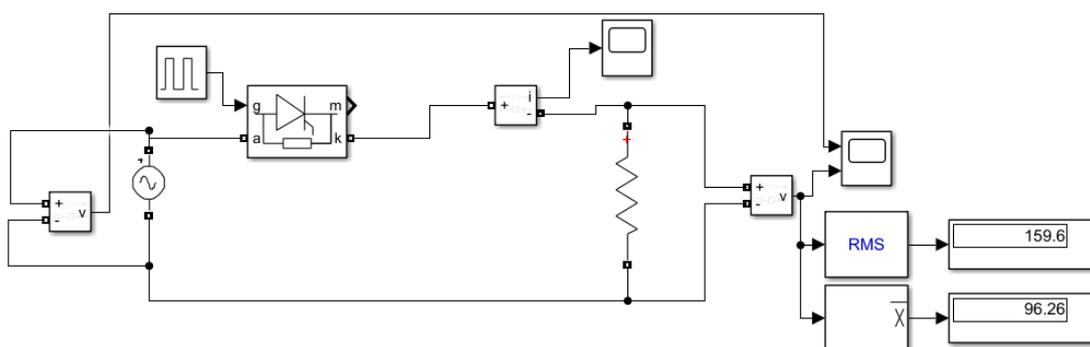


Figura 67. Rectificador controlado de media onda,  $\alpha=30^\circ$ . Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 68, la tensión en la carga es rectificadora igual que en el caso de un diodo, pero empieza a conducir un tiempo después.

Ese tiempo corresponde al ángulo de disparo del tiristor, en este caso de  $30^\circ$ .

Podemos obtener el tiempo en segundos, sabiendo que la frecuencia de la onda de tensión de la fuente es de 50Hz, que corresponde con 360°, por lo que el tiristor empezará la conducción con 1,67 milisegundos de retraso.

### Tensiones

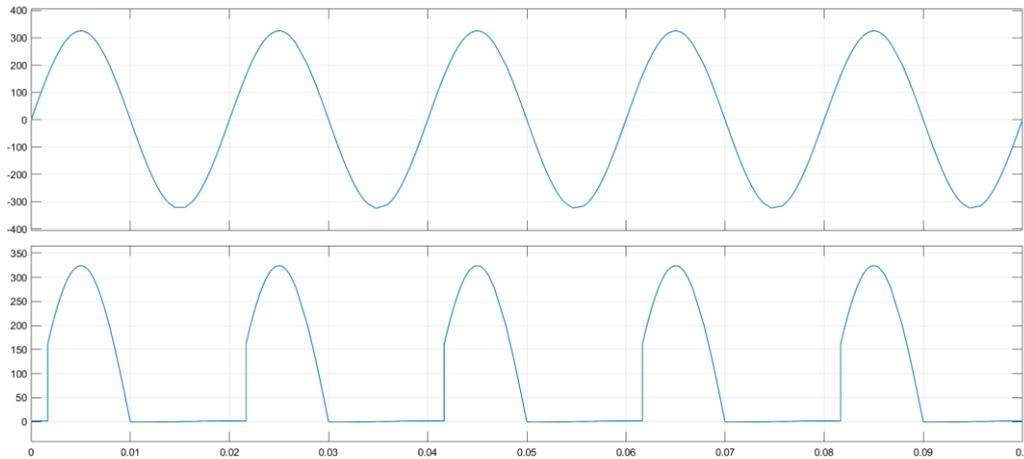


Figura 68. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Corriente

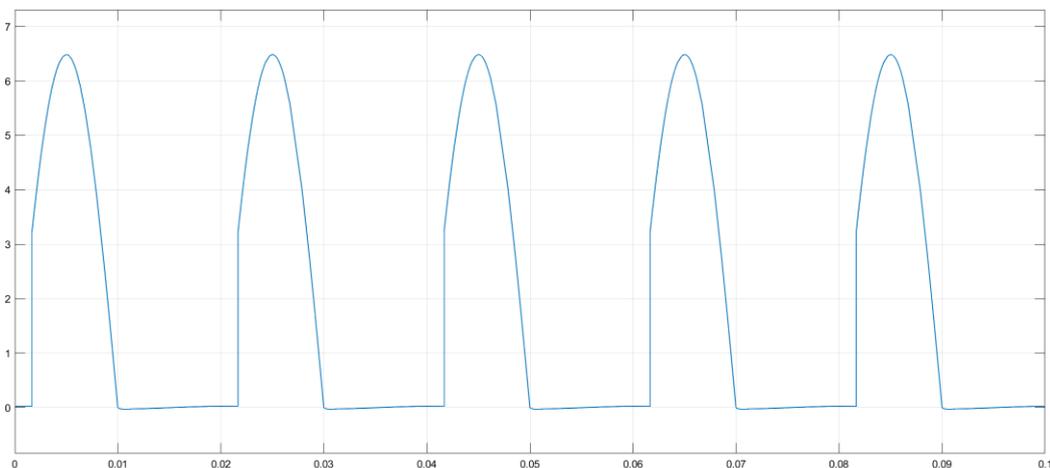


Figura 69. Corriente rectificador controlado de media onda,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{96,26 \cdot 1,925}{159,6 \cdot 3,193} = 0,3636$$

Según vimos en el apartado anterior, el rendimiento de un rectificador controlado dependía del ángulo de disparo  $\alpha$ .

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,3633$$

Vemos que los resultados son muy similares. Las pequeñas diferencias se deben a las aproximaciones.

- Ángulo de disparo: 60°

### Tensiones

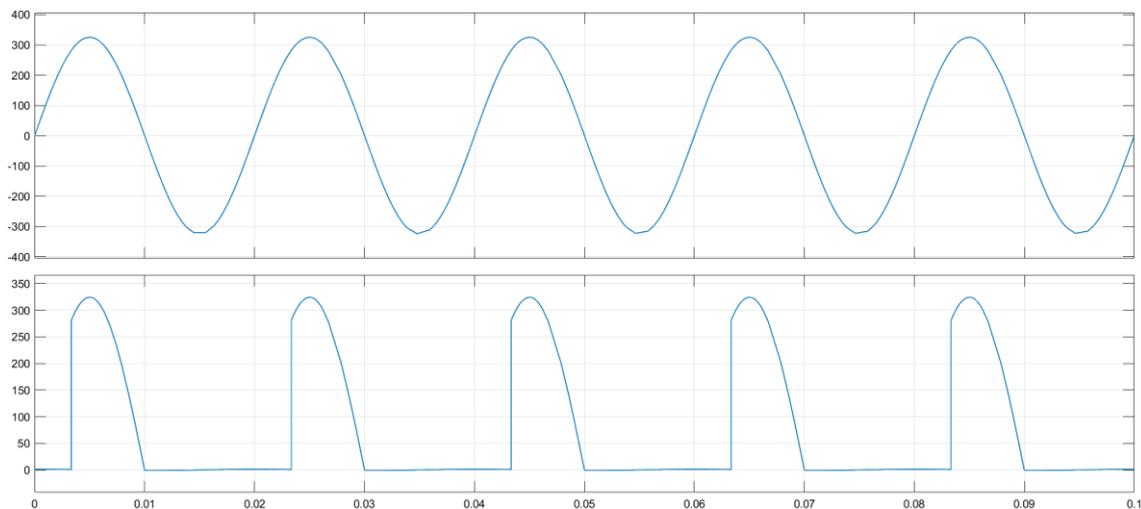


Figura 70. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Corriente

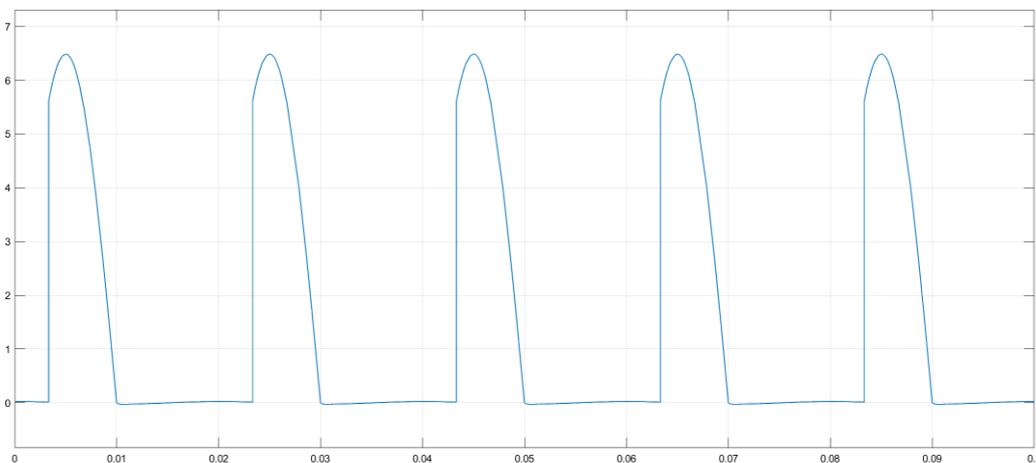


Figura 71. Corriente rectificador controlado de media onda,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

En este caso el ángulo de disparo es de  $60^\circ$  y el tiristor comienza a conducir con un retraso de 3,33 milisegundos y la tensión media y eficaz a la salida es inferior.

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{77,48 \cdot 1,55}{145,3 \cdot 2,906} = 0,2843$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \text{sen}(2\alpha))} = 0,2834$$

- Ángulo de disparo:  $90^\circ$

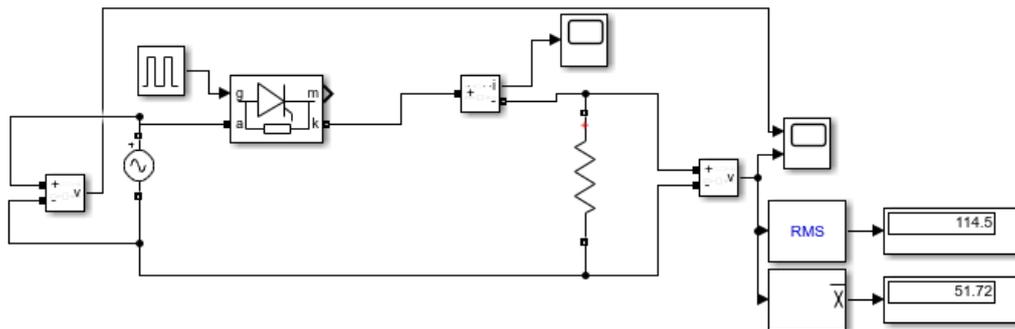


Figura 72. Rectificador controlado de media onda,  $\alpha=90^\circ$ . Elaboración propia

Tensiones

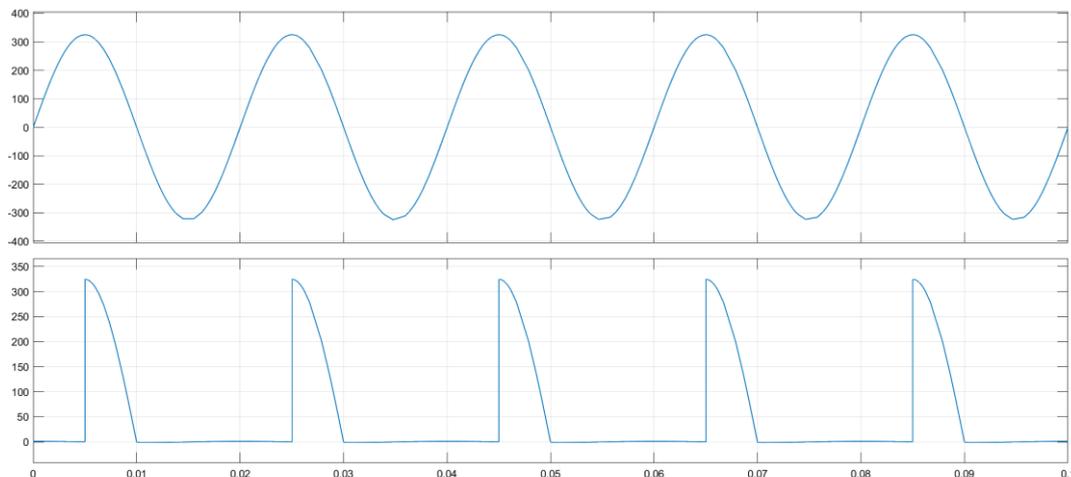


Figura 73. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Corriente

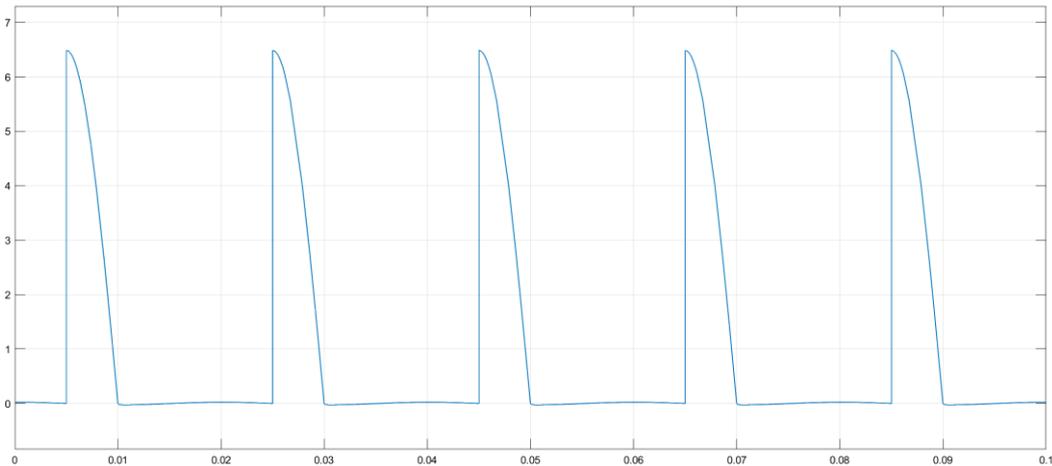


Figura 74. Corriente rectificador controlado de media onda,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

En este caso el ángulo de disparo es de  $90^\circ$  y el tiristor comienza a conducir con un retraso de 5 milisegundos y la tensión media y eficaz a la salida es inferior.

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{51,72 \cdot 1,034}{114,5 \cdot 2,291} = 0,2039$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,2026$$

- Ángulo de disparo:  $120^\circ$

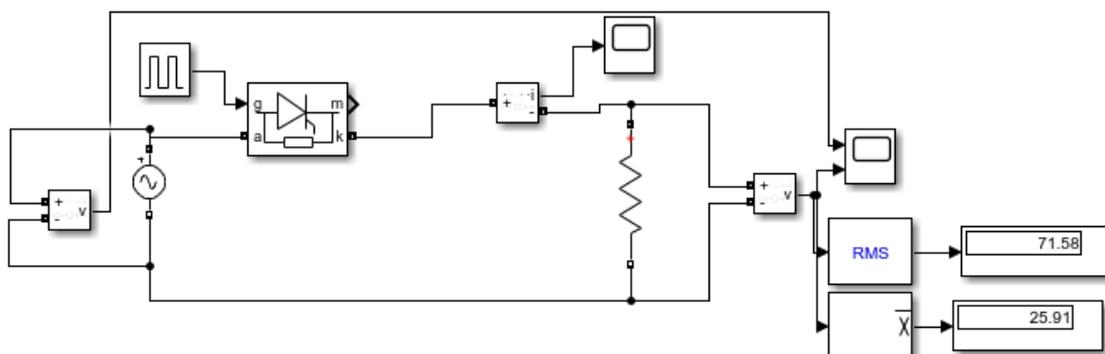


Figura 75. Rectificador controlado de media onda,  $\alpha=120^\circ$ . Elaboración propia

### Tensiones

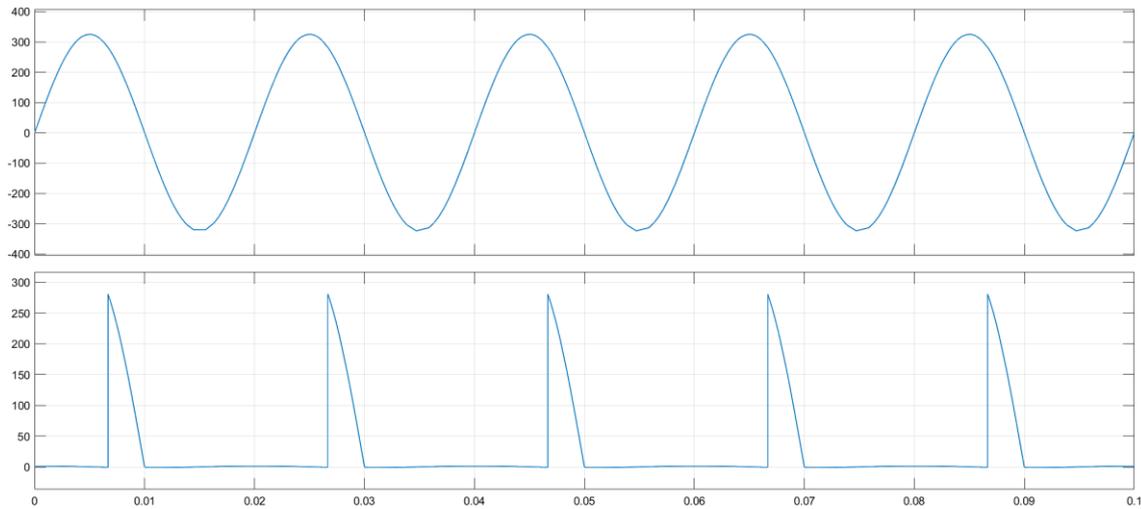


Figura 76. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

En este caso el ángulo de disparo es de  $120^\circ$  y el tiristor comienza a conducir con un retraso de 6,67 milisegundos y la tensión media y eficaz a la salida es inferior.

### Corriente

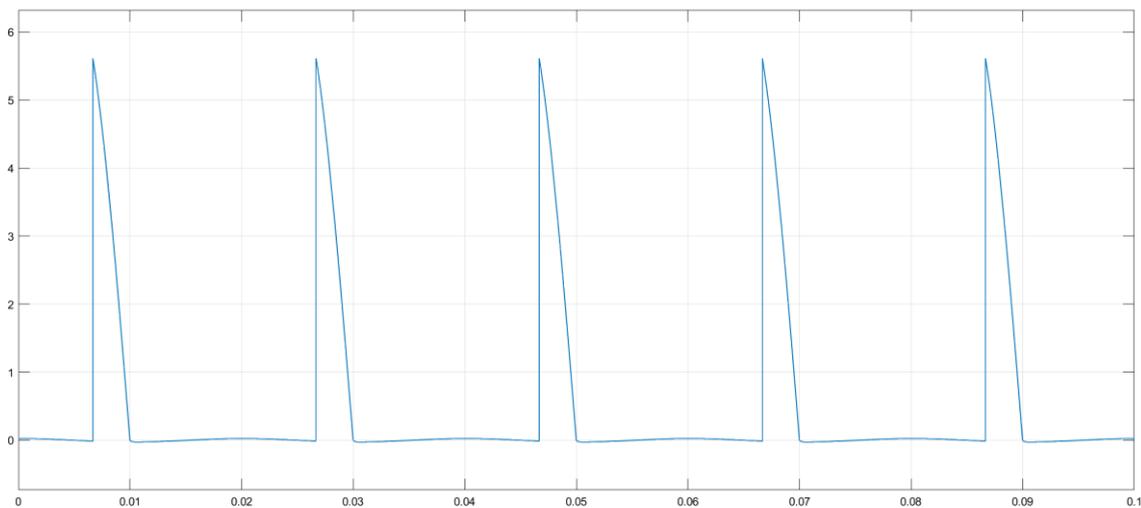


Figura 77. Corriente rectificador controlado de media onda,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{25,91 \cdot 0,5181}{71,58 \cdot 1,432} = 0,131$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,1296$$

- Ángulo de disparo: 150°

Tensiones

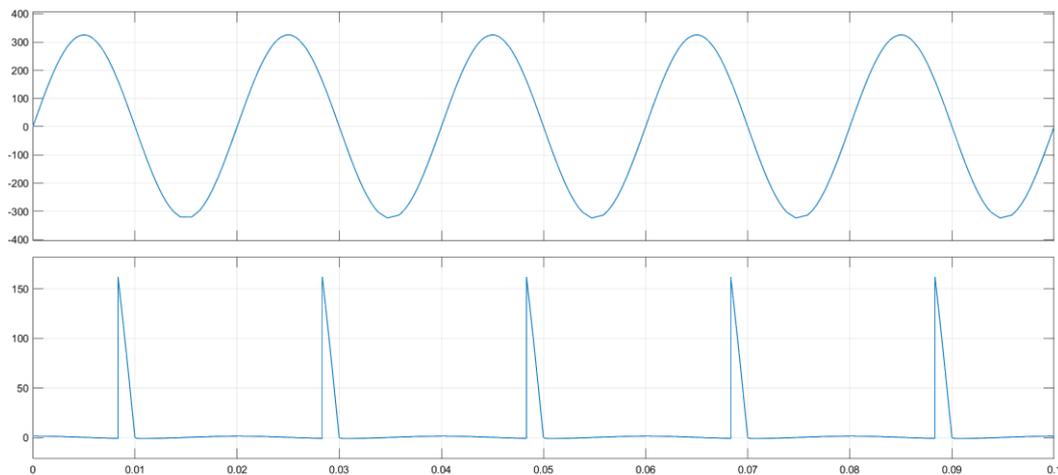


Figura 78. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Corriente

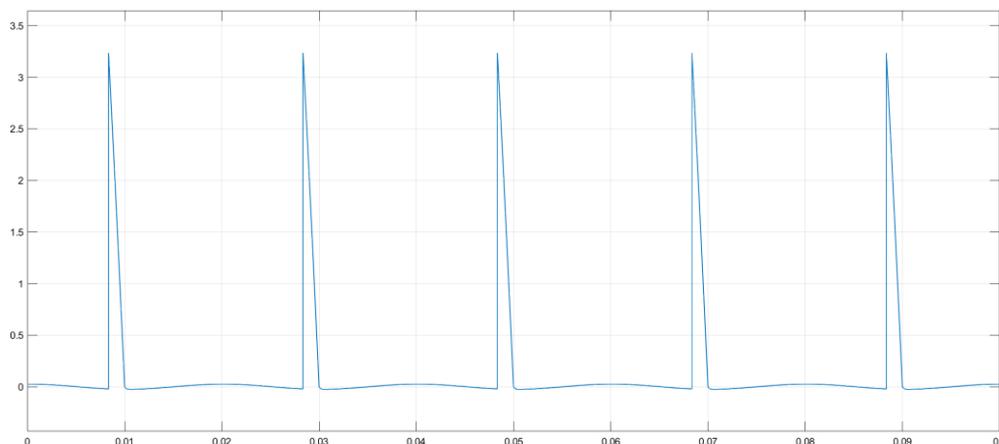


Figura 79. Corriente rectificador controlado de media onda,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

En este caso el ángulo de disparo es de  $150^\circ$  y el tiristor comienza a conducir con un retraso de 8,33 milisegundos y la tensión media y eficaz a la salida es inferior. Como podemos observar, el tiempo de ciclo que está conduciendo es muy pequeño, desde  $150$  a  $180^\circ$ .

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{6,971 \cdot 0,1394}{27,43 \cdot 0,5486} = 0,06459$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,0631$$

• **Carga RL (R=50Ω, L=70mH)**

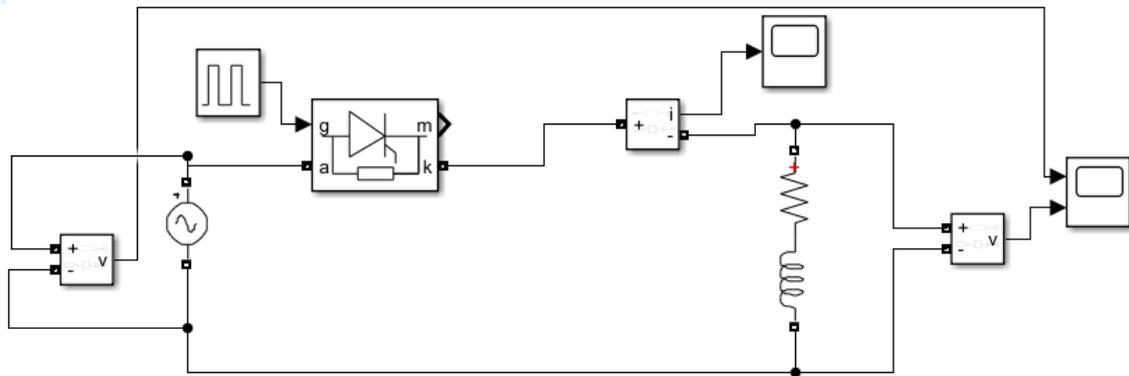


Figura 80. Rectificador controlado de media onda, carga RL en Simulink. Elaboración propia

A continuación, se muestran las formas de onda para un rectificador de media onda controlado, con una carga RL para distintos ángulos de disparo.

- Ángulo de disparo:  $30^\circ$

### Tensiones

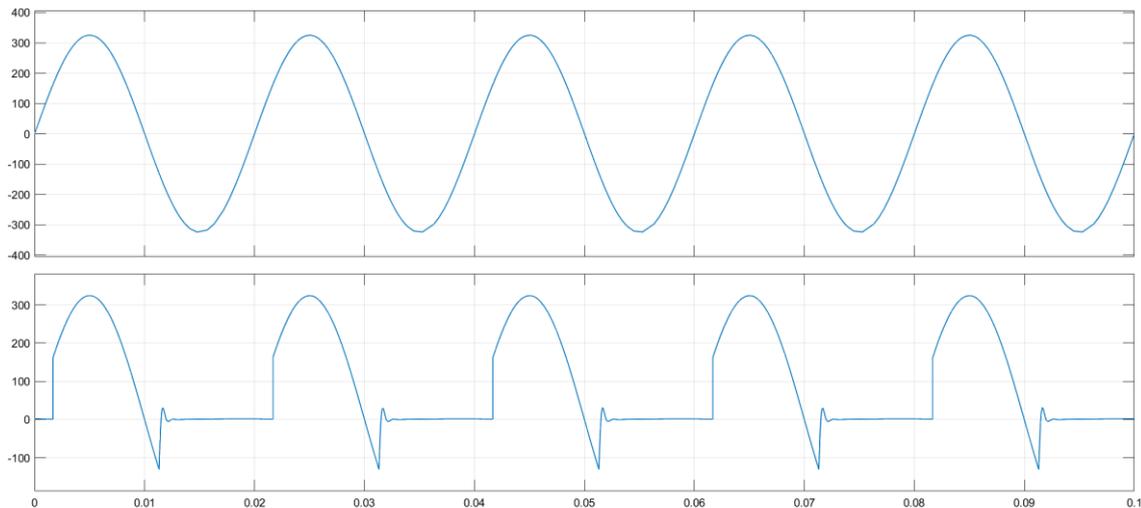


Figura 81. Tensiones rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

La forma de onda de la tensión de salida es prácticamente idéntica que en un rectificador no controlado salvo el retraso inicial en la conducción. La inductancia se descarga provocando una tensión negativa en la carga para evitar la desaparición de la corriente.

### Corriente

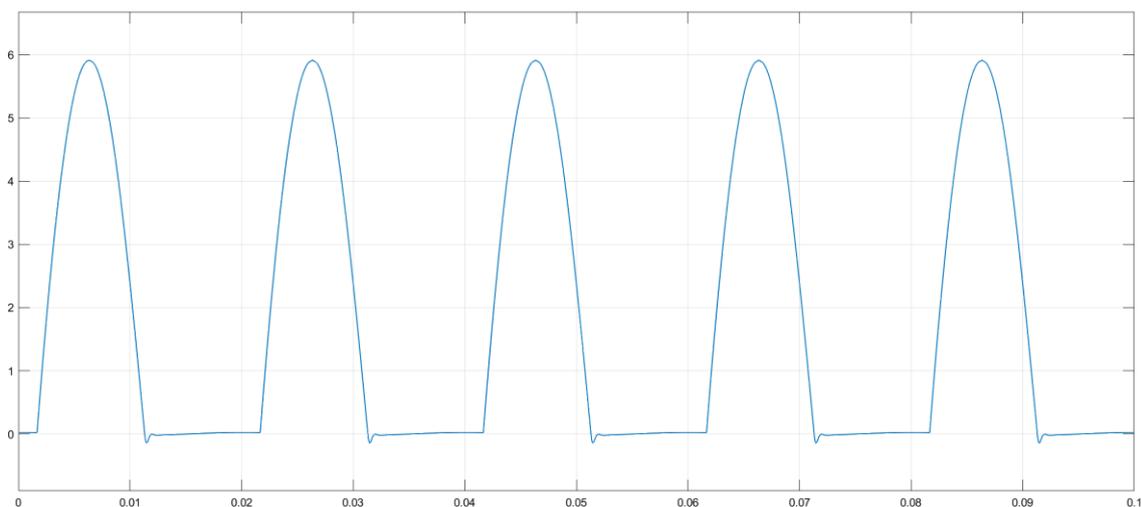


Figura 82. Corriente rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{91,97 \cdot 1,839}{161 \cdot 2,927} = 0,3589$$

El rendimiento es menor que en el caso de un rectificador controlado con una carga puramente resistiva, debido a que la inductancia hace que la tensión en la carga durante un determinado tiempo sea negativa y el valor medio sea inferior.

- Ángulo de disparo: 60°

Tensiones

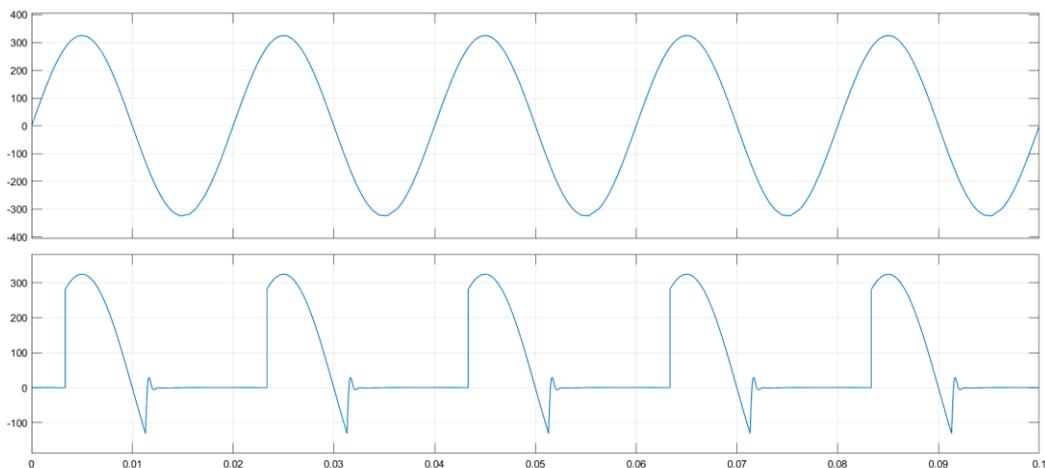


Figura 83. Tensiones rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Corriente

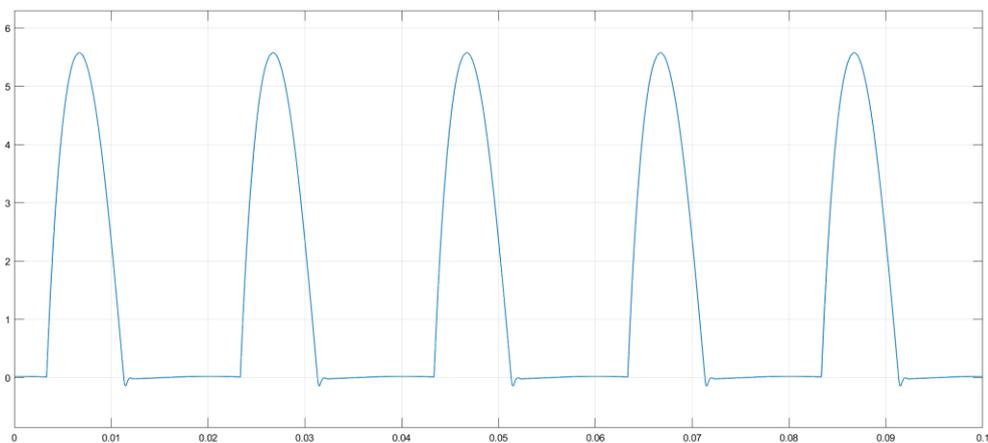


Figura 84. Corriente rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{73,19 \cdot 1,464}{146,8 \cdot 2,546} = 0,2866$$

- Ángulo de disparo: 90°

Tensiones

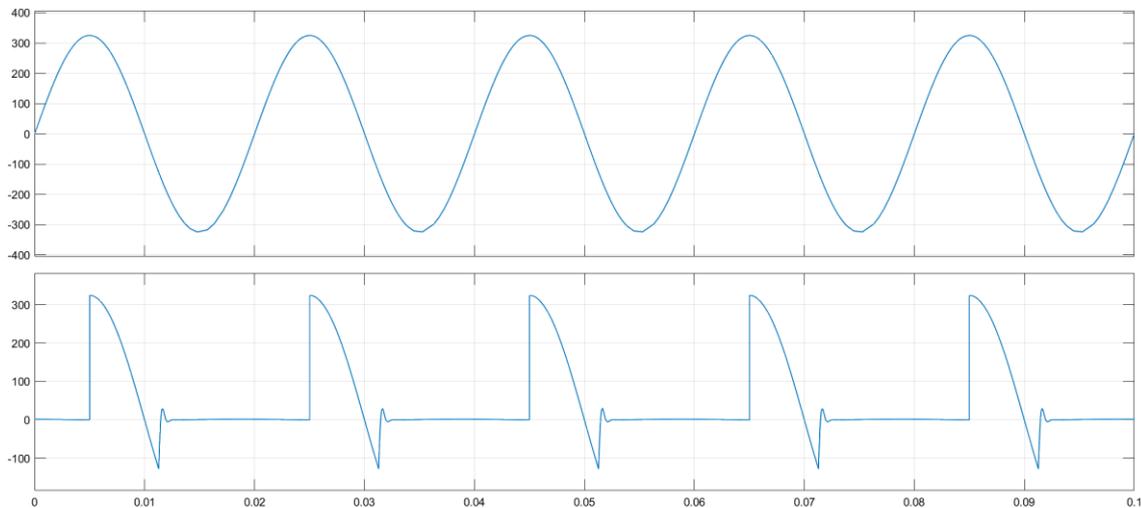


Figura 85. Tensiones rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Corriente

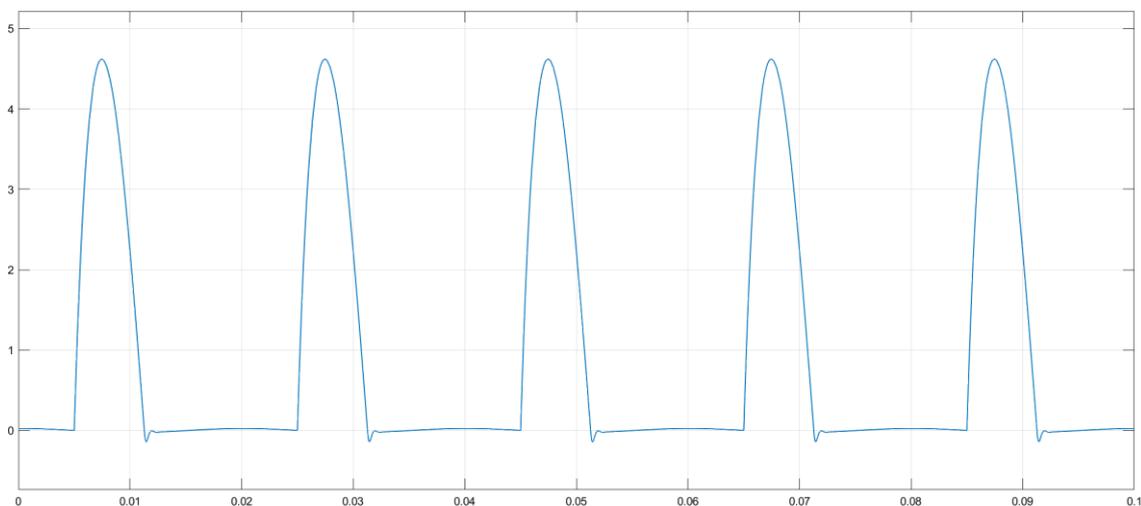


Figura 86. Corriente rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{47,56 \cdot 0,9512}{116,3 \cdot 1,864} = 0,2087$$

- Ángulo de disparo: 120°

Tensiones

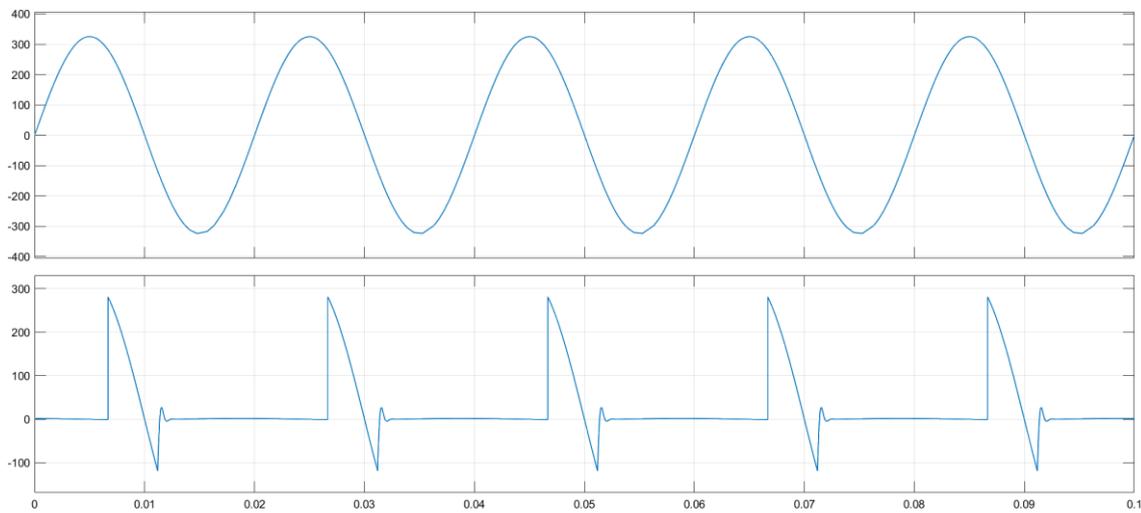


Figura 87. Tensiones rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Corriente

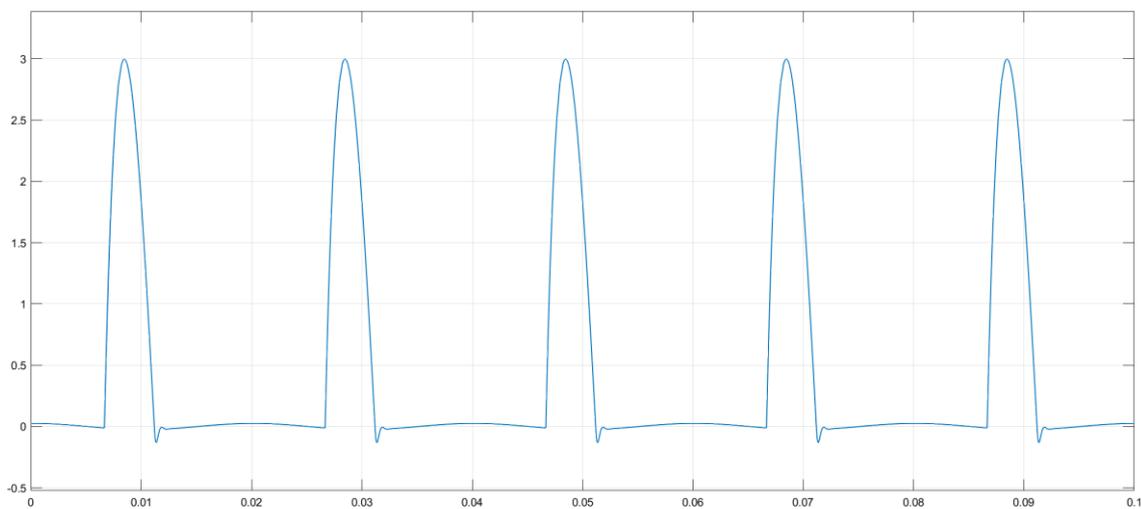


Figura 88. Corriente rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{22,27 \cdot 0,4455}{73,88 \cdot 1,025} = 0,131$$

- Ángulo de disparo: 150°

Tensiones

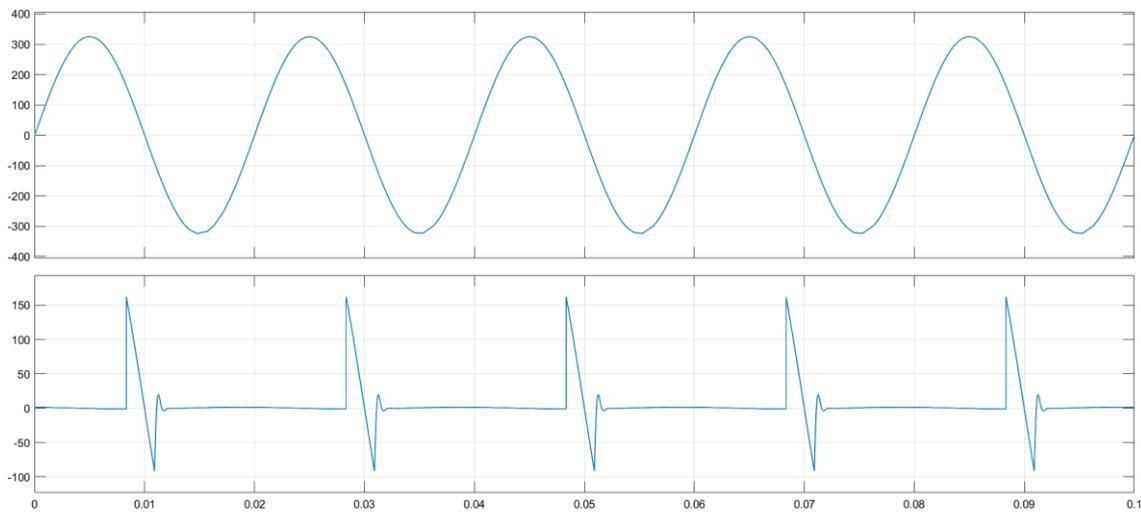


Figura 89. Tensiones rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Corriente

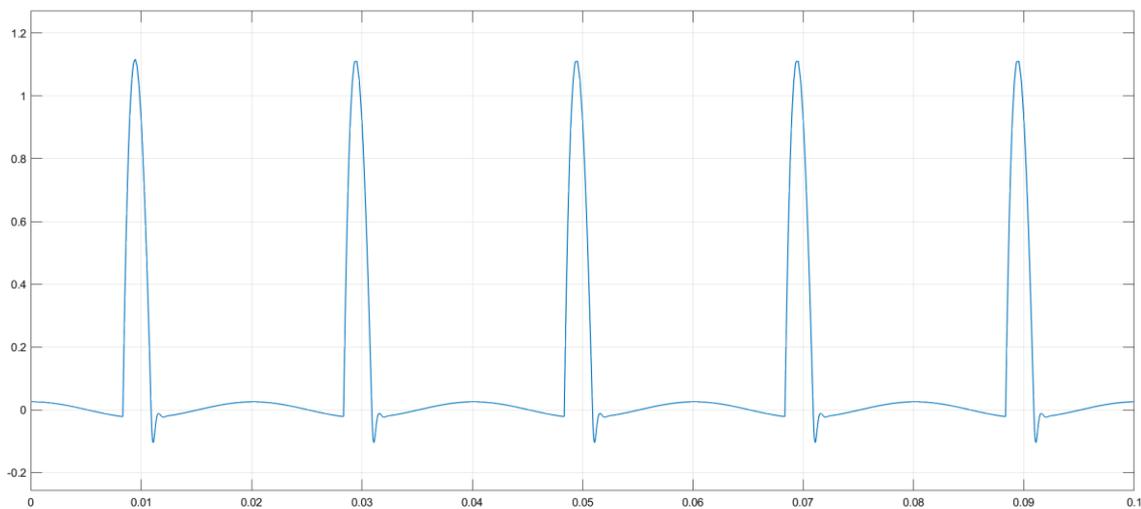


Figura 90. Corriente rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{4,815 \cdot 0,09631}{30,13 \cdot 0,29} = 0,05306$$

## 5.3.- Puente no controlado

El rectificador en puente o de onda completa utiliza cuatro diodos y conducen en cada semiperíodo de dos en dos. Este montaje permite aprovechar el segundo semiperíodo de la fuente de tensión.

A continuación, se muestran los resultados de la simulación de este diseño para diferentes cargas.

- **Carga R (R=50Ω)**

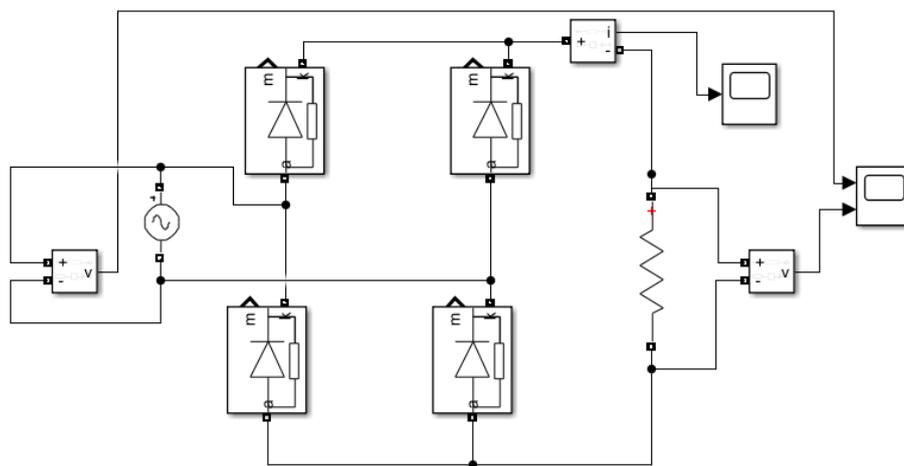


Figura 91. Rectificador no controlado en puente, carga R en Simulink. Elaboración propia

En la figura 92 se puede observar claramente la tensión de salida. Durante el semiciclo positivo y negativo cada par de diodos conducen, cosa que no sucedía en la figura 42.

### Tensiones

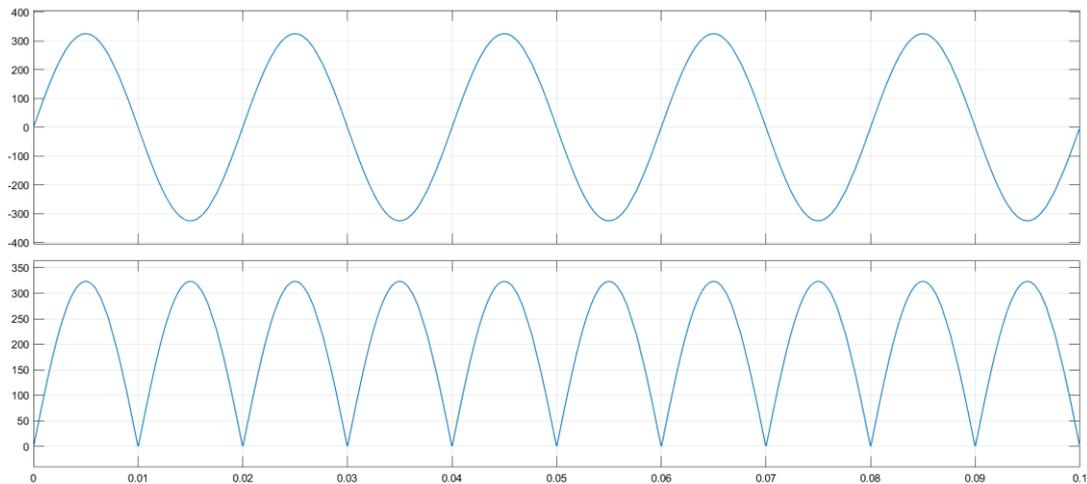


Figura 92. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga R. Elaboración propia

La carga es puramente resistiva, por lo que la corriente tiene la misma forma de onda que la tensión de salida ( $I_s = V_s/R$ ), como se observa en la figura 93.

### Corriente

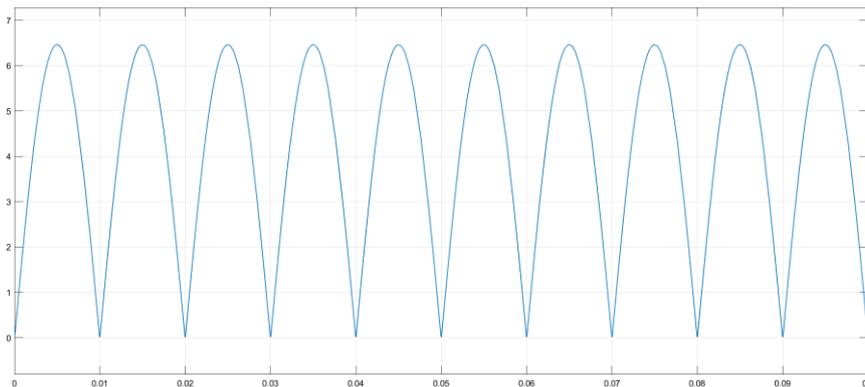


Figura 93. Corriente rectificador no controlado en puente, carga R. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{205,3 \cdot 4,105}{228,4 \cdot 4,567} = 0,8079$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{\frac{2V_M}{\pi} \cdot \frac{2V_M}{\pi R}}{\frac{V_M}{\sqrt{2}} \cdot \frac{V_M}{\sqrt{2}R}} = \frac{8}{\pi^2} = 0,8106$$

Vemos que el rendimiento es similar, las pequeñas diferencias se deben a las aproximaciones realizadas.

También podemos observar que el rendimiento es el doble que el del montaje de media onda. Esto se debe a que el montaje con cuatro diodos aprovecha las dos semiondas y no solo una.

- **Carga R con filtro C (R=50Ω, C=3000μF)**

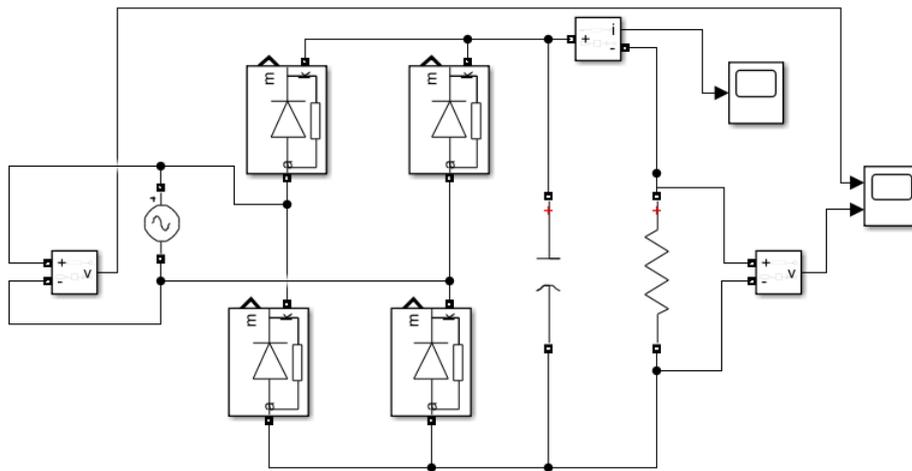


Figura 94. Rectificador no controlado en puente, carga R con filtro en Simulink. Elaboración propia

En la figura 96 vemos como se obtiene una corriente continua con un rizado muy pequeño debido al filtro, como en el montaje de media onda.

El filtro es un condensador que se coloca paralelo a la carga. Este se encarga de alisar las ondas de corriente y tensión y así obtener una corriente continua más pura, lo que implica que el valor medio y eficaz de la tensión de salida será mayor.

### Tensiones

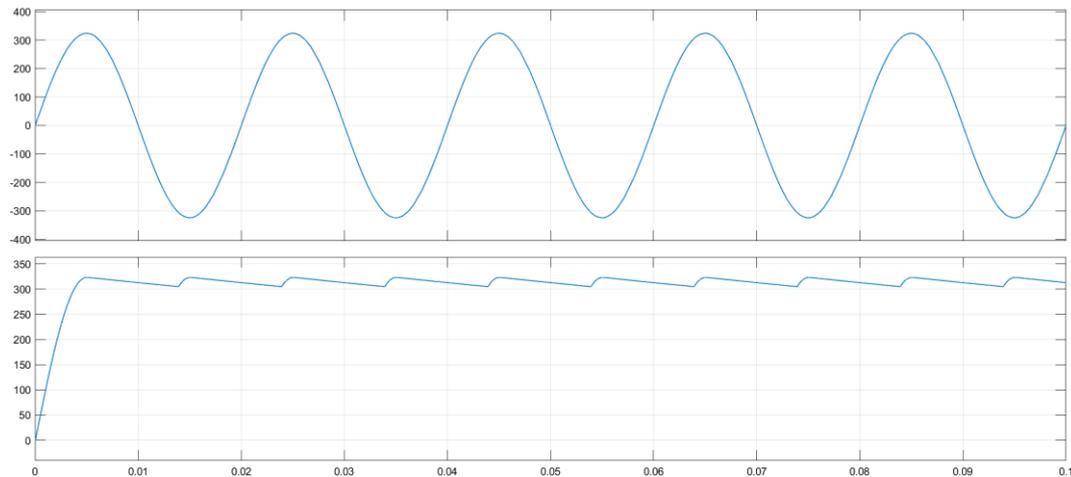


Figura 95. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga R con filtro. Elaboración propia

### Corriente

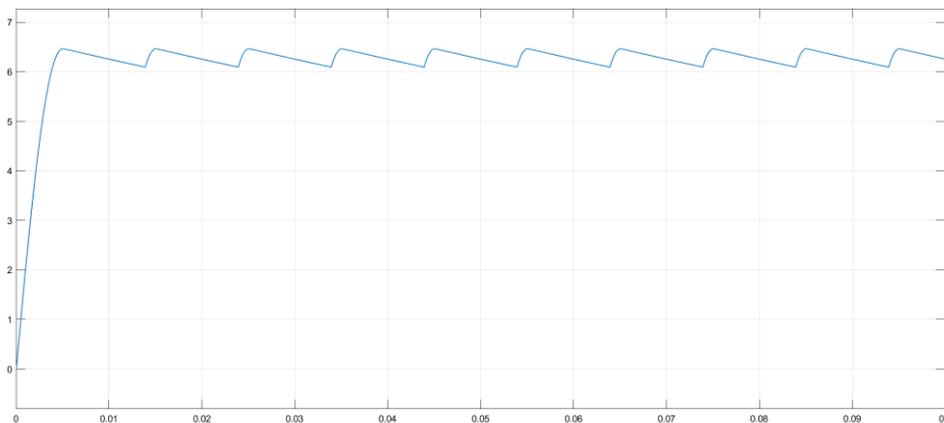


Figura 96. Corriente rectificador no controlado en puente, carga R con filtro. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{314,4 \cdot 6,287}{314,4 \cdot 6,288} = 0,9997$$

Obtenemos unos rendimientos elevados, ya que la salida es prácticamente continua, salvo el pequeño rizado.

- Carga RL ( $R=50\Omega$ ,  $L=170\text{mH}$ )

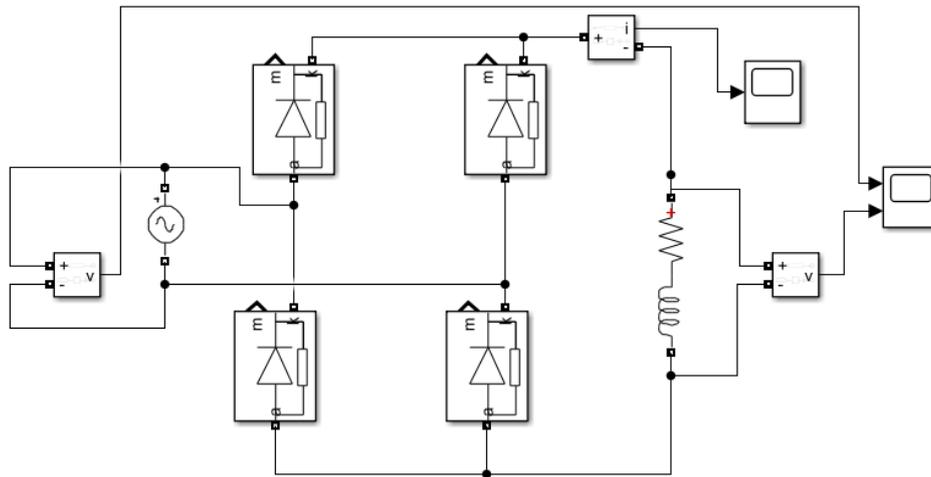


Figura 97. Rectificador no controlado en puente, carga RL en Simulink. Elaboración propia

### Tensiones

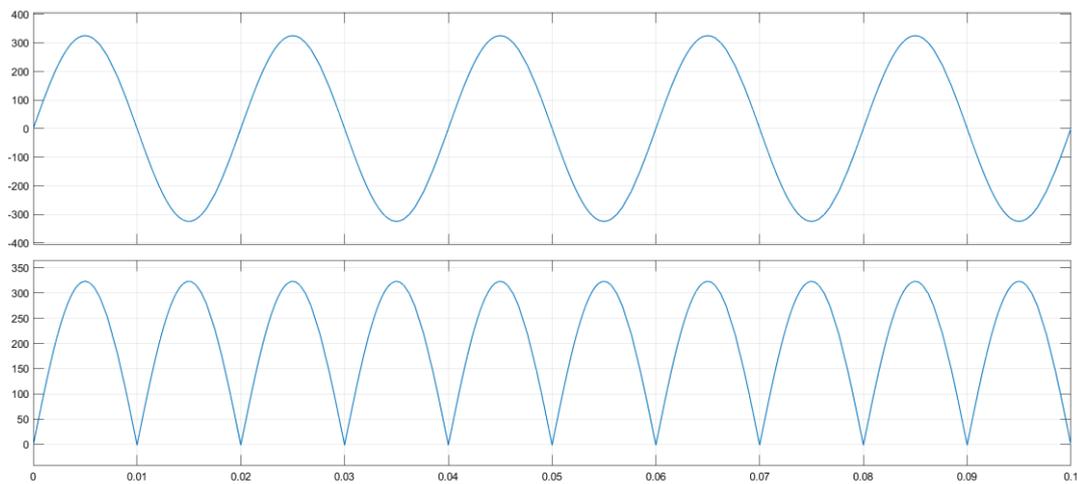


Figura 98. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga RL. Elaboración propia

## Corriente

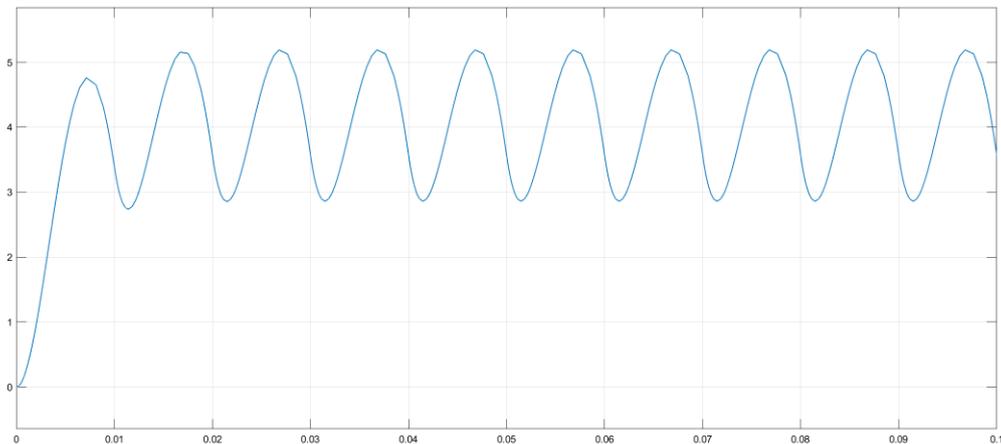


Figura 99. Corriente rectificador no controlado en puente, carga RL. Elaboración propia

Podemos observar en la figura 99 que, después del transitorio inicial, la corriente por la carga alcanza una evolución periódica estable.

La corriente se transfiere desde un par de diodos al otro cuando cambia la polaridad del generador y esta nunca pasa por cero, como vimos en la teoría en el apartado anterior.

## Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{205,3 \cdot 4,105}{228,4 \cdot 4,188} = 0,8809$$

## • Carga RLE

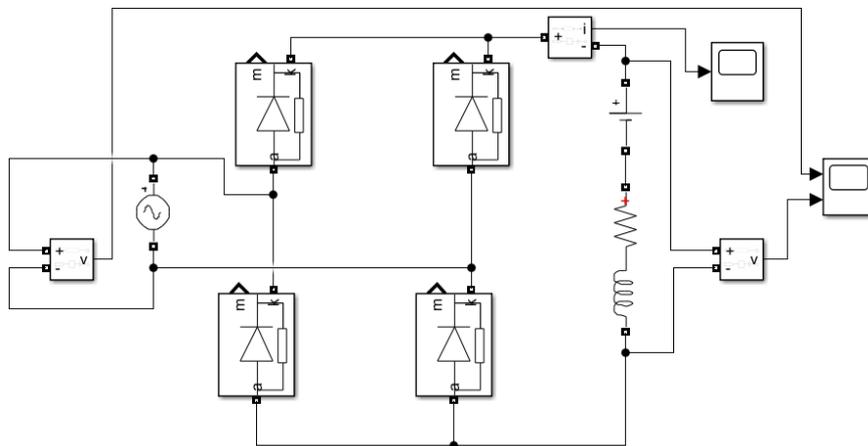


Figura 100. Rectificador no controlado en puente, carga RLE en Simulink. Elaboración propia

A continuación, estudiaremos el rectificador de onda completa con carga RLE.

Dependiendo del valor de los parámetros, podremos encontrarnos en situación de conducción continua o conducción discontinua.

- Conducción continua ( $R=50\Omega$ ,  $L=70\text{mH}$ ,  $E=30\text{V}$ )

### Tensiones

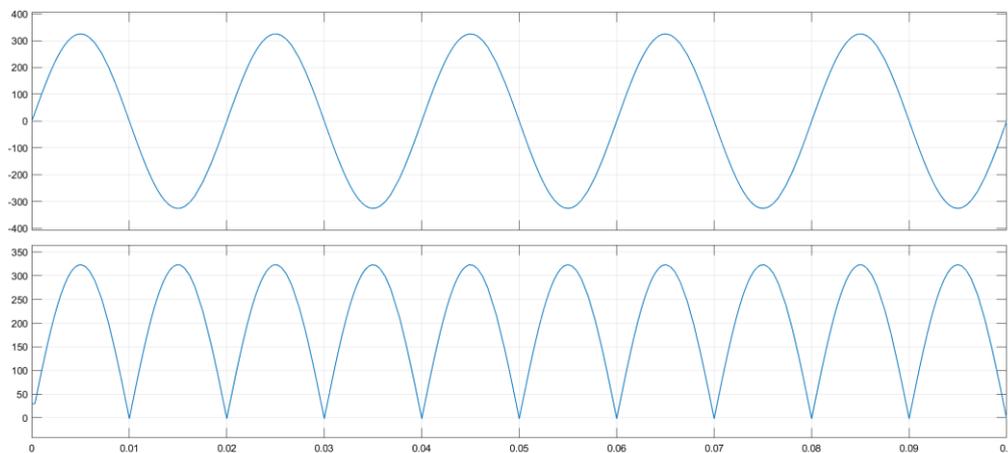


Figura 101. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción continua. Elaboración propia

### Corriente

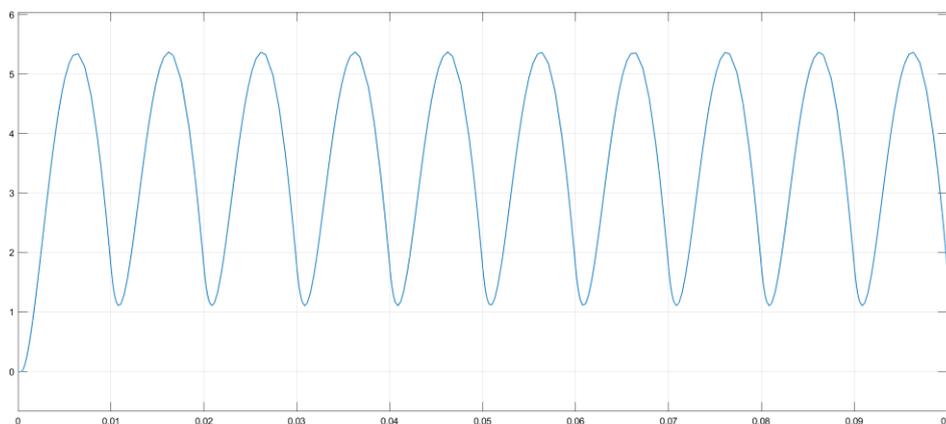


Figura 102. Corriente rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción continua. Elaboración propia

En este caso vemos que la corriente alcanza un valor periódico estable y no pasa por cero en ningún momento.

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{205,3 \cdot 3,505}{228,4 \cdot 3,804} = 0,8282$$

- Conducción discontinua ( $R=50\Omega$ ,  $L=70\text{mH}$ ,  $E=200\text{V}$ )

Tensiones

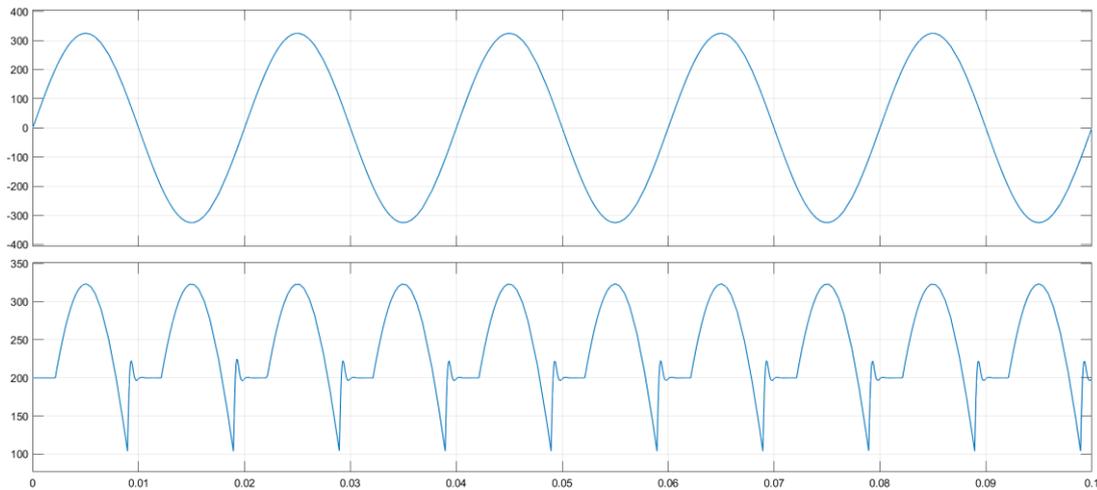


Figura 103. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción discontinua. Elaboración propia

En este caso, podemos observar en la figura 104 que la corriente pasa por cero en algún momento de cada ciclo.

Corriente

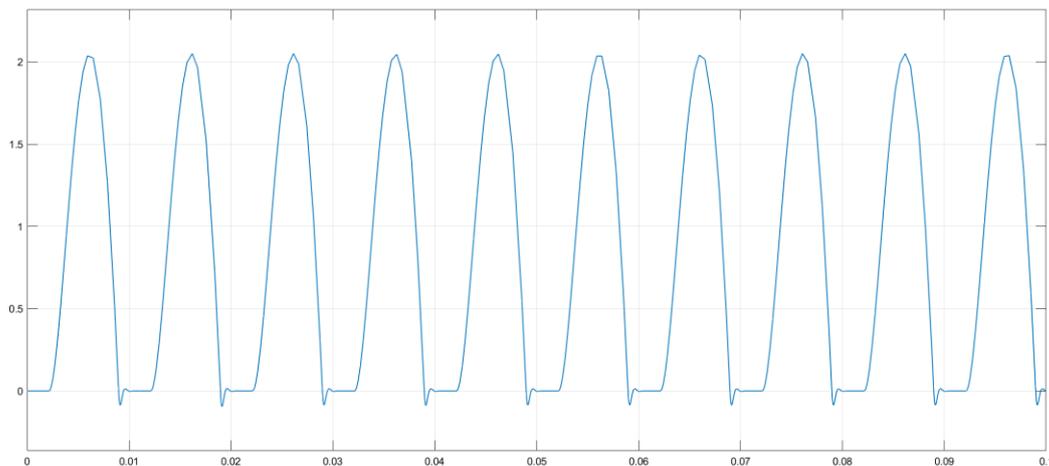


Figura 104. Corriente rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción discontinua. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{241,3 \cdot 0,8251}{247,9 \cdot 1,151} = 0,6979$$

Podemos ver claramente que el rendimiento en conducción continua es superior al de conducción discontinua.

## 5.4.- Puente controlado

- Carga R ( $R=50\Omega$ )

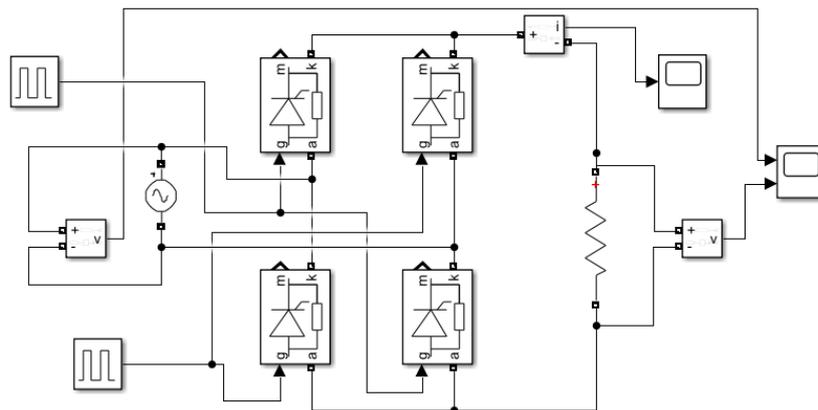


Figura 105. Rectificador controlado en puente, carga R en Simulink. Elaboración propia

Un rectificador de onda completa controlado utiliza cuatro tiristores en lugar de diodos.

Cada par de tiristores conducirán dependiendo del ángulo de disparo, que puede variar desde  $0^\circ$  (funcionamiento como diodos) hasta  $180^\circ$  (no conducen en ningún momento del ciclo).

Por ello, a continuación, se muestran las formas de onda y rendimientos para el mismo montaje, pero con diferentes ángulos de disparo.

- Ángulo de disparo:  $30^\circ$

Tensiones

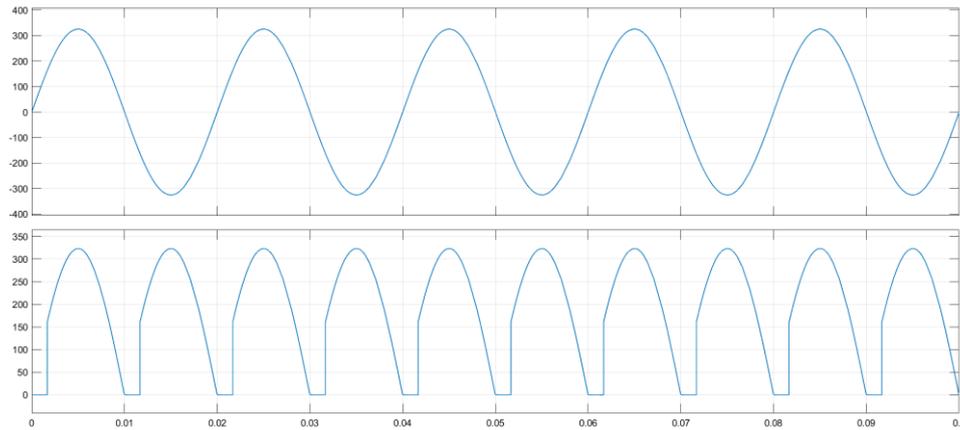


Figura 106. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Corriente

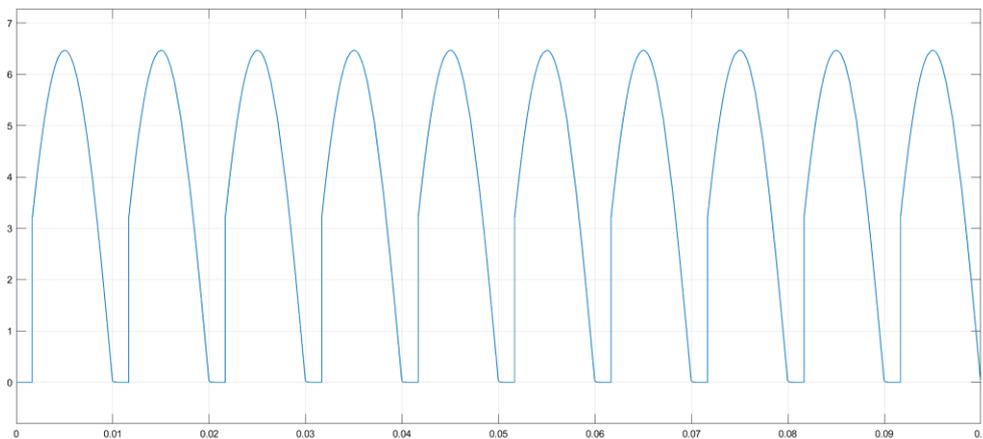


Figura 107. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

Como se puede observar en la figura 106, la tensión en la carga es rectificadora igual que en el caso de media onda, pero aprovechando ambos semiciclos.

Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{191,7 \cdot 3,834}{225,1 \cdot 4,502} = 0,7253$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,7266$$

Vemos que ambos rendimientos son muy similares, las diferencias se deben a las aproximaciones adoptadas.

- Ángulo de disparo:  $60^\circ$

### Tensiones

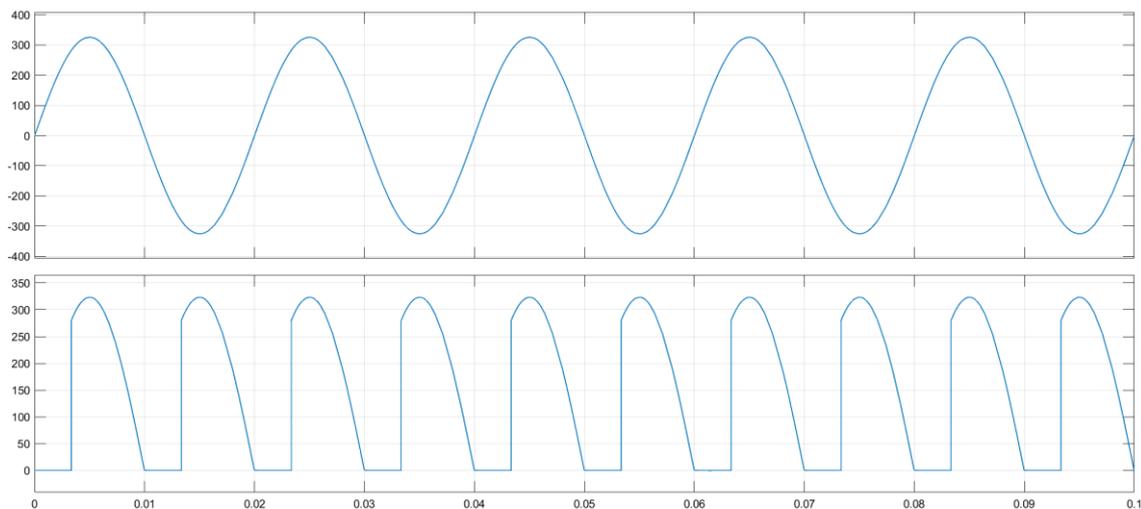


Figura 108. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Corriente

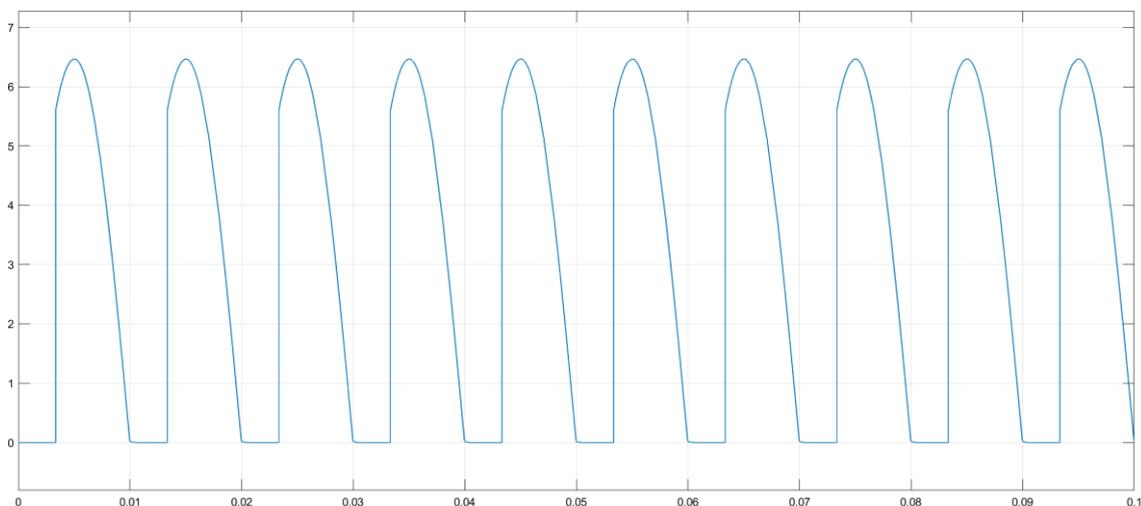


Figura 109. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{154,1 \cdot 3,082}{204,9 \cdot 4,098} = 0,5656$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,5667$$

- Ángulo de disparo: 90°

### Tensiones

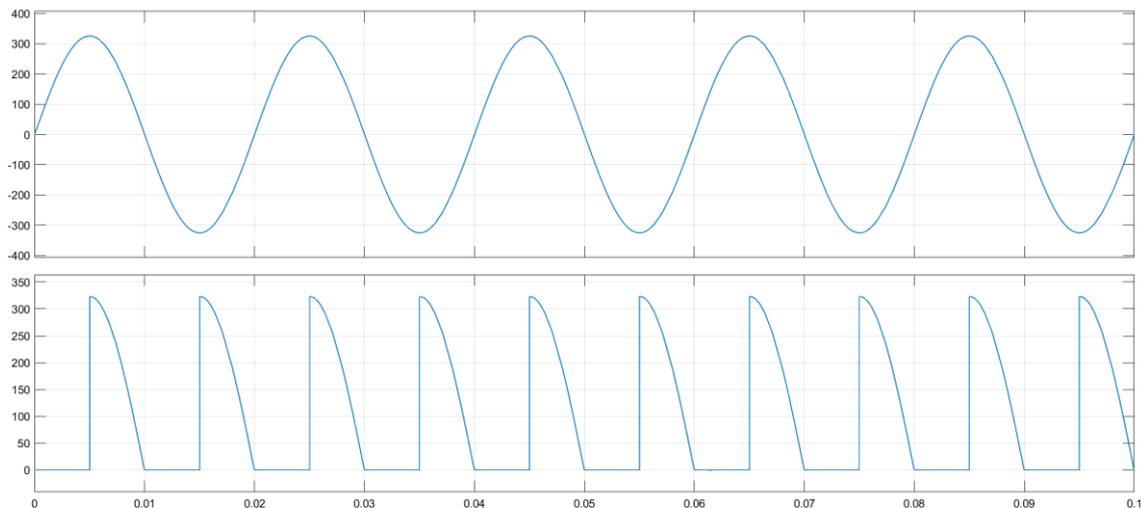


Figura 110. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Corriente

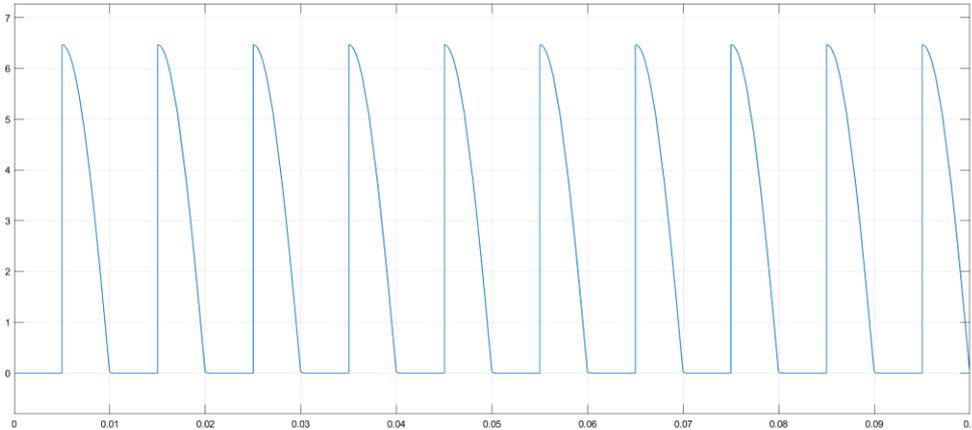


Figura 111. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{102,6 \cdot 2,053}{161,5 \cdot 3,229} = 0,4041$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,4053$$

- Ángulo de disparo:  $120^\circ$

### Tensiones

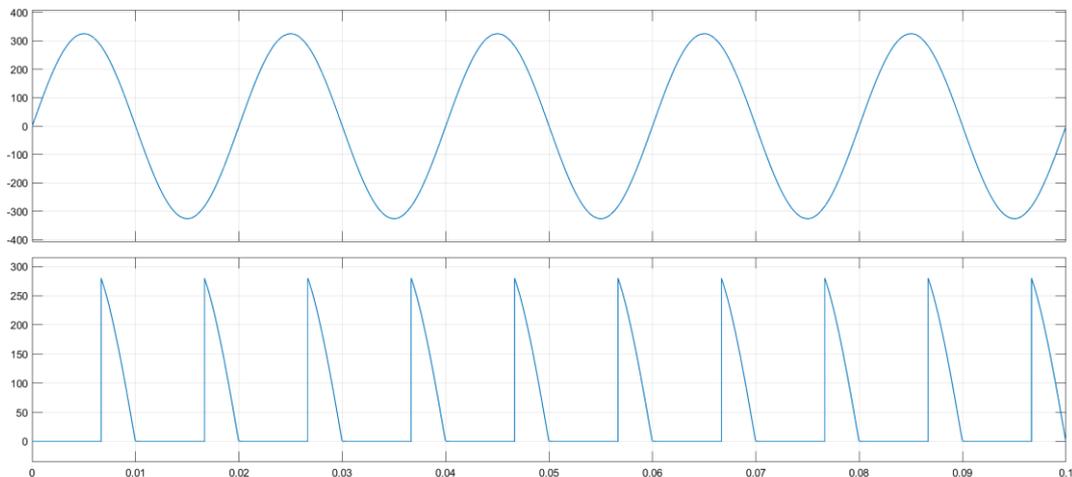


Figura 112. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Corriente

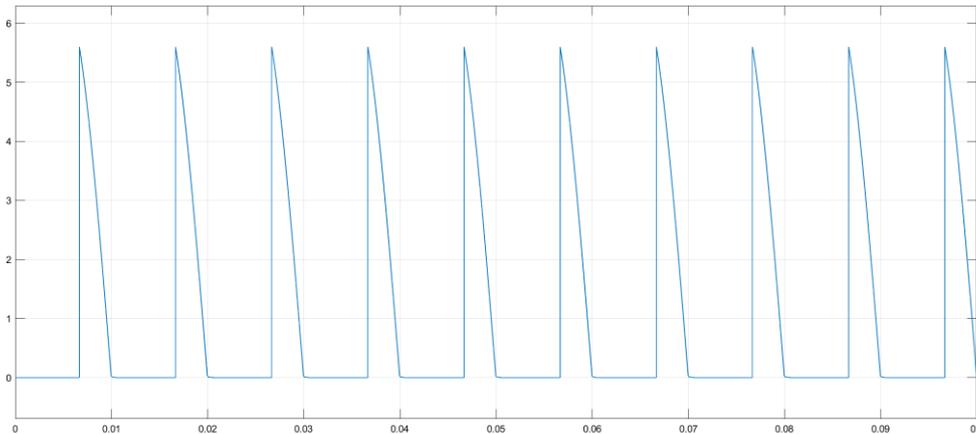


Figura 113. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

### Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{51,2 \cdot 1,024}{100,8 \cdot 2,016} = 0,258$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,2591$$

- Ángulo de disparo:  $150^\circ$

### Tensiones

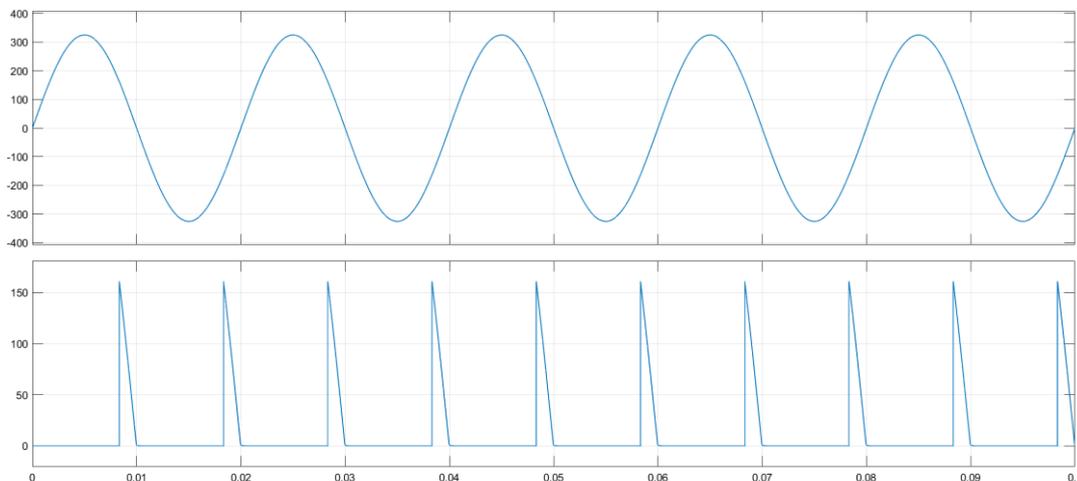


Figura 114. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

## Corriente

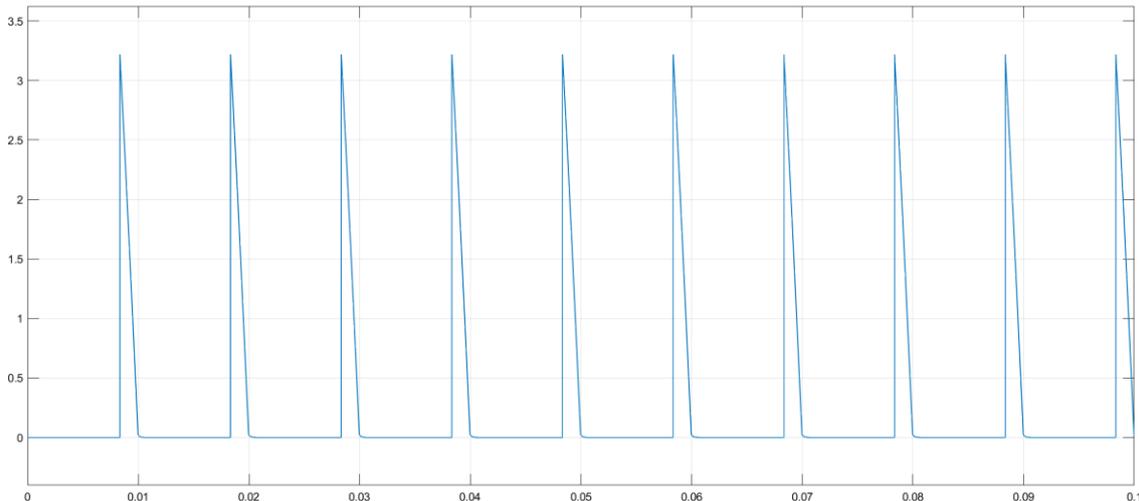


Figura 115. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia

## Rendimiento

$$\eta = \frac{V_{carga_{AV}} \cdot I_{carga_{AV}}}{V_{carga_{RMS}} \cdot I_{carga_{RMS}}} = \frac{13,61 \cdot 0,2722}{38,47 \cdot 0,7694} = 0,1252$$

Vamos a comprobar los resultados obtenidos en la simulación con los obtenidos de forma analítica:

$$\eta = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{(1 + \cos\alpha)^2}{(2\pi - 2\alpha + \sin(2\alpha))} = 0,1261$$

En este apartado hemos podido visualizar el comportamiento de los rectificadores para diferentes topologías y cargas, viendo cómo afectan los valores de los parámetros de bobinas, condensadores, ángulos de disparo de tiristores, etc.

Además, se han comparado los valores obtenidos en la simulación con los valores calculados analíticamente, pudiendo observar que son prácticamente iguales.

También se ha comprobado las formas de onda obtenidas con las que se esperaban obtener, como por ejemplo en los rectificadores con carga resistiva, el alisamiento de la tensión mediante filtros, etc.



---

Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

---

Máster en Ingeniería Industrial



## 6.- ESTUDIO ECONÓMICO

Una parte muy importante de cualquier proyecto es el estudio económico, ya que nos permitirá conocer el coste y la viabilidad del mismo, y, así, determinar si puede ser rentable o no.

Este proyecto trata de diseñar en MATLAB diferentes topologías de rectificadores de baja potencia para alimentación y analizarlas.

Para estructurar de forma más clara el estudio económico, vamos a ver la secuencia de etapas que se han llevado a cabo durante la realización del proyecto.

### 6.1- Etapas del proyecto

Las etapas de un proyecto se pueden resumir de forma general en cinco, independientemente de su alcance, objetivos y particularidades:

**1. Inicio:** La fase de inicio es crucial en el ciclo de vida del proyecto, ya que es el momento de definir el alcance y proceder a la selección del equipo.

En nuestro caso, corresponde a la elección de un trabajo de fin de máster, definiendo el alcance y los objetivos a conseguir.

**2. Planificación:** Es a menudo la fase más difícil para un director de proyecto, ya que tiene que hacer un importante esfuerzo de abstracción para calcular las necesidades de personal, recursos y equipo que habrán de preverse para lograr la consecución a tiempo y dentro de los parámetros previstos. Se trata, en definitiva, de crear un conjunto completo de planes de proyecto que establezcan una clara hoja de ruta.

En esta etapa se estiman las necesidades para realizar el proyecto. Primero se estructura en diferentes apartados y después observamos las herramientas a utilizar, principalmente el software de MATLAB 2021b.

**3. Ejecución:** En base a la planificación, habrá que completar las actividades programadas con sus tareas. En esta etapa se deben gestionar: el riesgo, el cambio, los eventos, los gastos, los recursos, el tiempo y las actualizaciones y modificaciones. Por ejemplo, en los proyectos de construcción, es esencial vigilar los plazos para evitar retrasos, un riesgo frecuente en esta fase.

En esta etapa se procede a la ejecución en sí del proyecto, modelando, simulando y analizando los resultados del estudio, vigilando que se cumplen las tareas para entregar en tiempo el proyecto.



**4. Seguimiento y control:** Esta fase comprende los procesos necesarios para realizar el seguimiento, revisión y monitorización del progreso del proyecto. Se concibe como el medio de detectar desviaciones para poder identificar las áreas en las que puede ser requerido un cambio en la planificación.

La etapa de seguimiento y control se encuentra naturalmente asociada a la de ejecución, de la que no puede concebirse de forma separada.

En nuestro caso específico el tutor irá revisando periódicamente la evolución del proyecto, proponiendo sugerencias de mejora y modificaciones.

**5. Cierre:** Esta fase comprende todos procesos orientados a completar formalmente el proyecto y las obligaciones contractuales inherentes. Una vez terminado, se establece formalmente que el proyecto ha concluido.

En nuestro caso, el proyecto habrá finalizado una vez se haya entregado definitivamente y se haya defendido ante el tribunal de evaluación.

## 6.2.- Presupuesto

A continuación, gracias al diagrama de Gantt, adjunto a continuación en la figura 116, se ha podido obtener el número de horas empleado por el equipo, formado por un ingeniero y un director de proyecto.

Etapa	Director de proyecto (h)	Ingeniero (h)
Inicio del proyecto	8	40
Ejecución del proyecto	16	144
Estudio económico	8	32
Fin del proyecto	40	24
<b>TOTAL</b>	<b>72</b>	<b>240</b>

Tabla 1. Horas de personal. Elaboración propia

Una vez obtenidas las horas de cada integrante, se calcula el coste de personal en función del salario medio de cada uno, en €/h, como podemos ver en la tabla 2.

Equipo	Horas	€/Hora	Coste (€)
Ingeniero	240	15	3600
Director de proyecto	72	25	1800
<b>TOTAL</b>			<b>5400</b>

Tabla 2. Costes de personal. Elaboración propia



A continuación, se muestran en la tabla 3 el resto de costes para la completa realización del proyecto.

Herramientas	Coste (€)
<b>Hardware</b>	<b>1200</b>
-Ordenador ingeniero	600
-Ordenador director	600
<b>Software</b>	<b>2100</b>
-Paquete Office	100
-MATLAB	2000
<b>TOTAL</b>	<b>3300</b>

Tabla 3. Coste de Hardware y Software. Elaboración propia

Finalmente, nos queda un presupuesto total sin IVA de **8700€**.

Presupuesto	Coste (€)
Herramientas	3300
Equipo	5400
<b>TOTAL</b>	<b>8700</b>

Tabla 4. Presupuesto final. Elaboración propia

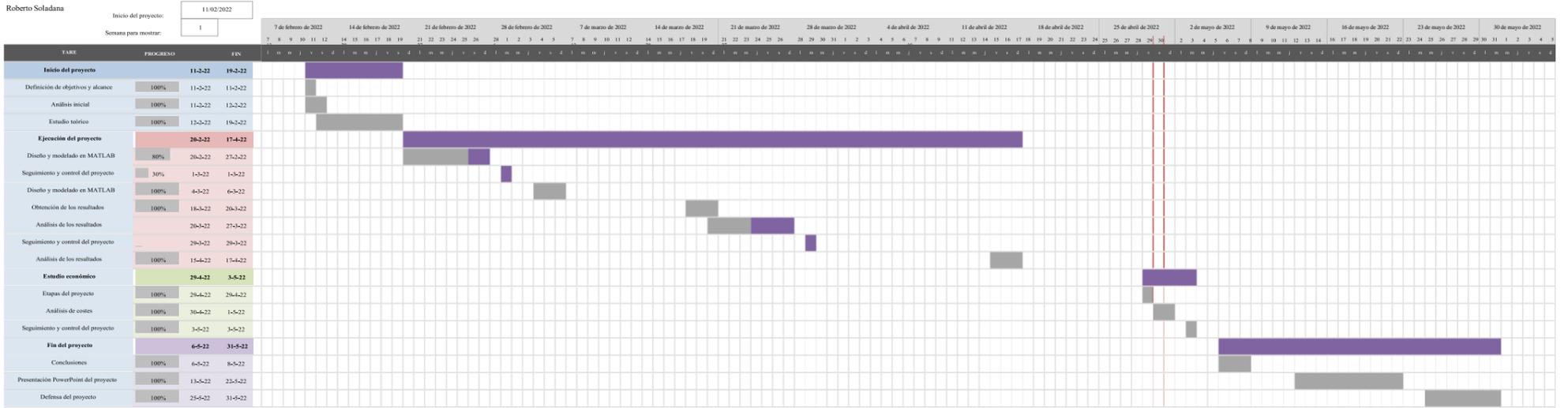


Figura 116. Diagrama Gantt del proyecto. Elaboración propia



## 7.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 7.1.- Conclusiones

En el primer apartado se marcaron unos objetivos a realizar en este Trabajo de Fin de Máster. Esos objetivos se han cumplido puesto que:

- Se ha explicado el funcionamiento básico de los convertidores de potencia y sus aplicaciones.
- Se ha explicado el comportamiento de los diodos y los tiristores, con sus modos de funcionamiento y curvas características.
- Se han explicado los principales bloques y librerías de Simulink necesarios para llevar a cabo las simulaciones.
- Se han descrito los tipos de rectificadores atendiendo a diferentes criterios, como el número de fases, la forma de control y su estructura.
- Se han definido los parámetros de entrada y salida característicos de los rectificadores y las fórmulas necesarias para obtenerlos.
- Se han analizado las distintas topologías de rectificadores para diferentes cargas y explicado por qué se obtendrían determinadas formas de onda de corrientes y tensiones.
- Se ha implementado en Simulink las topologías estudiadas y se ha podido comprobar las formas de onda descritas en el apartado de análisis, facilitando la visualización de las mismas ya que de forma analítica es complejo de determinar con exactitud.
- Se ha obtenido el rendimiento de cada topología para diferentes cargas gracias a la simulación y se han podido comparar diferentes montajes.
- Se ha realizado un estudio económico del presente proyecto para estimar los costes de llevar a cabo otros similares.

Las conclusiones obtenidas en base a los objetivos que se habían planteado son:

- Los rectificadores convierten una señal de corriente alterna en corriente continua, como se ha apreciado en las gráficas obtenidas por simulación.
- El tipo de carga que alimente el rectificador es importante, ya que proporciona salidas distintas según sus valores y las posibles combinaciones (R, RL, RE, RLE...), por lo que se tendrá que tener en cuenta a la hora de realizar el diseño.
- La topología del rectificador también es importante. Un rectificador simple o uno en puente proporciona salidas distintas, por lo que habrá que hacer un balance entre el coste de elegir una u otra y la salida que queramos obtener (tensión, factor de potencia...), según la aplicación.
- Los rectificadores controlados permiten modificar la salida variando el ángulo de disparo, obteniéndose distintas formas de onda, rendimientos, factores de potencia, etc. Para ello, es necesario un circuito de control externo que active los tiristores, por lo que es otra característica a tener en cuenta a la hora de elegir un rectificador u otro.



- Los filtros permiten obtener señales muy cercanas a la corriente continua pura, por lo que son importantes a tener en cuenta en el diseño, eligiendo un condensador con una determinada capacidad que no suponga un coste excesivo.
- Hemos visto como el software de MATLAB es capaz de realizar simulaciones y de proporcionar datos e información de forma rápida y sencilla, mientras que el cálculo de forma analítica sería muy costoso, por lo que es un software competente para este tipo de aplicaciones.
- Realizar un diagrama Gantt de cualquier proyecto ayuda a tener un objetivo claro y así definir los pasos a seguir hasta conseguirlo, con sus posibles desviaciones, tiempos estimados de determinadas tareas o fecha aproximada de finalización del mismo.
- El estudio económico es importante en cualquier proyecto para estimar los costes y así poder analizar la viabilidad del mismo, posibles ahorros, etc.

## 7.2.- Líneas futuras

A continuación, se mencionan algunas posibles ampliaciones de este proyecto:

- Diseño en MATLAB de rectificadores de alta potencia, trifásicos controlados y sin controlar y visualizando las formas de onda cuando se implementan tiristores, cómo obtener los diferentes ángulos de disparo, etc.
- Diseño de rectificadores en otros softwares de simulación, como PSCAD, ORCAD o LTspice.
- Diseño en MATLAB de otros convertidores de potencia, como inversores (monofásicos y trifásicos), convertidores CC/CC (Buck, Boost...) o convertidores CA/CA (reguladores de tensión monofásicos y trifásicos).



## 8.- BIBLIOGRAFÍA

- [1]: Apuntes de la asignatura Electrónica de Potencia para Aplicaciones en Sistemas Eléctricos del grado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid.
- [2]: *Universidad de Valencia*. Obtenido de <https://www.uv.es/marinjl/electro/diodo.html#1>
- [3]: Mohan, N., M. Undeland, T., & P. Robbins, W. (2009). *Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño*. McGraw Hill.
- [4]: Apuntes de la asignatura Fundamentos de electrónica del grado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Valladolid.
- [5]: H. Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- [6]: Bueno Montilla, A. (2016). *Electrónica de Potencia: Aspectos Generales y Convertidores Electrónicos*.
- [7]: Pérez, A. (2021). *OBS Business School*. Obtenido de <https://www.obsbusiness.school/blog/cuales-son-las-etapas-de-un-proyecto-te-lo-contamos-en-esta-infografia#:~:text=Las%20etapas%20de%20un%20proyecto%20son%20cinco.,%2C%20ejecuci%C3%B3n%2C%20seguimiento%20y%20cierre>
- [8]: W. Hart, D. (2001). *Electrónica de Potencia*. Pearson Educación.
- [9]: *MATLAB Support*. Obtenido de <https://es.mathworks.com/help/>



## ÍNDICE DE FIGURAS

*Figura 1. Concepto de Sistema Electrónico de Potencia. Elaboración propia..... 1*

*Figura 2. Diagrama general de un Sistema Electrónico de Potencia. Fuente: [1]..... 1*

*Figura 3. Procesador de potencia formado por tres convertidores. Elaboración propia 2*

*Figura 4. Ejemplo: Conversión CA/CA mediante una etapa intermedia de CC. Fuente: [1] ..... 2*

*Figura 5. Clasificación de los convertidores de potencia. Fuente: [1]..... 4*

*Figura 6. Simbología de un diodo. Fuente: [3] ..... 7*

*Figura 7. Característica I-V de un diodo. Fuente: [4] ..... 8*

*Figura 8. Modelos estáticos de un diodo. Fuente: [2]..... 9*

*Figura 9. Evolución de la corriente y tensión durante el paso de conducción a bloqueo. Fuente: [2] ..... 9*

*Figura 10. Simbología y estructura básica de un tiristor. Fuente: [1] ..... 11*

*Figura 11. Ángulo de disparo  $\alpha$  de un tiristor. Fuente: [1]..... 11*

*Figura 12. Curva característica de un tiristor. Fuente: [1] ..... 12*

*Figura 13. Modelo de un tiristor. Fuente: [1] ..... 13*

*Figura 14. Evolución de la corriente durante el paso de conducción a bloqueo en un tiristor. .... 13*

*Figura 15. Bloque fuente de tensión en Simulink. Elaboración propia..... 15*

*Figura 16. Bloque RLC en Simulink. Elaboración propia..... 15*

*Figura 17. Bloque fuente de tensión en continua. Elaboración propia..... 16*

*Figura 18. Bloque medición de corriente en Simulink. Elaboración propia..... 16*

*Figura 19. Bloque medición de tensión en Simulink. Elaboración propia ..... 16*

*Figura 20. Bloques medición de valor medio y RMS en Simulink. Elaboración propia 16*

*Figura 21. Bloque tiristor en Simulink. Elaboración propia ..... 17*

*Figura 22. Bloque diodo en Simulink. Elaboración propia ..... 17*

*Figura 23. Bloque Powergui en Simulink. Elaboración propia ..... 18*

*Figura 24. Bloque Pulse generator en Simulink. Elaboración propia ..... 18*

*Figura 25. Bloque Scope en Simulink. Elaboración propia ..... 18*

*Figura 26. Bloque Display en Simulink. Elaboración propia..... 18*

*Figura 27. Rectificador genérico con filtro C. Elaboración propia..... 19*

*Figura 28. Alternativas de estructura de los variadores de continua. Fuente: [1]..... 23*



*Figura 29. Rectificador no controlado de media onda, carga R. Fuente: [6].....24*

*Figura 30. Rectificador no controlado de media onda, carga RL. Fuente: [6] .....26*

*Figura 31. Rectificador no controlado de media onda, carga RL con diodo de libre circulación. Fuente: [6] .....27*

*Figura 32. Rectificador no controlado de media onda, carga R y filtro C. Fuente: [6] 27*

*Figura 33. Rectificador no controlado de media onda, carga RE. Fuente: [6] .....28*

*Figura 34. Rectificador no controlado de media onda, carga RLE. Fuente: [6] .....29*

*Figura 35. Rectificador no controlado de media onda, carga RLC. Fuente: [6].....29*

*Figura 36. Rectificador no controlado de onda completa, carga R. Fuente: [6].....30*

*Figura 37. Rectificador no controlado de onda completa, carga R con filtro C. Fuente: [6] .....31*

*Figura 38. Rectificador no controlado de onda completa, carga RL. Fuente: [6] .....32*

*Figura 39. Rectificador no controlado de onda completa, carga RLE. Fuente: [6] .....32*

*Figura 40. Rectificador controlado de media onda, carga R. Fuente: [6].....33*

*Figura 41. Rectificador controlado de onda completa, carga R. Fuente: [6].....35*

*Figura 42. Rectificador no controlado de media onda, carga R en Simulink. Elaboración propia .....37*

*Figura 43. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R. Elaboración propia .....37*

*Figura 44. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R. Elaboración propia .....38*

*Figura 45. Rectificador no controlado de media onda, carga RL en Simulink. Elaboración propia .....39*

*Figura 46. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RL. Elaboración propia .....39*

*Figura 47. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RL. Elaboración propia .....39*

*Figura 48. Rectificador no controlado de media onda, carga RL con diodo de libre circulación en Simulink. Elaboración propia .....40*

*Figura 49. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R con diodo de libre circulación. Elaboración propia .....40*

*Figura 50. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R con diodo de libre circulación. Elaboración propia .....41*

*Figura 51. Rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro en Simulink. Elaboración propia .....41*



*Figura 52. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C. Elaboración propia ..... 42*

*Figura 53. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C. Elaboración propia ..... 42*

*Figura 54. Corriente por la carga y por el filtro. Elaboración propia ..... 43*

*Figura 55. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C pequeño. Elaboración propia..... 44*

*Figura 56. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga R con filtro C pequeño. Elaboración propia..... 44*

*Figura 57. Rectificador no controlado de media onda, carga RE en Simulink. Elaboración propia ..... 45*

*Figura 58. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RE. Elaboración propia ..... 45*

*Figura 59. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RE. Elaboración propia ..... 46*

*Figura 60. Rectificador no controlado de media onda, carga RLE en Simulink. Elaboración propia ..... 47*

*Figura 61. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RLE. Elaboración propia ..... 47*

*Figura 62. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RLE. Elaboración propia ..... 48*

*Figura 63. Rectificador no controlado de media onda, carga RLC en Simulink. Elaboración propia ..... 48*

*Figura 64. Tensiones rectificador no controlado de media onda, carga RLC. Elaboración propia ..... 49*

*Figura 65. Corriente rectificador no controlado de media onda, carga RLC. Elaboración propia ..... 49*

*Figura 66. Rectificador controlado de media onda, carga R en Simulink. Elaboración propia ..... 50*

*Figura 67. Rectificador controlado de media onda,  $\alpha=30^\circ$ . Elaboración propia ..... 50*

*Figura 68. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 51*

*Figura 69. Corriente rectificador controlado de media onda,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 51*

*Figura 70. Tensiones rectificador controlado de media onda,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 52*



<i>Figura 71. Corriente rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=60^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 72. Rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=90^\circ</math>. Elaboración propia .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 73. Tensiones rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=90^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 74. Corriente rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=90^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 75. Rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=120^\circ</math>. Elaboración propia .....</i>	<i>54</i>
<i>Figura 76. Tensiones rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=120^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 77. Corriente rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=120^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 78. Tensiones rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=150^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 79. Corriente rectificador controlado de media onda, <math>\alpha=150^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 80. Rectificador controlado de media onda, carga RL en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 81. Tensiones rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=30^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 82. Corriente rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=30^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 83. Tensiones rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=60^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 84. Corriente rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=60^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 85. Tensiones rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=90^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 86. Corriente rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=90^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 87. Tensiones rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=120^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 88. Corriente rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=120^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 89. Tensiones rectificador controlado de media onda RL, <math>\alpha=150^\circ</math> en Simulink. Elaboración propia .....</i>	<i>62</i>



*Figura 90. Corriente rectificador controlado de media onda RL,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 62*

*Figura 91. Rectificador no controlado en puente, carga R en Simulink. Elaboración propia ..... 63*

*Figura 92. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga R. Elaboración propia ..... 64*

*Figura 93. Corriente rectificador no controlado en puente, carga R. Elaboración propia ..... 64*

*Figura 94. Rectificador no controlado en puente, carga R con filtro en Simulink. Elaboración propia ..... 65*

*Figura 95. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga R con filtro. Elaboración propia ..... 66*

*Figura 96. Corriente rectificador no controlado en puente, carga R con filtro. Elaboración propia ..... 66*

*Figura 97. Rectificador no controlado en puente, carga RL en Simulink. Elaboración propia ..... 67*

*Figura 98. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga RL. Elaboración propia ..... 67*

*Figura 99. Corriente rectificador no controlado en puente, carga RL. Elaboración propia ..... 68*

*Figura 100. Rectificador no controlado en puente, carga RLE en Simulink. Elaboración propia ..... 68*

*Figura 101. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción continua. Elaboración propia ..... 69*

*Figura 102. Corriente rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción continua. Elaboración propia ..... 69*

*Figura 103. Tensiones rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción discontinua. Elaboración propia..... 70*

*Figura 104. Corriente rectificador no controlado en puente, carga RLE conducción discontinua. Elaboración propia..... 70*

*Figura 105. Rectificador controlado en puente, carga R en Simulink. Elaboración propia ..... 71*

*Figura 106. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 72*

*Figura 107. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=30^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 72*



*Figura 108. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 73*

*Figura 109. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=60^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 73*

*Figura 110. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 74*

*Figura 111. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=90^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 75*

*Figura 112. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 75*

*Figura 113. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=120^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 76*

*Figura 114. Tensiones rectificador controlado en puente,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 76*

*Figura 115. Corriente rectificador controlado en puente,  $\alpha=150^\circ$  en Simulink. Elaboración propia ..... 77*

*Figura 116. Diagrama Gantt del proyecto. Elaboración propia ..... 82*

## ÍNDICE DE TABLAS

*Tabla 1. Horas de personal. Elaboración propia ..... 80*

*Tabla 2. Costes de personal. Elaboración propia ..... 80*

*Tabla 3. Coste de Hardware y Software. Elaboración propia ..... 81*

*Tabla 4. Presupuesto final. Elaboración propia ..... 81*