



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

Máster en Ingeniería Industrial

MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS Y DISEÑO EN MATLAB DE UN
RECTIFICADOR DE ALTA POTENCIA PARA
ELECTRÓLISIS**

Autor: Rodrigo Lorenzo López
Tutor: Juan Ignacio Lobo Salgado

Valladolid, Febrero, 2018

OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo del presente proyecto es diseñar un rectificador capaz de realizar la conversión de corriente de alterna a continua. Ésta conversión debe ser la necesaria para poder llevar a cabo el proceso de electrólisis.

Para conseguirlo, en primer lugar explicaremos cómo se efectúa el paso de corriente alterna a continua y el funcionamiento de los modelos de rectificadores más básicos.

Posteriormente, plantearemos el modelo de rectificador elegido y explicaremos su funcionamiento.

Por último realizaremos un estudio económico de todo el proceso desarrollado durante el proyecto.

PROJECT'S OBJECTIVE

The objective of this project is to design a rectifier to convert alternating current in direct current. This conversion is needed for the electrolysis process.

To get it, first of all we will explain how to go from alternating current to direct current and the operation of the most basic rectifier models.

Later, we will choose a rectifier model and we will explain how it works.

Finally, we will carry out an economic study of the entire process developed during the project.

AGRADECIMIENTOS

Realizar un proyecto conlleva una serie de obligaciones y colaboraciones necesarias gracias a las cuales es posible llevarlo a cabo. Todo debe funcionar como se espera con el objetivo de conseguir lo que se pretende.

Por ello, creo conveniente agradecer y acordarme de aquellas personas que han posibilitado la realización de este proyecto. Gracias a todas aquellas personas que siempre están dispuestas a ayudarte cuando lo necesitas, que hacen posible la consecución de los más difíciles propósitos.

Con estas líneas pretendo manifestar también un gran agradecimiento a mis seres queridos por estar ahí. Más allá de lo que puedan ayudarte para tratar de allanar el camino, simplemente con su apoyo y confianza es más que suficiente para llegar a la meta.

Me parece importante resaltar el gran sacrificio llevado a cabo por las personas cercanas a mí, culpables de hacerme ser lo que soy hoy.

Por último, resaltar el gran trabajo de mi tutor Juan Ignacio Lobo Salgado. Su labor ha sido fundamental en el desarrollo del proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 - PROCESO DE ELECTRÓLISIS.....	1
1.1. PROCEDIMIENTO.....	3
1.2. ELECTRÓLISIS DEL AGUA.....	4
CAPÍTULO 2 - CONVERSIÓN C.A. / C.C.	7
2.1.COMONENTES DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA.....	9
CAPÍTULO 3 - RECTIFICADORES NO CONTROLADOS.....	11
3.1.INTRODUCCIÓN.....	13
3.2.RECTIFICADORES NO CONTROLADOS.....	13
3.3.MONTAJES DE RECTIFICADORES NO CONTROLADOS.....	14
3.3.1. <i>Conexión en estrella.....</i>	<i>15</i>
3.3.2. <i>Conexión en polígono.....</i>	<i>15</i>
3.4.MONTAJES DE MEDIA ONDA NO CONTROLADOS.....	16
3.5.FILTROS PARA RECTIFICADORES NO CONTROLADOS.....	19
CAPÍTULO 4 - RECTIFICADORES CONTROLADOS CON TIRISTORES.....	21
4.1.INTRODUCCIÓN.....	23
4.2.MONTAJES DE RECTIFICADORES CONTROLADOS.....	23
4.3.MONTAJES DE MEDIA ONDA CONTROLADOS.....	24
4.3.1. <i>Tensiones en montajes de media onda controlados.....</i>	<i>25</i>
4.3.2. <i>Intensidades en montajes de media onda controlados.....</i>	<i>25</i>
4.3.3. <i>Caídas de tensión en montajes de media onda controlados.....</i>	<i>25</i>
4.4.MONTAJES DE ONDA COMPLETA CON SECUNDARIO EN ESTRELLA CONTROLADOS.....	26
4.4.1. <i>Montajes de onda completa en estrella totalmente controlados.....</i>	<i>26</i>
4.4.2. <i>Montajes de onda completa en estrella semicontrolados.....</i>	<i>26</i>
4.5.MONTAJES DE ONDA COMPLETA CON SECUNDARIO EN POLÍGONO CONTROLADOS.....	28
4.5.1. <i>Montajes de onda completa en polígono totalmente controlados.....</i>	<i>28</i>
4.5.2. <i>Montajes de onda completa en polígono semicontrolados.....</i>	<i>28</i>
4.6.FILTROS PARA RECTIFICADORES CONTROLADOS.....	29
CAPÍTULO 5 - TOPOLOGÍA DE RECTIFICADORES.....	31
5.1.RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO.....	33
5.2.RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA CONTROLADO.....	35
5.3.RECTIFICADOR BIFÁSICO DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO.....	36
5.4.RECTIFICADOR BIFÁSICO DE MEDIA ONDA CONTROLADO.....	39
5.5.RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO.....	41
5.6.RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CONTROLADO.....	43

CAPÍTULO 6 - MODELADO Y SIMULACIÓN DE RECTIFICADORES.....	45
6.1.RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA.....	47
6.1.1. <i>Rectificador monofásico de media onda no controlado.....</i>	<i>47</i>
6.1.2. <i>Rectificador monofásico de media onda controlado.....</i>	<i>49</i>
6.2.RECTIFICADOR BIFÁSICO DE MEDIA ONDA.....	51
6.2.1. <i>Rectificador bifásico de media onda no controlado.....</i>	<i>51</i>
6.2.2. <i>Rectificador bifásico de media onda controlado.....</i>	<i>53</i>
6.3.RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA.....	56
6.3.1. <i>Rectificador trifásico de media onda no controlado.....</i>	<i>56</i>
6.3.2. <i>Rectificador trifásico de media onda controlado.....</i>	<i>59</i>
CAPÍTULO 7 - MONJATE EN DOBLE ESTRELLA CON BOBINA DE ABSORCIÓN.....	63
CAPÍTULO 8 - REGULACIÓN DE CORRIENTE.....	71
8.1.INTRODUCCIÓN.....	73
8.2.SISTEMA DE CONTROL.....	73
8.2.1. <i>Sistema de control en lazo cerrado.....</i>	<i>74</i>
CAPÍTULO 9 - APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA DE CONTROL.....	75
9.1.SITUACIÓN DE PARTIDA.....	77
9.2.SISTEMA DE CONTROL.....	84
9.3.SITUACIÓN DE GANANCIA.....	85
9.4.SITUACIÓN DE PÉRDIDA.....	91
CAPÍTULO 10 - ESTUDIO ECONÓMICO.....	99
10.1. INTRODUCCIÓN.....	101
10.2. ETAPAS DEL PROYECTO.....	101
10.3. EQUIPO DE TRABAJO.....	102
10.4. RECURSOS EMPLEADOS.....	102
10.5. COSTES DEL PROYECTO.....	103
10.5.1. <i>Costes Directos.....</i>	<i>104</i>
10.5.2. <i>Costes Indirectos.....</i>	<i>110</i>
10.5.3. <i>Coste del proyecto.....</i>	<i>111</i>

Capítulo 1

Proceso de electrólisis

Capítulo 1

PROCESO DE ELECTRÓLISIS

La electrólisis o electrolisis es el proceso que separa los elementos de un compuesto por medio de la electricidad. Etimológicamente la palabra está formada por dos términos: *electro*, que significa electricidad, y *lisis*, que significa separación.

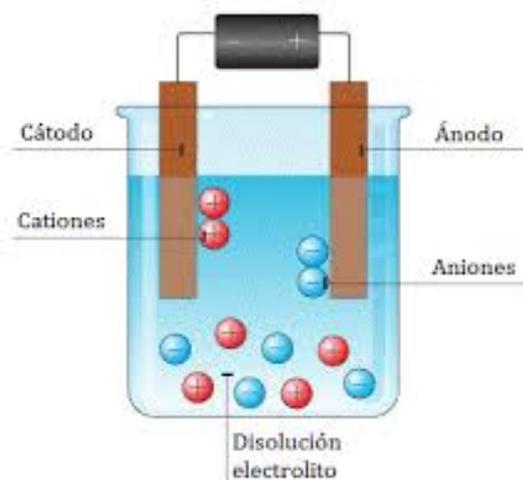
Se realiza aplicando una corriente eléctrica continua mediante un par de electrodos conectados a una fuente de alimentación eléctrica, y sumergidos en una disolución (llamada electrolito). Con esto conseguimos la disociación del electrolito en sus iones constituyentes (aniones y cationes) gracias a la administración de la corriente eléctrica.

El electrodo conectado al polo positivo se conoce como ánodo y el conectado al negativo como cátodo. Cada electrodo atrae a los iones de carga opuesta. De esta forma, los iones negativos (aniones) se desplazan hacia el ánodo ya que son atraídos por éste. Lo mismo ocurre en el cátodo, donde los iones positivos (cationes) son atraídos por él y se desplazan hacia el mismo.

Durante el transcurso de la reacción se transfieren electrones de una especie química a otra. En el ánodo se está produciendo una oxidación (liberación de electrones) y en el cátodo una reducción (captura de electrones). Así, el electrolito se disocia en sus iones constituyentes.

Ya que se trata de un proceso químico no espontáneo es necesario utilizar energía eléctrica para que la reacción en cuestión se lleve a cabo.

Existen, básicamente, dos tipos de electrolitos: los fuertes y los débiles. Los utilizados en la electrólisis son los llamados fuertes, haciendo éstos referencia a las sales, ácidos fuertes e hidróxidos fuertes.



1.1. PROCEDIMIENTO

En primer lugar, se disuelve una sustancia en un determinado disolvente con el fin de que los iones que constituyen dicha sustancia estén presentes en la disolución, llamada electrolito, y se dispone el electrolito en un recipiente, comúnmente denominado cuba electrolítica.

Se conectan los electrodos a la batería (formándose el ánodo y el cátodo antes mencionados) y se introducen en el recipiente. Los electrodos serán las superficies sobre las

que tienen lugar las semirreacciones redox. Generalmente son de carácter inerte con respecto a los reactivos que se encuentran en la cuba electrolítica (típicamente metálicos).

Al conjunto de todo esto se le conoce con el nombre de célula de electrólisis. Esta célula es un circuito eléctrico cerrado en el que, por una parte, se tienen los conductores metálicos y, por la otra, los conductores formados por las sales o disoluciones electrolíticas. De esta forma, la corriente consiste en el flujo de electrones en la parte metálica del circuito y el flujo de iones en la parte líquida.

Michael Faraday descubrió este proceso, estudiándolo y explicándolo. Además, enunció las dos leyes que se aplican en la electrólisis:

- La cantidad de sustancia depositada o liberada en un electrodo es directamente proporcional a la cantidad de electricidad (carga) que pasa por él.
- La cantidad de electricidad que se requiere para depositar o liberar un equivalente químico de un elemento es siempre la misma y se aproxima a la cantidad de 96.500 C (Culombios).

1.2. ELECTRÓLISIS DEL AGUA

La electrólisis del agua es la descomposición del agua (H_2O) en los gases oxígeno (O) e hidrógeno (H_2) por medio de una corriente eléctrica continua a través de la misma.

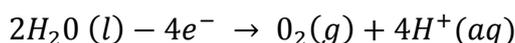
El procedimiento es el descrito anteriormente. Una fuente de energía eléctrica se conecta con los dos electrodos (típicamente hechos de algún metal inerte como el platino o el acero inoxidable), los cuales se introducen en la disolución. En la célula propiamente diseñada el hidrógeno se dirigirá hacia el cátodo dado que es el electrodo negativo mientras que el oxígeno aparecerá en el ánodo por ser el electrodo positivo.

La eficacia de la electrólisis aumenta con la adición de un electrolito como una sal, un ácido o una base y también con el uso de electrocatalizadores.

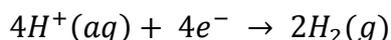
En el caso del agua pura, ésta no tiene la suficiente cantidad de iones libres como para que se pueda producir electricidad. Para lograr que se produzca la electrólisis en este caso se suele añadir una pequeña cantidad de ácido sulfúrico (0.1M).

En estas disoluciones acuosas se van a producir las siguientes reacciones:

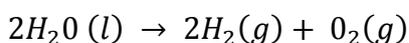
Oxidación en el ánodo:



Reducción en el cátodo:



Reacción global:



Como se observa en la reacción por cada dos moléculas de agua vamos a obtener dos moléculas de hidrógeno y una de oxígeno.

En el cátodo se obtiene el hidrógeno y en el ánodo el oxígeno. El volumen de hidrógeno que se obtiene es el doble que el de oxígeno. Ambas cantidades son proporcionales al total de carga eléctrica que presente.

Uno de los usos más importantes es la producción de hidrógeno con múltiples aplicaciones en la industria como el de obtención de combustible.

Capítulo 2

Conversión C.A. / C.C.

Capítulo 2

CONVERSIÓN C.A. / C.C.

Para llevar a cabo la conversión de corriente alterna a corriente continua se utilizan los rectificadores, los cuales son los elementos o circuitos que permiten realizar dicha conversión. Para llevar a cabo esta conversión se utilizan una serie de componentes.

2.1. COMPONENTES DE UN SISTEMA ELECTRÓNICO DE POTENCIA

Celda eléctrica 1 o acometida

1. Lo primero es un transformador de una potencia superior a la de la carga y una relación de transformación que viene determinada por la tensión de red en el primario y la tensión de la carga en el secundario. Además, obtenemos una serie de ventajas:
 - Obtenemos aislamiento galvánico.
 - Separa la red de alta tensión de la de baja tensión.
 - Obtenemos reactancia a cortocircuito.
2. Relé de sobretensión. Elemento electromecánico que, cuando la tensión supera cierta magnitud, salta. Es un elemento de protección. Lo que se tiene en cuenta es la tensión en el secundario.

Gracias a este elemento obtenemos la señal de sincronismo. Esta señal es una tensión proporcional a la red pero de menor valor que necesita el circuito de control para saber cuando la red pasa por 0.
3. Circuito RC (Resistencia – Condensador). Actúa como filtro de tensión. Elimina ruidos, pequeños picos que haya en la onda de tensión.

También actúa como filtro antiarmónicos, elimina alguna de las componentes armónicas que producimos.
4. Fusibles de corriente alterna. En caso de sobretensión protege el circuito.
5. Seccionador. Es un elemento mecánico que desconecta manualmente el equipo para hacer operaciones de mantenimiento.
6. Interruptor automático tripolar magnetotérmico.

Convertidor de Potencia

Es una topología de semiconductores. Una determinada conexión de tiristores (también pueden ser transistores – diodos).

Se suelen montar sobre radiadores o barras de aluminio para disipar el calor.

Celda eléctrica 2

También se conoce como el armario de baja tensión. Se compone de:

1. Contactor de maniobra. Sus funciones son bajar, conectar y desconectar. Está accionado por un pulsador.
2. Relé de continua magnetotérmico. Tiene una misión similar a la del interruptor.
3. Filtros de salida. Tienen por objetivo conseguir que la corriente obtenida sea más uniforme.
4. Elementos de medida. Se colocan en la celda o a lo largo de los cables. Realizan una función similar a los sensores.

Circuito de Control

Actualmente es electrónica digital.

1. Microprocesador. Es un microcontrolador que genera los impulsos de disparo. Se basa en un programa que implementa unas determinadas funciones. Consta de un contador de tiempo para obtener los impulsos en el momento preciso. Gracias a la señal de sincronismo, se controla el paso por 0.
2. Conversores analógico – digitales. Las señales que se reciben son analógicas.

Son instalaciones flexibles ya que configurando el programa puede tener varias utilidades.

Generador de impulsos

También son llamados transformadores de impulsos o “DRIVERS”.

Está basado en un amplificador de señales. Esto es necesario ya que las señales procedentes del microcontrolador son muy pequeñas. Además, requiere alimentación auxiliar.

Capítulo 3

Rectificadores no controlados

Capítulo 3

RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

Los rectificadores son circuitos realizados con diodos, capaces de cambiar la forma de onda de la señal que reciben en su entrada.

En el tema que nos ocupa, campo de la electrónica, un rectificador es un elemento o circuito que permite convertir la corriente alterna en corriente continua. Para ello, se utilizan diodos rectificadores.

Se utilizan sobre todo en las fuentes de alimentación de los equipos electrónicos. Debemos tener en cuenta que cualquier equipo electrónico funciona internamente con corriente continua.

Cuando conectamos un equipo electrónico a la red eléctrica (230 V de corriente alterna a 50 Hz), la fuente de alimentación se encarga de convertir dicha corriente alterna en corriente continua. El elemento fundamental de esa fuente de alimentación es el circuito rectificador.

Se puede hacer una distinción entre los circuitos rectificadores no controlados y los controlados.

3.2. RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

Los rectificadores no controlados son los convertidores que iniciaron la Electrónica de Potencia, construidos inicialmente con diodos de vacío. Los diodos de selenio, más tarde, generalizaron su empleo en pequeñas intensidades y tensiones en equipos fijos y móviles aportando mayor robustez al eliminar la ampolla de vidrio de los anteriores.

Posteriormente, han sido los diodos semiconductores, los de silicio concretamente, los componentes que han logrado llevar a estos circuitos a la puesta en marcha de una extensísima gama de intensidades y tensiones. Éstas abarcan desde el amperio y un bajo número de voltios (destinados a fuentes de alimentación de equipos e instrumentos electrónicos), pasando por miles de amperios y baja tensión para baños electrolíticos, hasta un elevado número de amperios y voltios en aplicaciones de alta potencia como la alimentación de catenarias de ferrocarril.

La baja caída de tensión en conducción de los diodos rectificadores de silicio en relación a la tensión que soportan en bloqueo, sobre todo en componentes de tensión elevada, hace que estos dispositivos sean casi ideales y llevan esta importante característica a los rectificadores.

Con tensiones y potencias elevadas, los rectificadores no controlados son equipos que se alejan de los circuitos ideales casi solamente en relación a las pérdidas e inductancias dispersas del transformador, siendo las pérdidas de los diodos mucho menores.

Además, el hecho de no emplear componentes activos nos lleva a carecer de circuito de control y del peligro relacionado con falsas maniobras causantes de averías. De esta forma, en el diseño deben cuidarse los riesgos derivados de las sobretensiones de entrada y de las sobrecargas.

El estudio de las configuraciones de rectificadores debe realizarse con las versiones no controladas por motivos de claridad conceptual. Sus diferencias, ventajas e inconvenientes se mantienen en lo fundamental en las versiones controladas.

3.3. MONTAJES DE RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

Los rectificadores no controlados están formados exclusivamente por diodos. La relación entre la tensión de corriente alterna y la de corriente continua es constante.

Ya que no hay semiconductores controlados, no se dispone de circuito de control. Por esto, estos equipos disponen de una alta simplicidad y fiabilidad.

En régimen estacionario, los diodos van entrando y saliendo de conducción de una forma natural obligados por las alternancias de la fuente de alimentación. Es por esta característica por la que no se tienen problemas de bloqueo.

Para rectificar un conjunto de q tensiones alternas e_1, e_2, \dots, e_q se utilizan un grupo de q diodos, que pueden estar conectados con los cátodos comunes o bien con los ánodos comunes.

En la configuración con los cátodos comunes la tensión de salida toma en cada instante el valor de la mayor tensión de entrada.

Con respecto a la configuración con los ánodos comunes la tensión de salida toma en cada instante el valor de la menor tensión de entrada.

La diferencia entre ambas configuraciones es que dan la tensión de salida con distinta polaridad.

En la práctica, el transformador de entrada es una pieza fundamental del rectificador. Como ya se ha comentado anteriormente, algunas de sus funciones más importantes son:

- Aislar galvánicamente la salida de corriente continua del generador de alterna.
- Acomodar el valor de la tensión de salida al valor exigido gracias a una adecuada relación de transformación.
- Contribuir a disminuir el rizado a la salida mediante una configuración conveniente.

En caso de ser polifásico, el secundario puede conectarse de dos formas: en estrella o en polígono. La conexión del primario es indiferente a efectos de contribuir con los montajes principales.

3.3.1. Conexión en estrella

Con respecto a la conexión en estrella existen dos clases de montaje: el de media onda y el de onda completa.

Montaje de media onda

El montaje de media onda se da con los cátodos comunes. Como hemos mencionado anteriormente, el valor de la tensión de salida es, en cada instante, igual al de la mayor de las tensiones de entrada.

El borne negativo está al mismo potencial que el neutro del secundario.

La intensidad en cada devanado secundario es unidireccional.

Montaje de onda completa

El montaje de onda completa necesita doble número de diodos que el anterior montaje. La mitad de éstos está con los cátodos comunes y la otra mitad con los ánodos comunes.

En cada instante, la tensión de salida es igual a la diferencia entre la tensión más positiva y la más negativa.

En esta configuración la intensidad en cada devanado secundario es bidireccional.

3.3.2. Conexión en polígono

Para la configuración en polígono solo puede existir el montaje de onda completa puesto que no hay neutro en el secundario. La suma de las tensiones del secundario ha de ser cero para no dar lugar a corrientes circulatorias.

La tensión de salida es igual en cada momento a la suma de las tensiones positivas del secundario o a la suma de las negativas con signo cambiado.

Como hemos visto, tenemos los siguientes montajes fundamentales:

- Montaje de media onda con secundario en estrella.
- Montaje de onda completa con secundario en estrella.
- Montaje de onda completa con secundario en polígono.

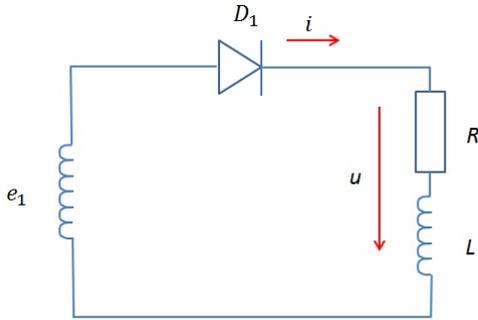
La importancia reside en las tensiones e intensidades de las distintas partes del circuito así como en las caídas de tensión teniendo en cuenta las no idealidades.

El funcionamiento de los rectificadores depende de la carga. Con objeto de alisar la intensidad, se suele montar en serie con la carga una bobina de filtrado.

El estudio de las tensiones es válido para cualquier carga (sin inductancia de alisamiento) siempre que la intensidad en la carga sea continua. En caso de que ésta sea discontinua (modelo capacitivo), el funcionamiento del circuito es distinto.

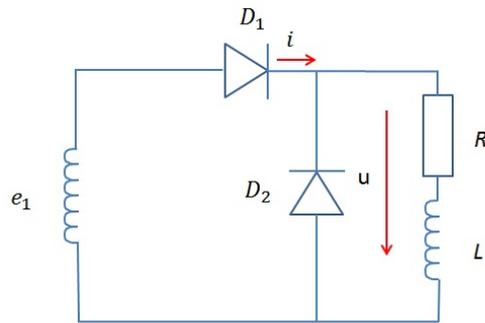
3.4. MONTAJES DE MEDIA ONDA NO CONTROLADOS

El montaje más simple es el de la figura que se muestra a continuación.



Este montaje no puede ser empleado con una inductancia de aislamiento de valor infinito ya que la intensidad fluiría constantemente hacia la carga y el diodo D_1 conduciría siempre. En ese caso $u = e_1$ y el valor medio de la tensión de salida sería cero. De este modo, la intensidad de salida sería nula.

Para evitar este funcionamiento, se conecta un segundo diodo de libre circulación D_2 (circuito reflejado en la imagen). Éste conduce la intensidad I cuando $e_1 < 0$. El diodo D_1 en este caso conduce la intensidad I durante $T/2$. La tensión de salida queda como sigue:



$$u = e_1 \quad \text{para} \quad 0 \leq t \leq T/2$$

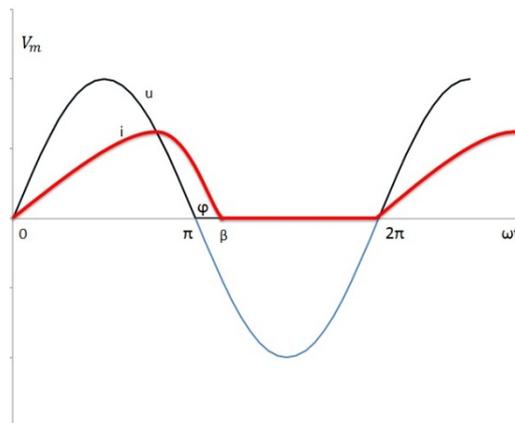
$$u = 0 \quad \text{para} \quad T/2 \leq t \leq T$$

Siendo:

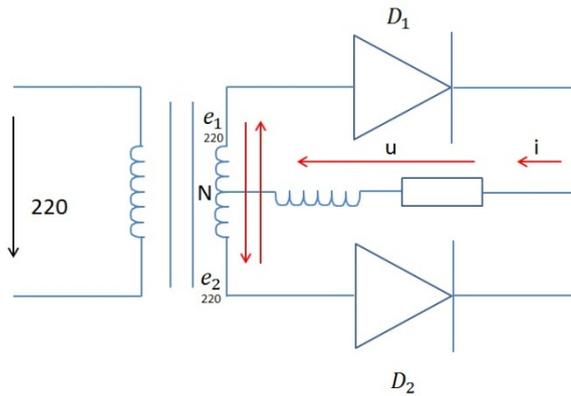
$$e_1 = E_p \text{sen } \omega t$$

La intensidad que pasa por el devanado secundario es i_{D1} . Ésta consta de una componente continua ($I/2$) y de una onda cuadrada alterna de amplitud $I/2$. La componente continua no induce tensión y no puede ser compensada por una corriente en el primario. Solo se compensa la componente alterna. La corriente del primario ha de ser alterna porque el transformador está conectado a un generador de corriente alterna.

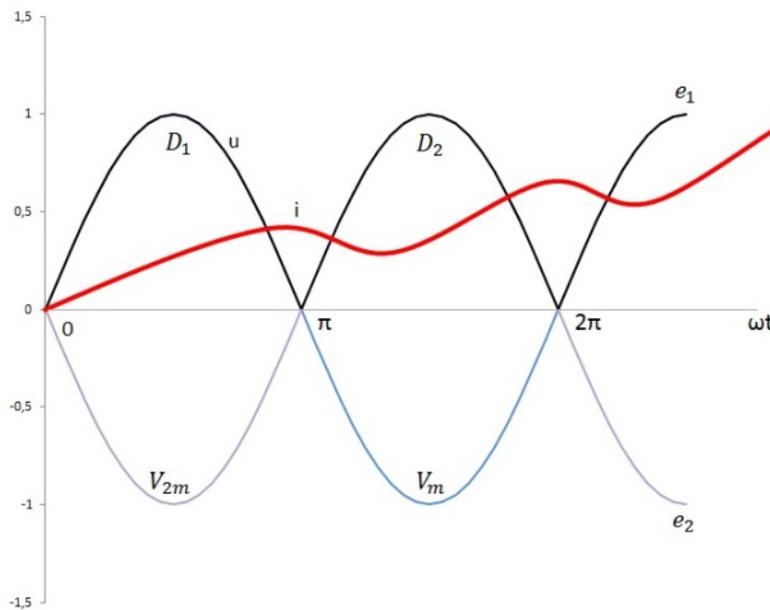
Esta configuración (con $q = 1$) es poco frecuente. Debido a su simplicidad, suele emplearse para muy bajas potencias.



Gracias al transformador puede usarse el montaje bifásico de la siguiente figura ($q = 2$).



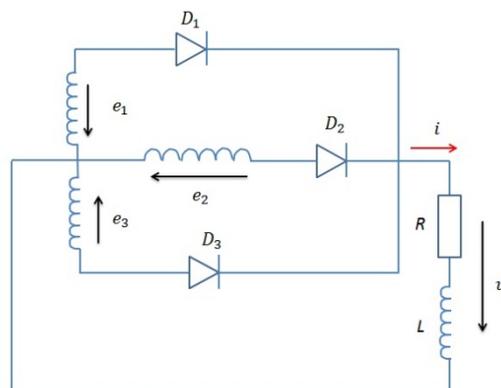
Las tensiones e_1 y e_2 están desfasadas un ángulo π .



Cada diodo conduce durante una semionda.

En el caso del generador de c.a. trifásico existen dos configuraciones: la trifásica y la hexafásica.

Configuración trifásica.



Las tensiones del caso trifásico son las que siguen:

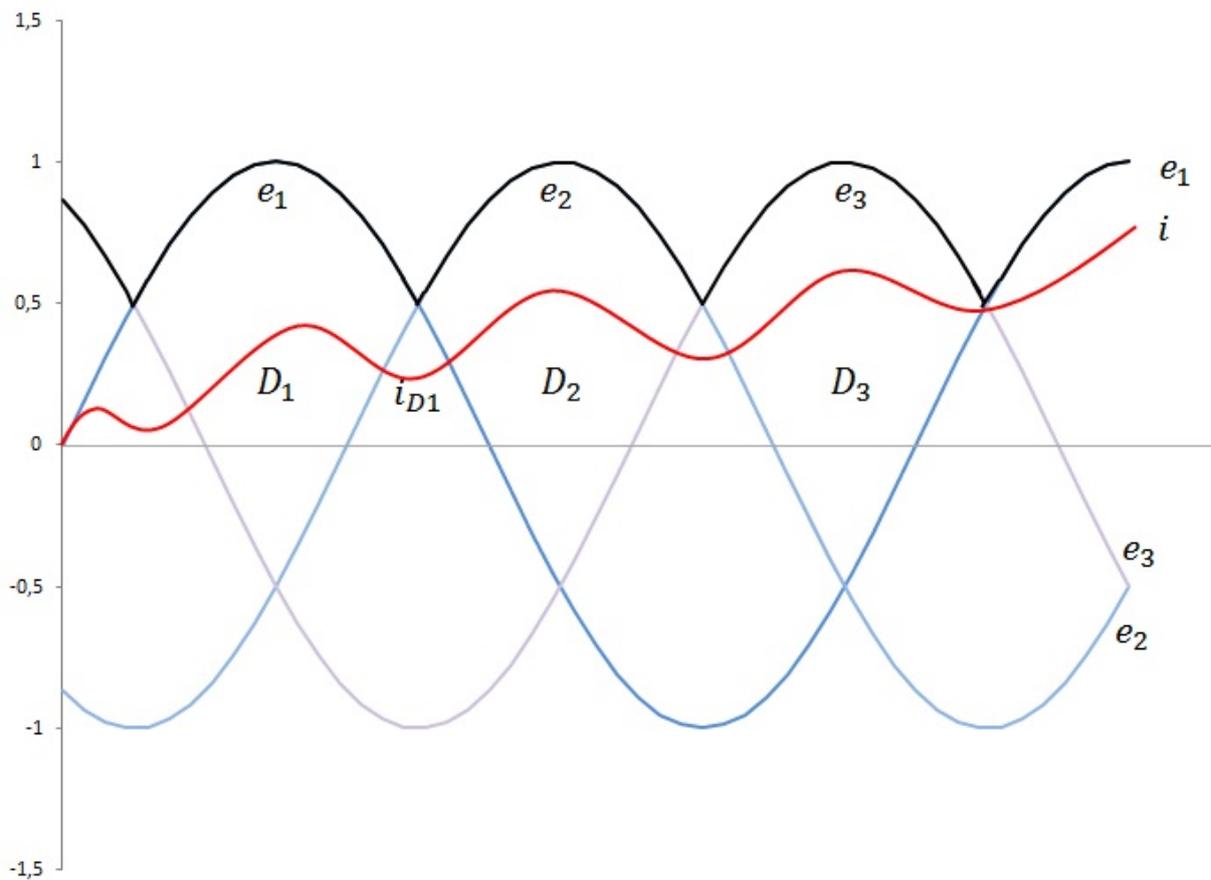
$$e_1 = E_p \operatorname{sen} \omega t$$

$$e_2 = E_p \operatorname{sen} \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$e_3 = E_p \operatorname{sen} \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Cada diodo conduce durante un tercio de periodo. De esta forma, D_1 conduce en el intervalo $T/12 < t < 5T/12$ en el que $u = e_1$. Sucesivamente, los diodos consecutivos conducirían:

- D_2 conduce en el intervalo $5T/12 < t < 9T/12$ en el que $u = e_2$.
- D_3 conduce en el intervalo $9T/12 < t < 13T/12$ en el que $u = e_3$.



Con respecto a la configuración hexafásica se dispone un transformador que tiene en cada rama magnética un primario y dos secundarios. La tensión de salida es menos ondulada. Cada diodo conduce durante un sexto de periodo.

3.5. FILTROS PARA RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

En el campo de los rectificadores no controlados hemos supuesto en serie con la carga una inductancia de valor infinito. De este modo, tanto la intensidad como la tensión de salida son uniformes.

Las tensiones obtenidas serían las mismas si no estuviera la inductancia, pero estableciendo la condición de que no haya intervalos en los que la intensidad de salida sea nula.

Las intensidades obtenidas se modifican al eliminar la mencionada inductancia. Ésta actuaba como filtro atenuando los armónicos de la onda de salida, la cual se ha visto que está formada por una sucesión de picos de senoide.

En numerosas aplicaciones se requiere un factor de rizado inferior a un valor predeterminado y se necesita la inclusión de un filtro, el cual debe ser tanto mayor cuanto menor sea el q del rectificador y menor sea el rizado exigido.

Tipos de filtros:

- Filtro L. Consta de una inductancia en serie con la carga.
- Filtro C. Formado por un condensador en paralelo con la carga.
- Filtro LC. Es un filtro C conectado en cascada a continuación de un filtro L.
- Filtro en π . Consta de un filtro LC conectado en cascada detrás de un filtro C.
- Filtro LC doble. Consta de dos filtros LC conectados en cascada.

Capítulo 4

Rectificadores controlados con tiristores

Capítulo 4

RECTIFICADORES CONTROLADOS CON TIRISTORES

4.1. INTRODUCCIÓN

La aparición de componentes rectificadores con iniciación de la conducción controlada, primero los tiratrones e ignitrones y más tarde los rectificadores de silicio controlado, ha permitido transformar los rectificadores en convertidores de corriente alterna a corriente continua de salida regulada extendiendo el número de sus aplicaciones y mejorando muchas de las heredadas de los rectificadores no controlados.

Al igual que los no controlados, los equipos controlados son equipos robustos si se toman unas precauciones mínimas de protección de sus semiconductores, lo cual es debido en gran medida a que el disparo de cualquiera de sus componentes activos revierte normalmente en una perturbación transitoria de la tensión de salida pero raramente en un cortocircuito interno.

Como hemos mencionado anteriormente, las propiedades principales de los rectificadores controlados son las de los no controlados con la misma configuración, a las que se añaden las derivadas del retardo en la entrada en conducción de sus componentes activos.

Entre estas propiedades está la conveniente reducción de la tensión de salida desde la obtenida sin retardo (funcionando como si se tratara de un rectificador con diodos), la habilidad de funcionar reversiblemente si la tensión alterna es independiente, y el inconveniente aumento del rizado de la tensión e intensidad de continua y de los armónicos de las intensidades de alterna.

La sustitución parcial o total de los diodos por tiristores en los rectificadores controlados no anula la característica de convertidores casi ideales descrita anteriormente para el caso de los no controlados en cuanto a pérdidas se refiere, sobretodo en equipos con tensión de salida por encima de los 100V, ya que la caída de tensión de un tiristor en conducción (1.8V) no es mucho mayor que la de un diodo de silicio (1V).

4.2. MONTAJES DE RECTIFICADORES CONTROLADOS

Los rectificadores controlados permiten obtener una tensión continua variable. Además, pueden actuar de forma reversible, es decir, tomando potencia de la salida y proporcionándola a la entrada de corriente alterna. En este caso se dice que funcionan como inversores no autónomos.

Su elemento base es el tiristor. El control se efectúa retardando su disparo un tiempo α/ω a partir del instante en que su tensión ánodo – cátodo se hace positiva. El ángulo α se denomina ángulo de control o ángulo de retardo del disparo.

El bloqueo de los tiristores se efectúa de forma natural.

Los montajes son los mismos que los vistos para los rectificadores no controlados. En este caso, hay que distinguir dos tipos en cuanto a la extensión del control:

- Rectificadores semicontrolados. Están formados por diodos y tiristores.
- Rectificadores totalmente controlados. Formados exclusivamente por tiristores.

Para su estudio, se supone que en serie con la carga hay una inductancia de valor infinito.

4.3. MONTAJES DE MEDIA ONDA CONTROLADOS

Los montajes en media onda son totalmente controlados debido a que, como en cada fase hay un solo semiconductor, éste ha de ser necesariamente un tiristor.

La conducción de cada tiristor es de T/q segundos, pero el ángulo de retardo hace que la porción de la tensión de cada fase que está presente en la salida se desplace hacia la derecha, es decir, hacia tiempos crecientes.

La tensión de salida dependerá del ángulo de retardo del disparo. Así:

- $\alpha \leq \pi/2$

El valor medio de la tensión de salida es positivo, aunque pueda haber intervalos en los que $u < 0$.

Por ejemplo, para $q = 3$ y $\alpha > 30^\circ$ hay intervalos en los que la tensión de salida es negativa, es decir, $u < 0$.

Si particularizamos, para $\alpha = 90^\circ$ los intervalos en los que la tensión de salida es negativa son iguales a aquellos en los que es positiva por lo que el valor medio es nulo.

- $\alpha > \pi/2$

En este caso, los intervalos en los que la tensión de salida es negativa son mayores que los intervalos en los que es positiva. Por tanto, el valor medio será negativo. Debido a esto, se dice que este montaje funciona como un inversor no autónomo.

Por ejemplo, para $q = 3$ y $\alpha > 150^\circ$, siempre tenemos que $u < 0$.

En caso de que a la salida del rectificador haya un generador de continua, éste va a suministrar potencia activa a la red de corriente alterna.

En el funcionamiento como inversor la intensidad de continua sigue fluyendo en el mismo sentido (su sentido no puede invertirse ya que los tiristores lo impedirían) y lo que se varía es el sentido de la tensión continua.

El bloqueo de los tiristores se efectúa de forma natural. Con el disparo de cada tiristor se aplica tensión negativa al que lo precede, que se bloquea. El tiempo de bloqueo, t_b , es el tiempo en que un tiristor tiene aplicada tensión inversa tras anularse su intensidad. Este tiempo disminuye a medida que aumenta el ángulo de control.

4.3.1. Tensiones en montajes de media onda controlados

El valor medio de la tensión de salida se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$U_m = \frac{q}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}-\frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{2}+\frac{\pi}{q}} V_m \text{sen}(\omega t) d(\omega t)$$

$$U_m = \frac{qV_m}{2\pi} \left[\cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q}\right) \right]$$

$$U_m = \frac{q}{\pi} V_m \text{sen} \frac{\pi}{q} \quad \text{donde} \quad q = 2, 3, \dots 6, \dots$$

Para el caso trifásico:

$$U_m = \frac{3}{\pi} V_m \frac{\sqrt{3}}{2}$$

4.3.2. Intensidades en montajes de media onda controlados

Cada tiristor conduce la intensidad durante un tiempo T/q . Sus valores característicos son:

- Valor medio $I = I/q$
- Valor eficaz I/\sqrt{q}

Tanto el factor de potencia del secundario como el del primario se obtienen multiplicando los correspondientes del montaje no controlado por $|\cos\alpha|$, ya que la potencia activa entregada está multiplicada por $\cos\alpha$.

4.3.3. Caídas de tensión en montajes de media onda controlados

Las caídas en los tiristores y en las resistencias de los devanados del transformador son independientes del ángulo de control.

4.4. MONTAJES DE ONDA COMPLETA CON SECUNDARIO EN ESTRELLA CONTROLADOS

Hay dos tipos:

- Totalmente controlados: los $2q$ semiconductores son tiristores.
- Semicontrolados: hay q tiristores y q diodos.

4.4.1. Montajes de onda completa en estrella totalmente controlados

Están basados en dos de media onda. Si suponemos como ejemplo el montaje típico de $q = 3$:

$$U = U_{AB} = U_{AN} - U_{BN}$$

- U_{AN} es la tensión instantánea entregada por el montaje de media onda formado por el transformador y T1, T2 y T3.
- U_{BN} es la tensión instantánea entregada por el montaje de media onda formado por el transformador y T'1, T'2 y T'3.

La tensión media es la obtenida en apartados anteriores, particularizando tenemos:

$$U_{AN-M} = \frac{q}{\pi} E_p \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \operatorname{cos} \alpha$$

$$U_{BN-M} = -\frac{q}{\pi} E_p \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \operatorname{cos} \alpha$$

Por tanto:

$$U = 2 \frac{q}{\pi} E_p \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \operatorname{cos} \alpha$$

Como hemos visto anteriormente, para $\alpha > \pi/2$ el montaje funciona como inversor no autónomo.

Las formas de onda de las tensiones en los tiristores y sus valores de pico son las mismas que para el montaje de media onda.

Los valores característicos de las intensidades en los tiristores y en los devanados del transformador son idénticos a los del montaje no controlado. Los factores de potencia de éste quedan multiplicados por $\operatorname{cos} \alpha$.

Las caídas de tensión también son las mismas que para los montajes de onda completa con secundario en estrella no controlados.

4.4.2. Montajes de onda completa en estrella semicontrolados

Se dispone de q diodos y q tiristores. Generalmente los tiristores se conectan con los cátodos comunes para simplificar el circuito de disparo y los diodos con los ánodos comunes.

El montaje está compuesto por uno de media onda controlado y por otro de media onda no controlado.

Por ejemplo, para el caso de $q = 3$ tenemos:

$$U_{AN-M} = \frac{q}{\pi} E_p \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \cos \alpha$$

$$U_{BN-M} = -\frac{q}{\pi} E_p \operatorname{sen} \frac{\pi}{q}$$

$$U_M = U_{AN-M} - U_{BN-M} = U_{M \text{ MAX}} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

$$U_{M \text{ MAX}} = 2 \frac{q}{\pi} E_p \operatorname{sen} \frac{\pi}{q}$$

Variando α de cero a π la tensión de salida varía de $U_{M \text{ MAX}}$ a cero. El montaje no es reversible, no puede funcionar como inversor no autónomo.

Para $\alpha < \pi - 2\pi/q$ es $u > 0$, y para $\alpha > \pi - 2\pi/q$ hay intervalos en que $u = 0$, durante los cuales conducen el tiristor y el diodo de una misma fase. La carga está cortocircuitada a través de ambos y su intensidad sigue circulando forzada por la inductancia.

Las tensiones de pico en los tiristores y los diodos tienen el mismo valor que para los montajes de onda completa con secundario en estrella no controlados.

Como cada semiconductor conduce la intensidad durante un tiempo T/q , los valores característicos de su intensidad son idénticos a los del montaje no controlado.

Para $\alpha < \pi - 2\pi/q$ por cada devanado secundario circula la corriente I cuando conduce el tiristor y la corriente $-I$ cuando conduce el diodo. Su valor eficaz es:

$$I_{sec} = I \sqrt{\frac{2}{q}}$$

Y el factor de potencia disminuye en la misma proporción que la tensión de salida.

$$f_{sec} = \frac{2}{\pi} \sqrt{q} \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

Para $\alpha > \pi - 2\pi/q$ cada secundario no conduce cuando lo hacen a la vez su tiristor y su diodo correspondiente. Por el secundario circula la corriente I durante un tiempo $(\pi - \alpha)/\omega$, y la corriente $-I$ durante otro tiempo igual. El valor eficaz es

$$I_{sec} = \sqrt{\frac{1}{T} I^2 \frac{2(\pi - \alpha)}{\omega}} = I \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$$

Y el factor de potencia del caso anterior debe ser multiplicado por

$$\frac{I \sqrt{\frac{2}{q}}}{I \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{q}} \sqrt{\frac{\pi}{\pi - \alpha}}$$

El factor de potencia es ahora

$$f_{sec} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{\frac{\pi}{\pi - \alpha}} \operatorname{sen} \frac{\pi}{q} (1 + \cos \alpha)$$

Como vemos, el f_{sec} es mayor en los montajes semicontrolados que en los totalmente controlados, lo que constituye sin duda una ventaja de aquellos sobre estos.

Además, como la intensidad en el secundario del transformador disminuye, también disminuyen las intensidades primarias y, como consecuencia, las pérdidas en el cobre. Debido a esto, el rendimiento aumenta.

La conclusión a la que podemos llegar es que los montajes semicontrolados se emplean más que los totalmente controlados, cuando no es necesario el funcionamiento como inversor.

Sin embargo, el sustituir q tiristores por q diodos simplifica el mando y hace al conjunto más fiable y económico.

4.5. MONTAJES DE ONDA COMPLETA CON SECUNDARIO EN POLÍGONO CONTROLADOS

Pueden ser totalmente controlados o semicontrolados.

4.5.1. Montajes de onda completa en polígono totalmente controlados

El periodo de la tensión de salida es T/q si q es par y $T/2q$ en caso de que q sea impar.

Al igual que para el montaje totalmente controlado con secundario en estrella se verifica que:

$$U_M = U_{M \text{ MÁX}} \cos \alpha$$

Donde $U_{M \text{ MÁX}} = q(E_p/\pi)$.

Para $\alpha > \pi/2$ el montaje se comporta como un inversor no autónomo.

Las corrientes en los tiristores y en el transformador son independientes de α . Por eso los factores de potencia del correspondiente montaje no controlado deben ser multiplicados por $|\cos \alpha|$.

4.5.2. Montajes de onda completa en polígono semicontrolados

Generalmente se disponen los q tiristores con los cátodos comunes y los q diodos con los ánodos comunes. El periodo de la tensión de salida es T/q independientemente de que q sea par o impar y su valor medio es:

$$U_M = U_{M \text{ MÁX}} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

Donde $U_{M \text{ MÁX}} = q \frac{E_p}{\pi}$.

El montaje no puede funcionar como inversor no autónomo.

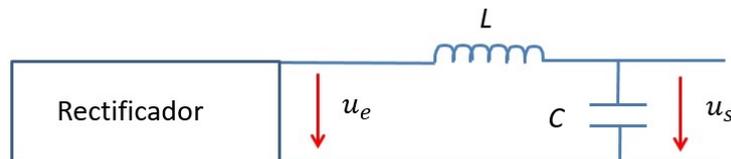
Las diferencias entre el montaje semicontrolado y el totalmente controlado son las mismas vistas para el caso del secundario en estrella.

Los valores característicos de la intensidad en los semiconductores son los mismos ya que cada uno conduce la intensidad I durante un tiempo T/q .

Las intensidades en los devanados disminuyen cuando α aumenta y, por tanto, los factores de potencia también aumentan.

4.6. FILTROS PARA RECTIFICADORES CONTROLADOS

El rizado producido por los rectificadores controlados es mayor que el de los no controlados y se necesitan filtros mayores. Generalmente interesa regular el valor medio de la tensión de salida y por ello el filtro más empleado es el LC, cuyo esquema se representa en la siguiente figura.



Suponiendo que la intensidad que circula por L no es nula en ningún intervalo de tiempo, es decir, que siempre está fluyendo, puede aplicarse el principio de superposición y ver el efecto del filtro sobre cada armónico de la tensión proporcionada por el rectificador.

El mayor rizado se da con la salida en vacío, puesto que la carga supone un paso más para los armónicos. De esta forma, en vacío la atenuación producida por el filtro para el armónico de pulsación ω_n está dada por:

$$\frac{U_s(n)}{U_e(n)} = \frac{1/\omega_n C}{\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C}} = \frac{1}{\omega_n^2 LC - 1}$$

$U_e(n)$ es el valor eficaz de la tensión del armónico n a la entrada del filtro y $U_s(n)$ es el de la salida. El valor máximo de U_s se corresponde con el máximo de $U_e(n)$.

Esta relación muestra que el filtrado es tanto mejor cuanto mayor sea ω_n y cuanto mayor sea el producto LC . Cada armónico es reducido en un factor proporcional al cuadrado de su frecuencia. Por ello los armónicos de mayor orden son los más atenuados y en la mayoría de los casos es suficiente diseñar el filtro para que atenúe el armónico de orden más bajo sin tener en cuenta los demás.

En el cálculo de las pérdidas del núcleo de la bobina, también suele ser suficiente tener en cuenta solamente la influencia de la tensión en ella del armónico de orden más bajo.

Para conseguir un rizado de salida determinado el producto LC ha de tener un determinado valor. L y C se eligen con algún criterio adicional. Así:

- Un bajo valor de L hace que sus pérdidas y, por tanto, las del filtro, sean bajas.
- Un bajo valor de L mejora la estabilidad dinámica.
- Un bajo valor de L hace que la intensidad crítica sea menor.

En el caso de que el rizado de salida tenga que ser muy pequeño es preferible usar el filtro LC doble.

Capítulo 5

Topología de rectificadores

Capítulo 5

TOPOLOGÍA DE RECTIFICADORES

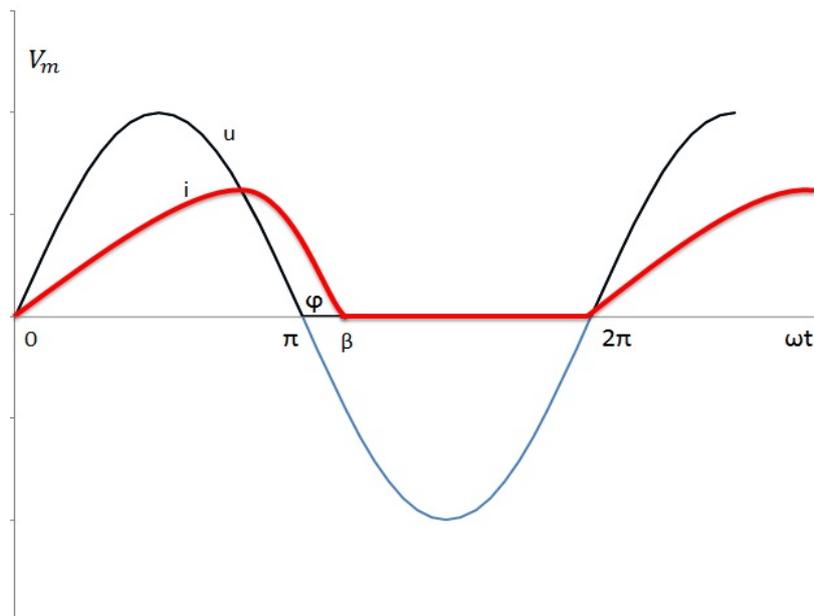
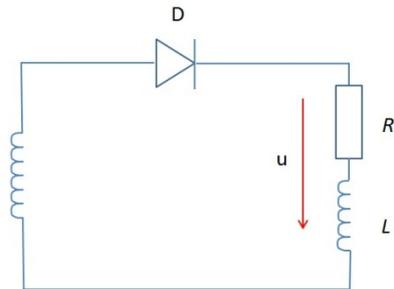
Se puede establecer una clasificación de los rectificadores en función del número de diodos que utilizan:

- *Rectificador de media onda*, formado por un único diodo
- *Rectificador de onda completa*. Se pueden distinguir varios tipos:
 - *Rectificador con transformador de toma intermedia*, formado por dos diodos.
 - *Rectificador con puente*, formado por cuatro diodos.

5.1. RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO

El rectificador de media onda es un circuito que elimina la mitad de la señal que recibe en la entrada en función de cómo esté polarizado el diodo.

- Si la polarización es directa, se elimina la parte negativa de la señal.
- Si la polarización es inversa, se elimina la parte positiva de la señal.



El rectificador no modifica la amplitud de la señal que recibe a su entrada, solamente elimina los ciclos negativos. Esto se cumple para todas las señales que pongamos a su entrada, independientemente de la frecuencia que tengan. La limitación existente vendrá dada por el funcionamiento del diodo, el cual será el adecuado dependiendo del circuito en cuestión en el que estemos trabajando.

El rectificador monofásico de media onda no controlado tiene una serie de parámetros característicos:

Valor de cresta

$$V_m = \sqrt{2}E_f$$

Impedancia

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}; \quad R = Z \cos \varphi; \quad \omega L = Z \sin \varphi$$

Desfase que introduce la impedancia

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}; \quad \beta \cong \pi + \varphi$$

- Entre 0 y π la tensión es positiva. El diodo está polarizado en directa y conduce.
- Entre π y 2π la tensión es negativa. El diodo está polarizado en inversa y deja de conducir.

A partir de π la corriente se extinguirá, es decir, existe un desfase. β es el ángulo de extinción.

Constante de tiempo

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Tensión de salida (valor medio)

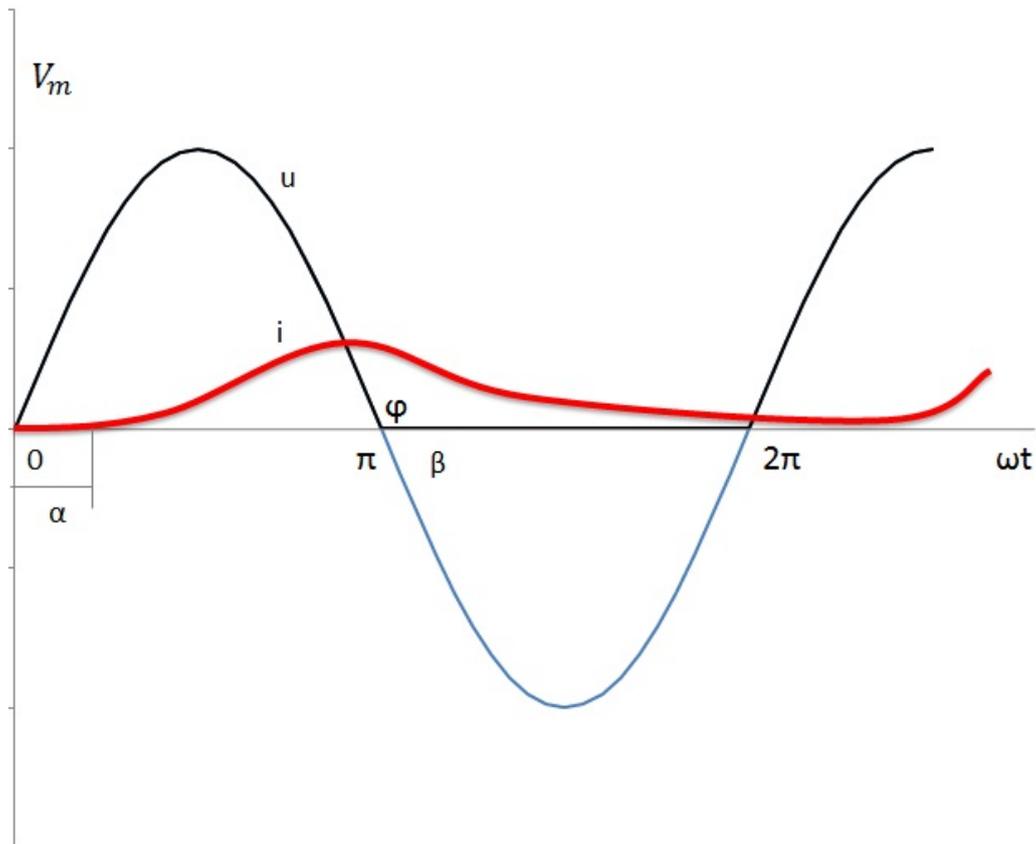
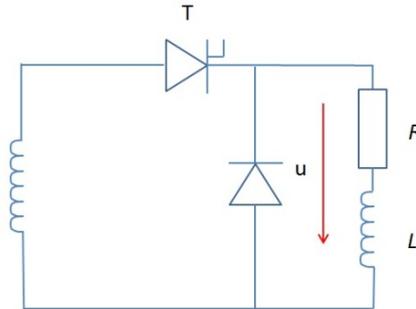
$$U_m = \frac{V_m}{2\pi} (1 + \cos \varphi)$$

La onda de corriente alterna tiene un valor medio nulo y la onda de corriente continua va a tener un cierto valor medio.

Con el objetivo de mejorar este sistema, se introduce un diodo de libre circulación.

5.2. RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA CONTROLADO

Se añade un tiristor. El tiristor se dispara con un impulso en un determinado ángulo α . Hasta ese momento no hay tensión.



$(0, \pi)$; La tensión es positiva. Dirige el diodo principal.

(α, π) ; La tensión es positiva. Dirige el diodo principal. El microcontrolador da el impulso.

A partir de π : La tensión se hace negativa y el diodo libre entra en funcionamiento (puede existir cierto retraso).

Si tenemos un ángulo de disparo demasiado grande, la carga es muy poco inductiva o hay caída en el diodo, la corriente puede extinguirse.

Los parámetros más importantes que debemos tener en cuenta en los rectificadores de media onda son los siguientes:

Valor medio de la tensión

Es la media aritmética de todos los valores instantáneos de la señal comprendidos en un intervalo (en este caso la mitad del periodo).

$$U_m = \frac{V_{max}}{2\pi} (1 + \cos\alpha) \quad \text{Donde } \alpha \text{ es el ángulo de disparo.}$$

Para $\alpha = 0$, se recupera el estado anterior, $U_m = \frac{V_{max}}{\pi}$.

Valor eficaz de la tensión

Este valor de tensión lo podemos comprobar con un polímetro.

$$V_{ef} = \frac{V_{max}}{2}$$

Valor medio de la intensidad

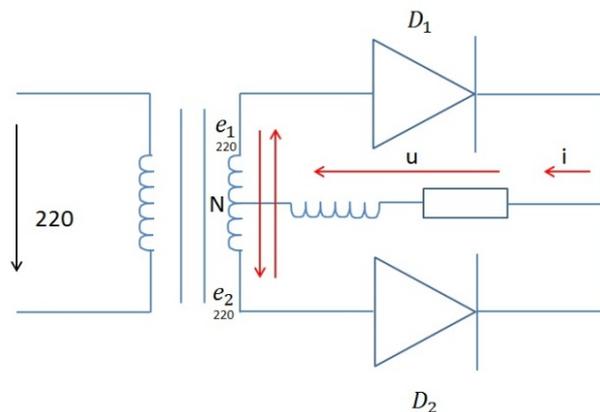
Se obtiene mediante la ley de Ohm aplicada a los valores de tensión. Depende de la resistencia de carga del rectificador.

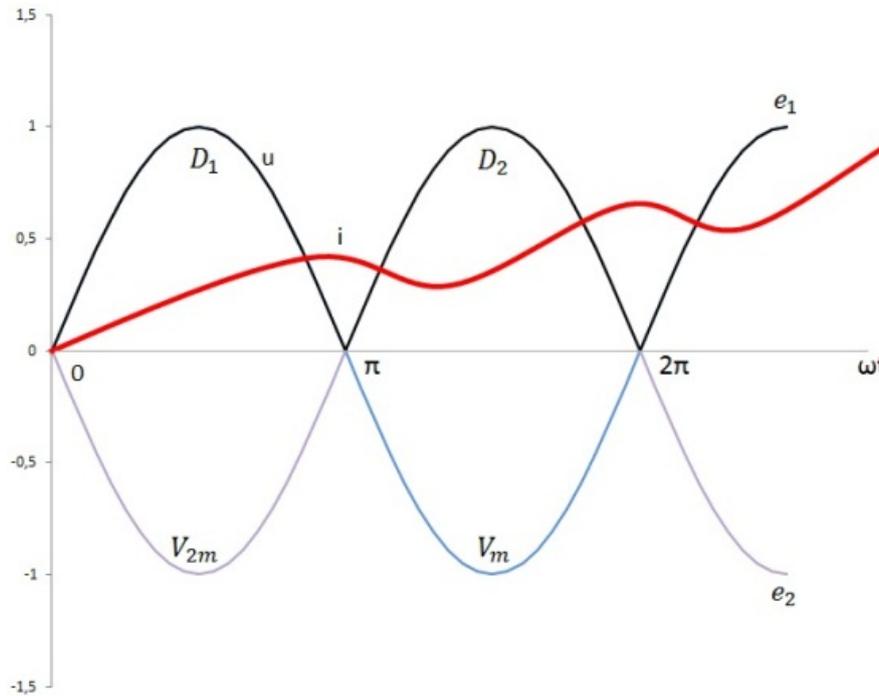
$$I_m = \frac{U_m}{R} \quad \text{Donde } R \text{ es el valor medio de la impedancia.}$$

Valor máximo de la intensidad

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{V_m}{Z}$$

5.3. RECTIFICADOR BIFÁSICO DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO





Es un rectificador de media onda con toma de neutro. Tenemos dos fases: e_1 y e_2 .

$$e_1 = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \text{sen}(\omega t)$$

$$e_2 = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \text{sen}(\omega t + \pi)$$

$(0, \pi)$; e_1 es positivo y e_2 es negativo. Por tanto, conduce e_1 . Así, $u = e_1$. e_2 está en cortocircuito.

$(\pi, 2\pi)$; e_1 es negativo y e_2 es positivo. Por tanto, conduce e_2 . Así, $u = e_2$. e_1 está en cortocircuito.

La intensidad iría aumentando hasta que llega al estado estacionario. En este caso siempre hay corriente (ya no se anula). Si fuera resistivo puro la intensidad sería igual a la tensión.

Valor medio de la tensión

$$U_m = \frac{2V_m}{\pi}$$

Lógicamente, obtenemos el doble que en el caso anterior, rectificador monofásico de media onda.

Valor medio de la intensidad

$$I_{DC} = \frac{U_m}{R}$$

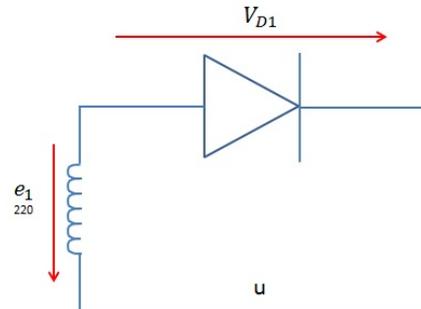
Se da cuando alcanza el máximo.

Tensión de los diodos

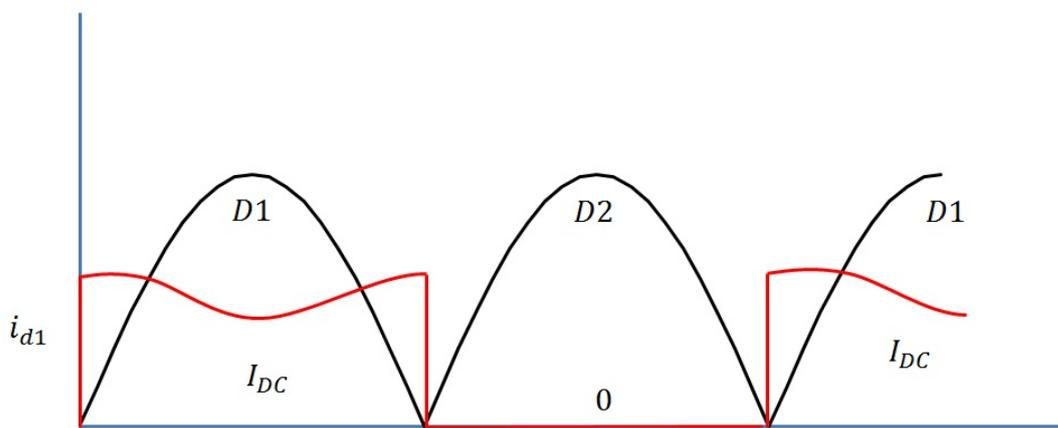
También es válido para tiristores si tenemos en cuenta que un tiristor con un ángulo de disparo igual a 0 es un diodo.

$$V_{D1} = e_1 - u$$

- Si conduce D1
 $V_{D1} = 0$. Ya que $u = e_1$.
- Si conduce D2
 $V_{D1} = e_1 - e_2$. Ya que $u = e_2$.
- Desfase: $V_m[\text{sen}(\omega t) - \text{sen}(\omega t + \pi)]$



Corriente en los diodos



i_{d1} es la corriente del diodo 1.

Los valores característicos son los siguientes:

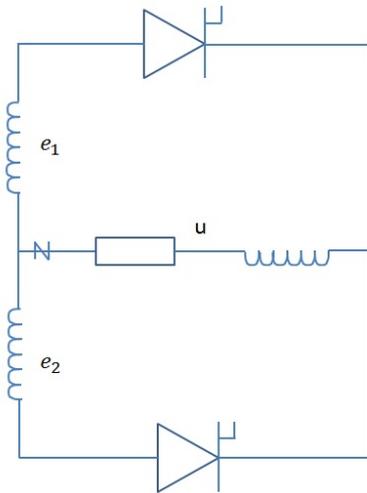
$$i_{\text{máx}} = I_{DC}$$

$$i_{\text{med}} = \frac{I_{DC}}{2} = i_{\text{ave}}$$

$$i_{\text{eficaz}} = \frac{I_{DC}}{\sqrt{2}} = i_{\text{rms}}$$

$$I_{DC} = \frac{U_m}{R} = \frac{2V_m}{\pi R}$$

5.4. RECTIFICADOR BIFÁSICO DE MEDIA ONDA CONTROLADO



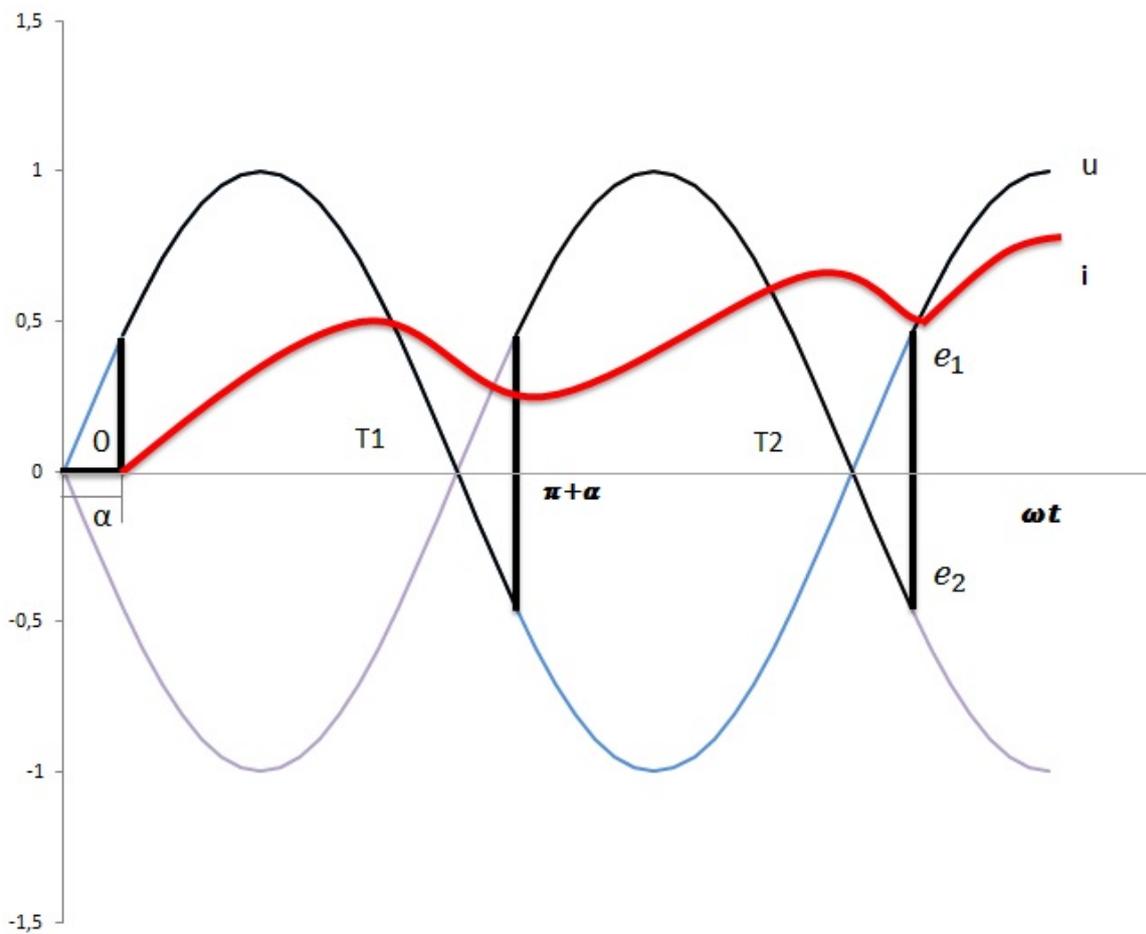
En este caso tenemos una conducción continua donde:

α , es el ángulo de disparo

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R} \quad \alpha \leq \varphi$$

$$U_m = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \text{sen} \omega t d\omega t = \frac{2V_m}{\pi} \cos \alpha$$

$$I_{DC} = \frac{U_m}{R}$$



Caso ideal

Si disparamos con un ángulo de disparo de 90 grados obtenemos el caso ideal:

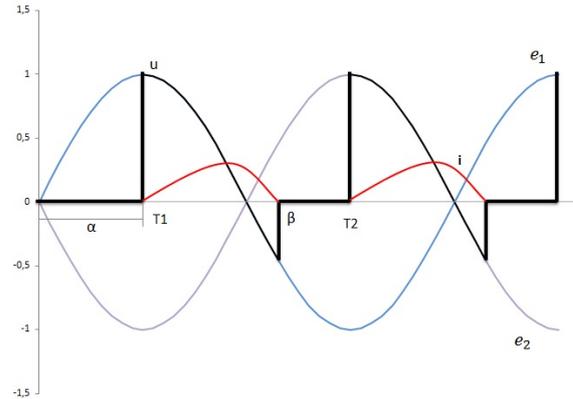
$$U_m = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_m \text{sen}\omega t$$

$$U_m = \frac{V_m}{\pi} (\text{cos}\alpha - \text{cos}\beta)$$

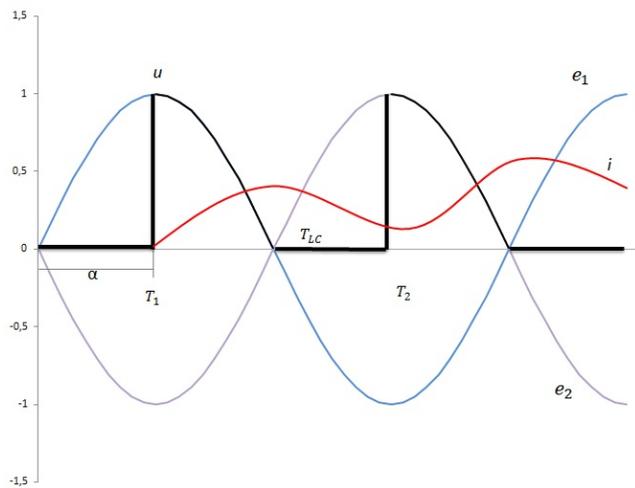
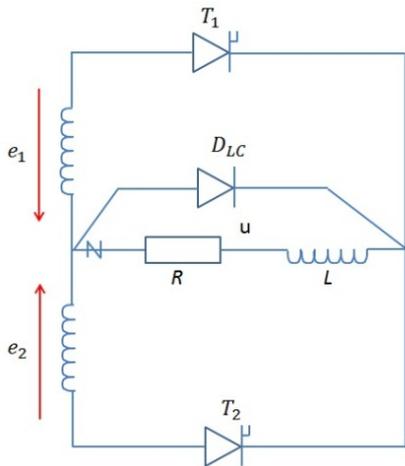
La corriente se va a extinguir antes de disparar T₂.

Este caso se da para $\alpha > \varphi$:

- La corriente se va a extinguir
- La tensión se hace negativa en ciertos tramos
- El valor medio de la tensión depende de la carga



Para mejorar este funcionamiento tenemos la posibilidad de introducir un diodo de libre circulación en antiparalelo con la carga.



Con el transcurso de los ciclos la intensidad se vuelve estacionaria.

Conducción de tiristores y diodo de libre circulación:

- Entre α y π conduce T₁.
- Entre π y $\pi + \alpha$ conduce D_{LC}.
- Entre $\pi + \alpha$ y 2π conduce T₂.

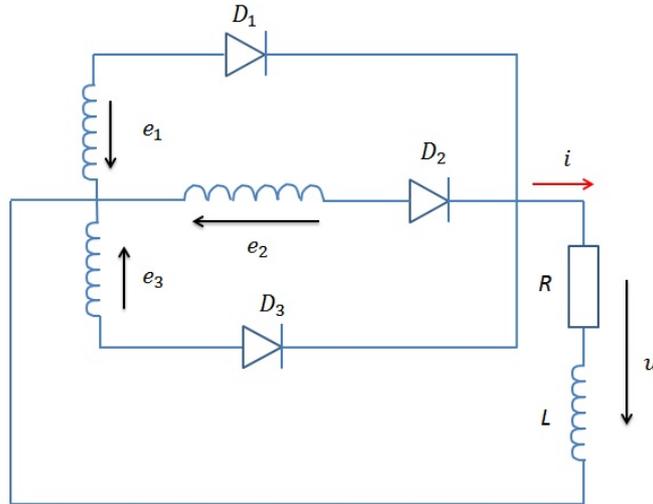
Como vemos, la tensión ya no se hace negativa debido a que el diodo de libre circulación lo impide.

$$U_m = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_m \text{sen}\omega t d\omega t = \frac{V_m}{\pi} (1 + \text{cos}\alpha)$$

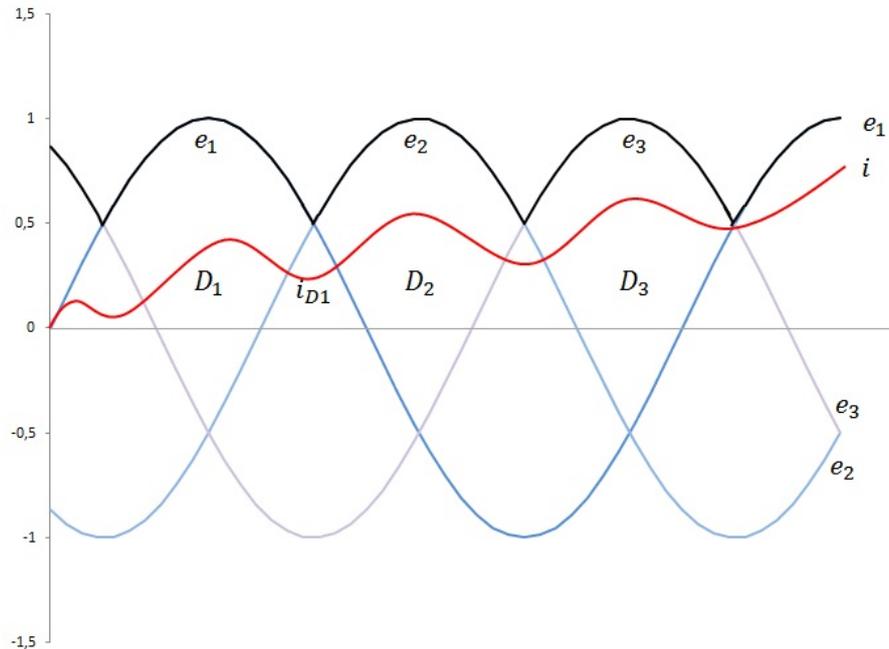
La tensión solo depende de la red y del ángulo de disparo. Por tanto, podemos decir que éste es un sistema más preciso.

5.5. RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA NO CONTROLADO

La tensión de salida será la mayor de las tensiones de entrada. Como es obvio, al incrementar el número de fases la característica de salida es mejor y, por tanto, la ondulación es menor.



Cada diodo conduce 1/3 la corriente. Por ejemplo, el diodo 1 (D1) conduce el primero y se hace 0 hasta que vuelve a conducir.



$$e_1 = V_m \text{sen} \omega t$$

$$V_m = \sqrt{2} E_{FN}$$

$$E_{FN} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

Fórmula general para “q” fases:

$$U_m = \frac{q}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q}}^{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q}} V_m \sin \omega t$$

$$U_m = \frac{qV_m}{2\pi} \left[\cos \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{q} \right) - \cos \left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{q} \right) \right]$$

$$U_m = \frac{q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q}, \text{ excepto para } q = 1, q = 2, 3, \dots 6, \dots$$

Para el caso trifásico:

$$U_m = \frac{3}{\pi} V_m \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$I_{DC} = \frac{U_m}{R}$$

$$i_{ave} = i_{med} = \frac{I_{DC}}{q}$$

Como podemos observar, cada diodo conduce $\frac{1}{q}$. Para el caso trifásico $\frac{1}{3}$.

$$i_{rms} = \frac{I_{DC}}{q} = i_{eficaz}$$

Potencia transformador (en caso de que lo haya).

$$P_t = q E_f i_f$$

$$E_f = \frac{V_m}{\sqrt{2}}$$

$$i_f = \frac{I_{DC}}{\sqrt{q}}$$

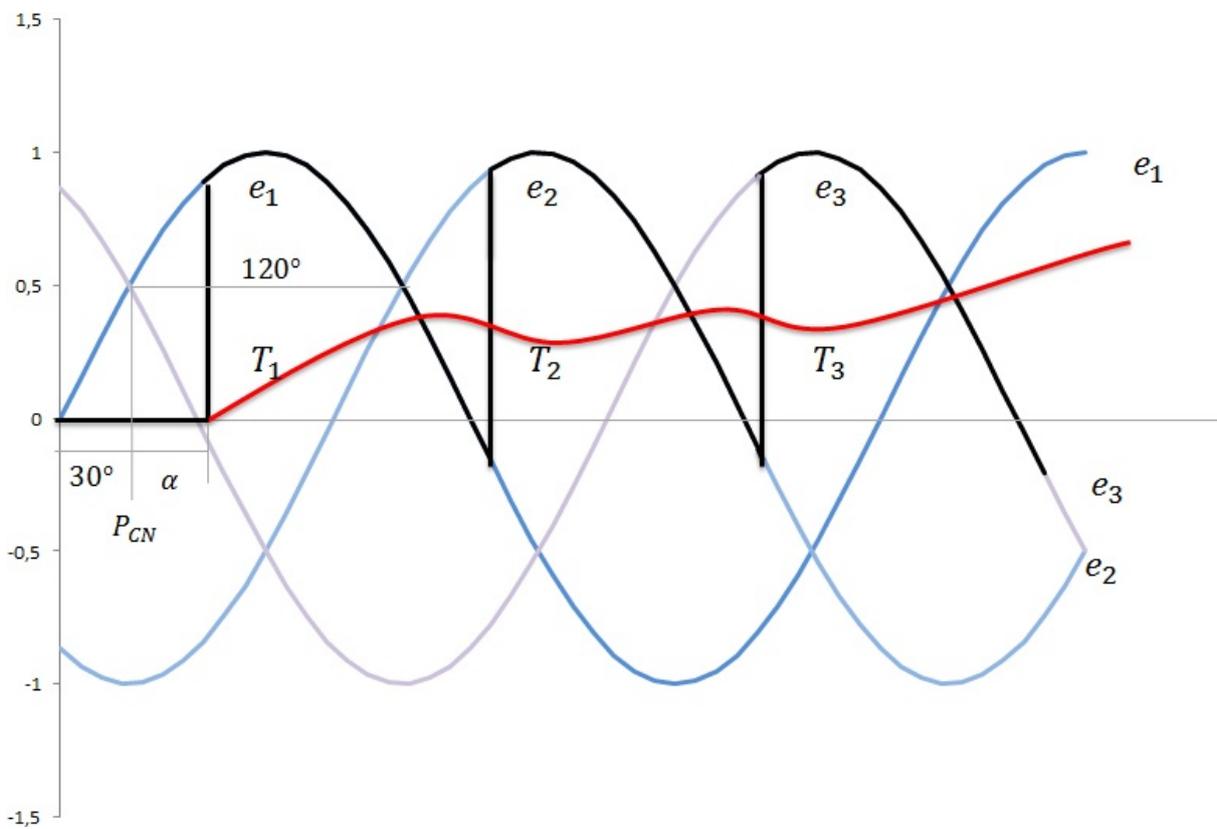
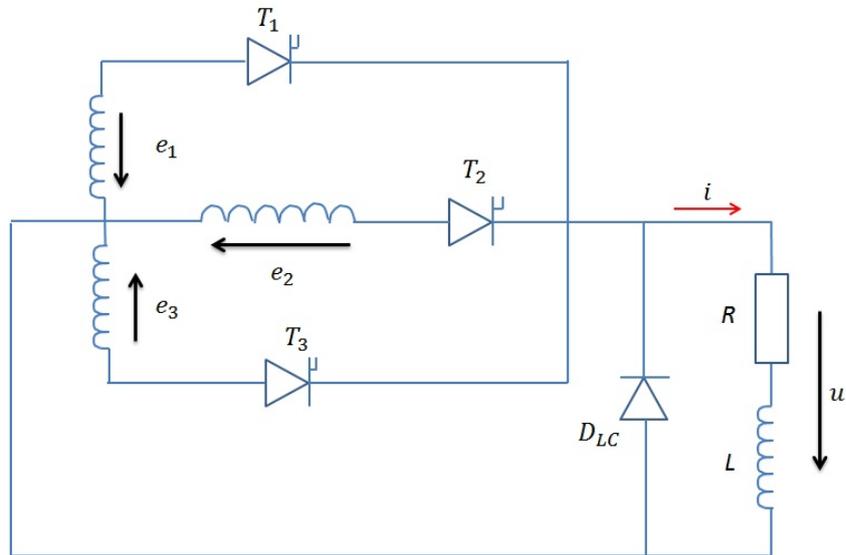
$$P_t = q \frac{V_m}{\sqrt{2}} \frac{I_{DC}}{\sqrt{q}}$$

$$P_t = \sqrt{\frac{q}{2}} V_m I_{DC}$$

Este dimensionado vale para tiristores en $\alpha = 0$, punto de máxima potencia.

5.6. RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA CONTROLADO

El esquema es el mismo sustituyendo tiristores por diodos.



P_{CN} es el punto de conmutación natural. El ángulo de disparo se va a medir ahora desde este punto, que para el caso trifásico son 30° .

La ecuación que rige el funcionamiento es la que sigue:

$$U_m = \frac{3}{\pi} V_M \sin \frac{3}{\pi} \cos \alpha$$

La demostración de esta ecuación sigue las mismas pautas que para el caso del rectificador bifásico.

Aspectos a tener en cuenta:

- Si el ángulo de disparo aumenta, la tensión disminuye y, a su vez, la intensidad.
- Para un ángulo de disparo igual a 0 obtendremos la máxima tensión, máxima intensidad y máxima potencia.
- Si aumentamos de forma considerable el ángulo de disparo llegará el momento en el que la corriente se extinga. En ese caso:

$$U_M = \frac{3}{2\pi} \int_{\alpha+30}^{\beta} V_M \sin(\omega t) d\omega t \quad ; \quad \beta \sim \mu + \varphi \quad ; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}$$

β es el ángulo en el que se extingue.

$$U_M = \frac{3}{2\pi} V_M (\cos(\alpha + 30) - \cos\beta)$$

En este último caso estamos hablando de conducción discontinua y se da siempre que se extinga la corriente. Se puede mejorar con un diodo de conducción libre.

Capítulo 6

Modelado y simulación de rectificadores

Capítulo 6

MODELADO Y SIMULACIÓN DE RECTIFICADORES

Con la simulación de circuitos en el entorno “Matlab” se estudian sus comportamientos y modos de trabajo. De esta forma estudiaremos la respuesta que se obtiene de los modelos de rectificadores tratados anteriormente.

Para poder trabajar se han tomado como características:

- 220V para la fuente alterna.
- Resistencia de 1Ω .
- Inductancia de 0.001 H.

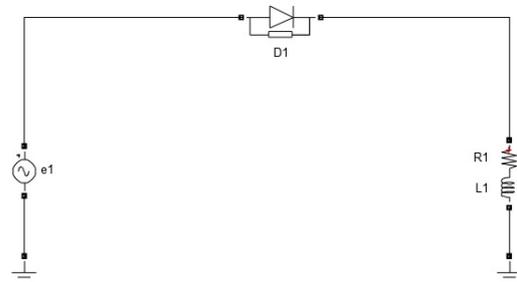
Disponemos además, en el caso de los modelos controlados, de un generador de impulsos que nos permite adecuar el control del rectificador a las necesidades que tengamos. Para trabajar con estos rectificadores impondremos un ángulo de disparo de 60° .

6.1. RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA

El rectificador monofásico de media onda es uno de los circuitos más fáciles que podemos construir. Está formado, básicamente, por una fuente de alimentación de corriente alterna, un diodo o transistor (dependiendo del grado de control que queramos) y la carga correspondiente.

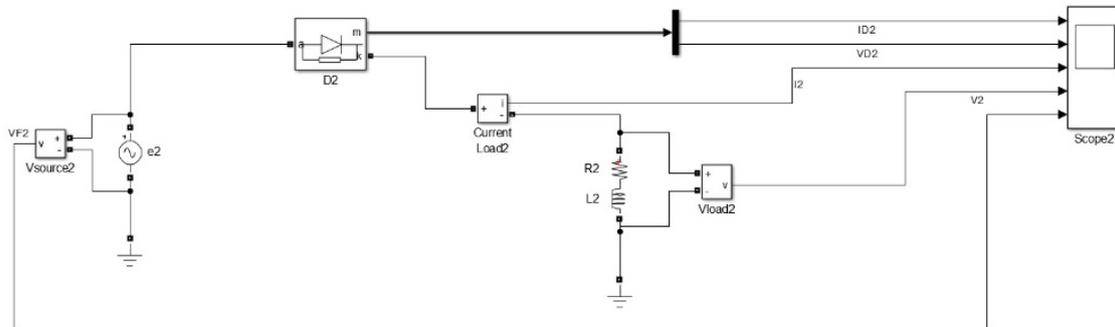
6.1.1. Rectificador monofásico de media onda no controlado

Se basa en un circuito cuya representación es de las más simples que veremos. Su aspecto en el entorno “Matlab” podría ser algo parecido al que vemos en la siguiente imagen.

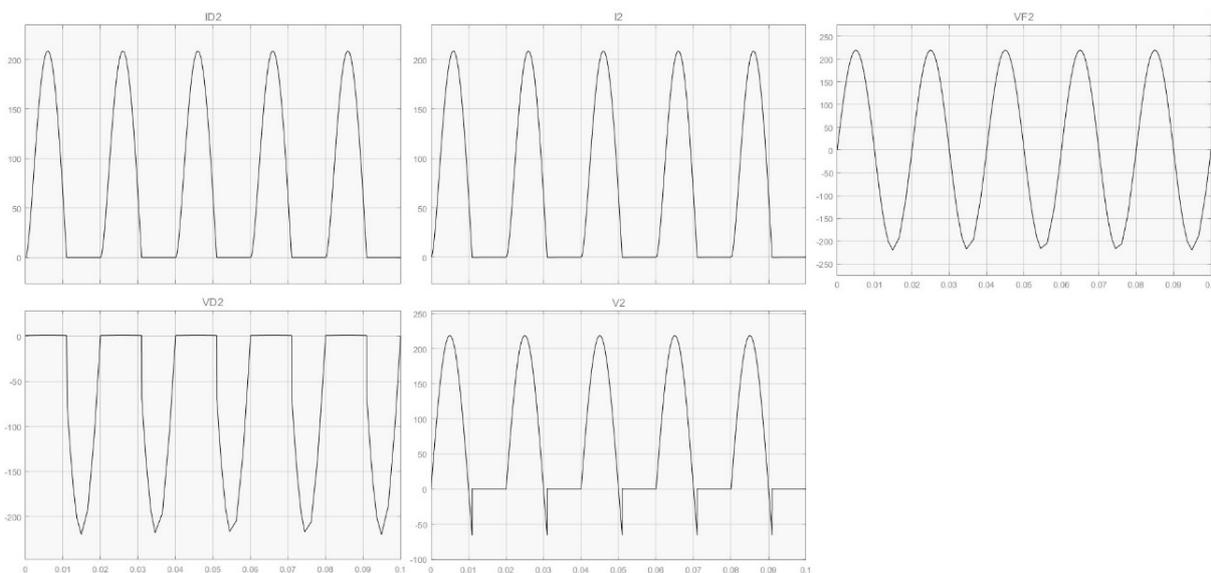


Sus componentes fundamentales son los ya mencionados.

Con objeto de estudio del funcionamiento del circuito se lleva a cabo su modificación mediante la introducción de instrumento de medida y visualización. Obtenemos así el modelo de la siguiente imagen.



Gracias a dichas herramientas podemos estudiar su funcionamiento.



Los gráficos están ordenados de la siguiente forma:

- I_D . Intensidad en el diodo.
- V_D . Tensión en el diodo.
- I . Intensidad en el circuito.
- V . Tensión en el circuito.
- V_F . Tensión proporcionada por la fuente de alimentación

En el caso del modelo controlado, obtendremos gráficos similares pero hablaremos de tiristores en lugar de diodos. Además, podremos visualizar un gráfico más correspondiente al generador de pulsos.

En este caso, se deduce con claridad como el diodo entra y sale de conducción teniendo en cuenta el valor que proporciona la fuente de alimentación.

Vemos como el funcionamiento es el esperado ya que:

- En los ciclos positivos (cuando la fuente de alimentación proporciona un valor positivo de corriente alterna) el circuito se comporta con normalidad.

En este caso la diferencia de potencial en el diodo es nula, lógicamente. No así la corriente que circula por él.

- En los ciclos negativos (cuando la fuente de alimentación proporciona un valor negativo de corriente alterna) el diodo deja de conducir la corriente y, por tanto, ésta no llega a la carga.

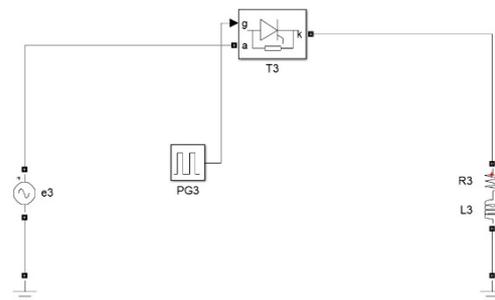
Ahora si existe una diferencia de potencial en el diodo como consecuencia del valor proporcionado por la fuente de alimentación. Asimismo, la intensidad es nula.

También observamos como la diferencia de potencial en la carga posee un valor negativo durante un breve periodo de tiempo. Esto es debido al retraso producido por la inductancia presente en la carga.

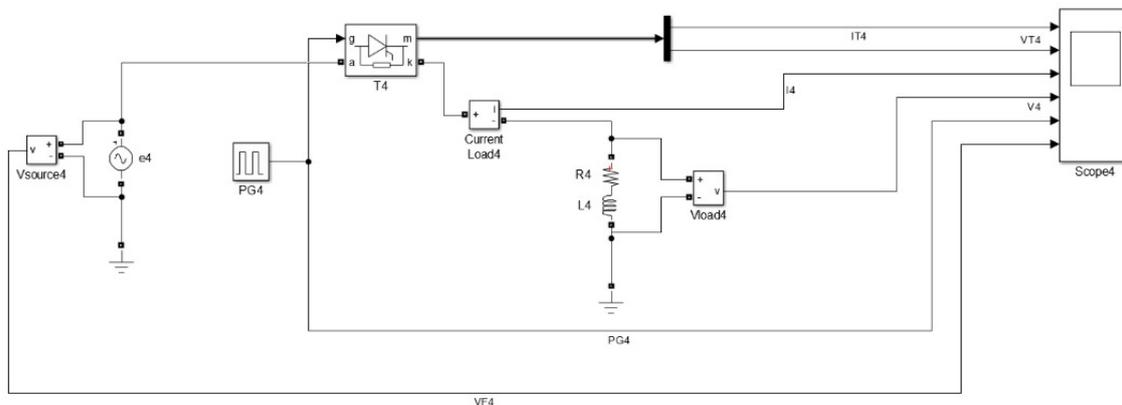
6.1.2. Rectificador monofásico de media onda controlado

El circuito es similar al del rectificador monofásico de media onda no controlado.

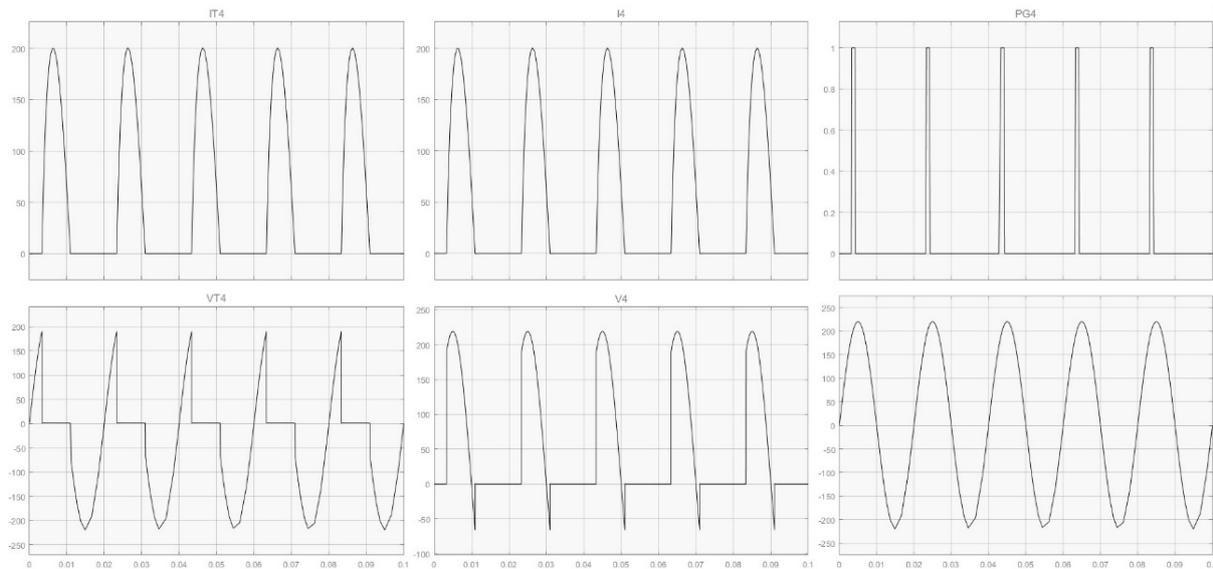
En este caso disponemos de un tiristor en lugar del diodo y de un generador de impulsos de disparo que nos dará lugar a ejercer un control sobre este modelo.



Al igual que en el caso anterior, disponemos las herramientas de medida y visualización que “Matlab” nos ofrece para llevar a cabo su estudio.



Los gráficos que nos marcan el funcionamiento de este modelo son los siguientes:



Observamos claramente que el tiristor está conduciendo a partir de la señal de disparo. Así:

- La diferencia de potencial en el tiristor va a ser negativa cuando esté polarizado en inversa y, a diferencia del caso anterior, vamos a tener un periodo de tiempo en el que sea positiva. Este periodo de tiempo se corresponde con el retraso producido por el generador de pulsos, o lo que es lo mismo, la señal de disparo o ángulo de disparo.
- De la misma forma, sólo tendremos corriente cuando el tiristor esté polarizado en directa y siempre a partir del ángulo de disparo.

Con respecto a la carga:

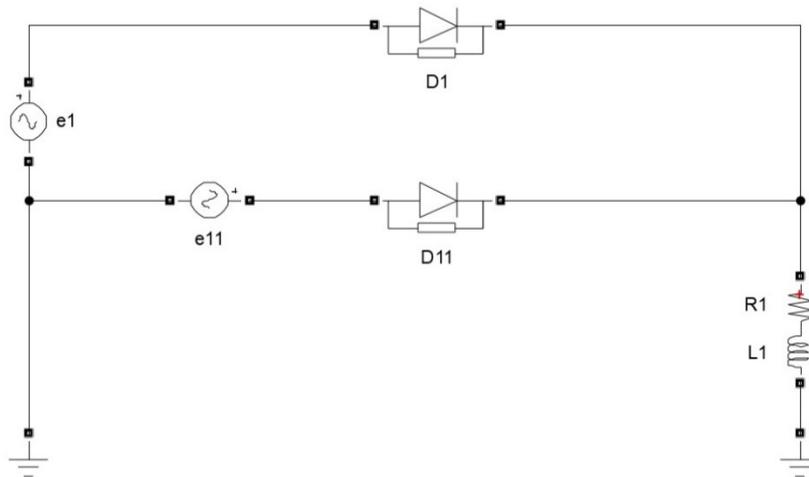
- La diferencia de potencial será positiva cuando el tiristor esté polarizado en directa y a partir de la señal proporcionada por el generador de pulsos.
- Cuando la fuente de alimentación produzca la polarización en inversa del tiristor, éste dejará de conducir. En este momento no tendremos diferencia de potencial en la carga salvo en un breve intervalo de tiempo correspondiente a la inductancia de la carga, donde la diferencia de potencial será negativa.

6.2. RECTIFICADOR BIFÁSICO DE MEDIA ONDA

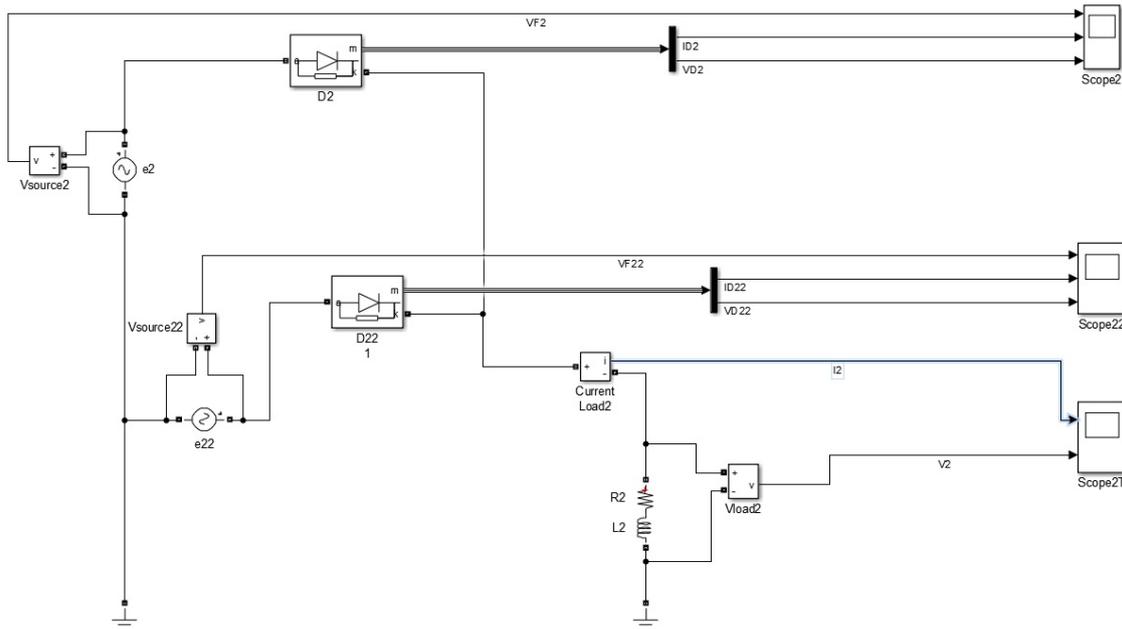
El rectificador bifásico de media onda consta, siguiendo la estructura marcada por el rectificador monofásico, de dos fuentes de alimentación, dos diodos o tiristores y la carga.

6.2.1. Rectificador bifásico de media onda no controlado

La representación de este circuito en “Matlab” es similar a la del caso monofásico.

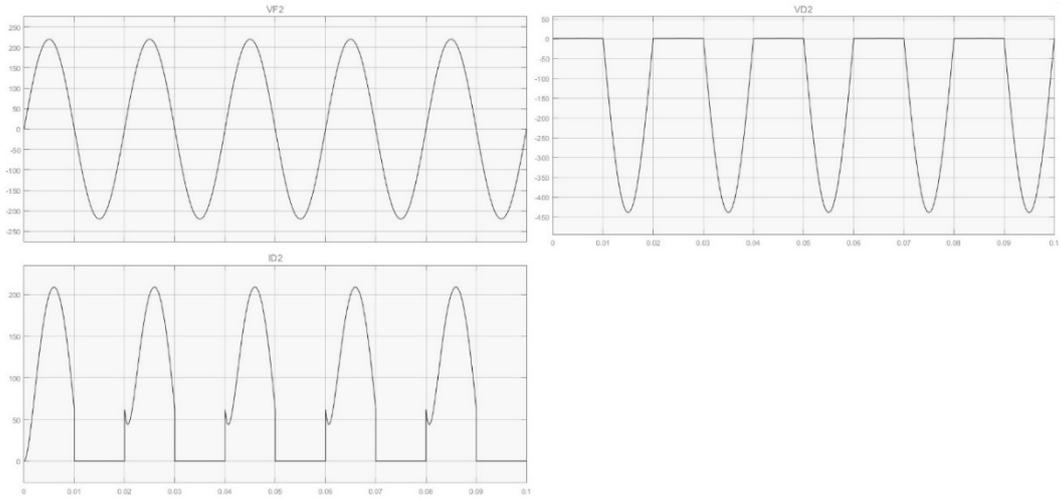


Al igual que en el caso anterior, llevamos a cabo su estudio mediante la introducción de los elementos de medida y visualización necesarios. Obtenemos algo de este estilo.

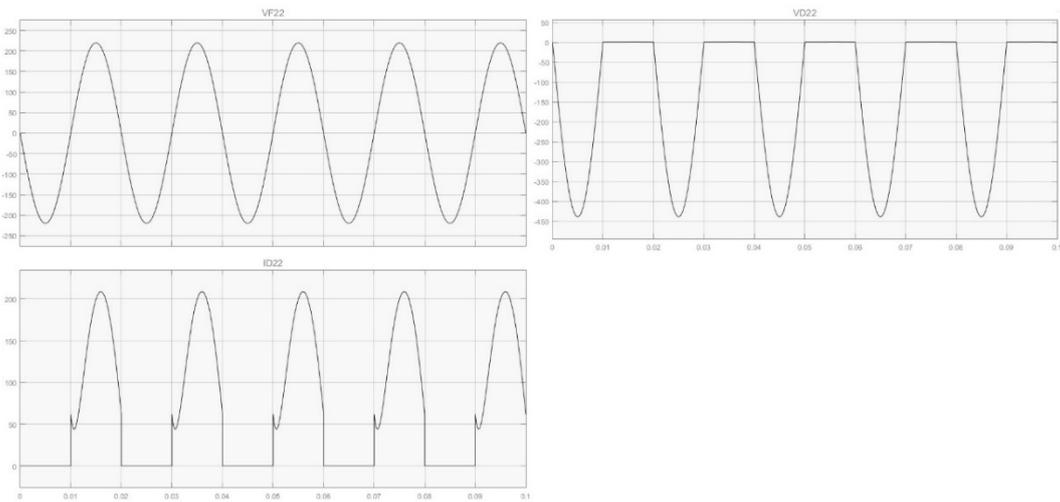


El funcionamiento del rectificador se observa en los siguientes gráficos.

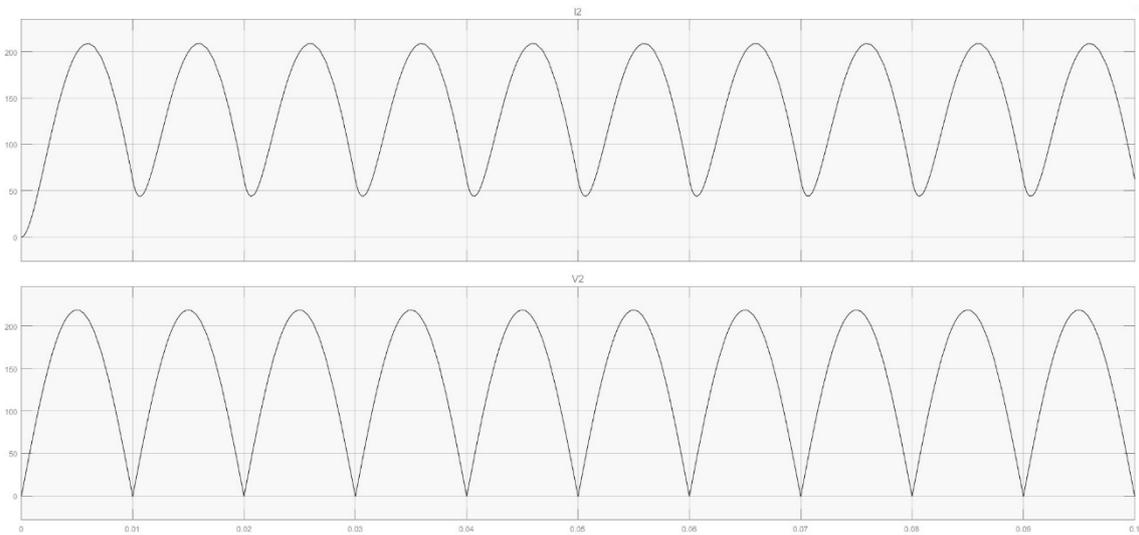
Funcionamiento Diodo 1



Funcionamiento Diodo 2



Funcionamiento Rectificador



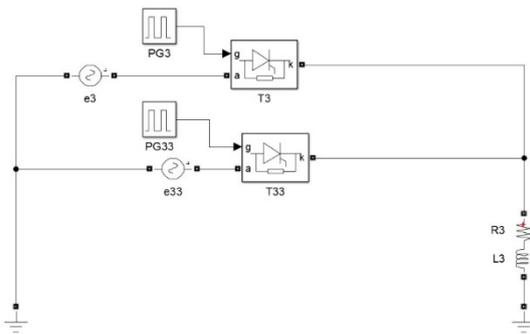
Vemos como los diodos entran y salen de la conducción dependiendo del valor de su fuente de alimentación. En este caso, el caso bifásico, las fuentes de alimentación están desfasadas 180°. Así, cuando una nos da el ciclo de corriente alterna positivo, la otra nos da su ciclo negativo.

De esta forma cuando un diodo está polarizado en directa, el otro está en inversa. O lo que es lo mismo, siempre hay un diodo que permite el paso de corriente a la carga.

Como vemos en las gráficas que nos muestran el funcionamiento general del rectificador, la diferencia de potencial en la carga siempre es positiva ya que recoge los ciclos positivos de ambas fuentes de alimentación. Esta característica representa una mejora con respecto al rectificador monofásico ya que en el obteníamos intervalos de tiempo en los que no existía diferencia de potencial en la carga que se correspondían con la polarización inversa del diodo.

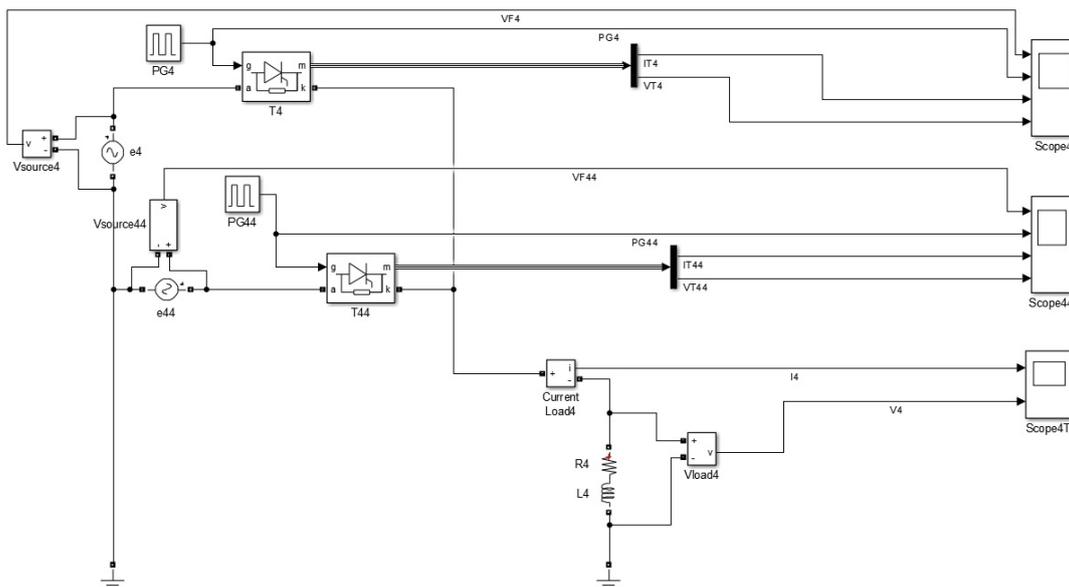
La intensidad del rectificador siempre va a ser positiva, es decir, no se va a extinguir. Esta es otra mejora con respecto al caso monofásico ya que en él la intensidad era nula cuando, obviamente, el diodo no conducía.

6.2.2. Rectificador bifásico de media onda controlado



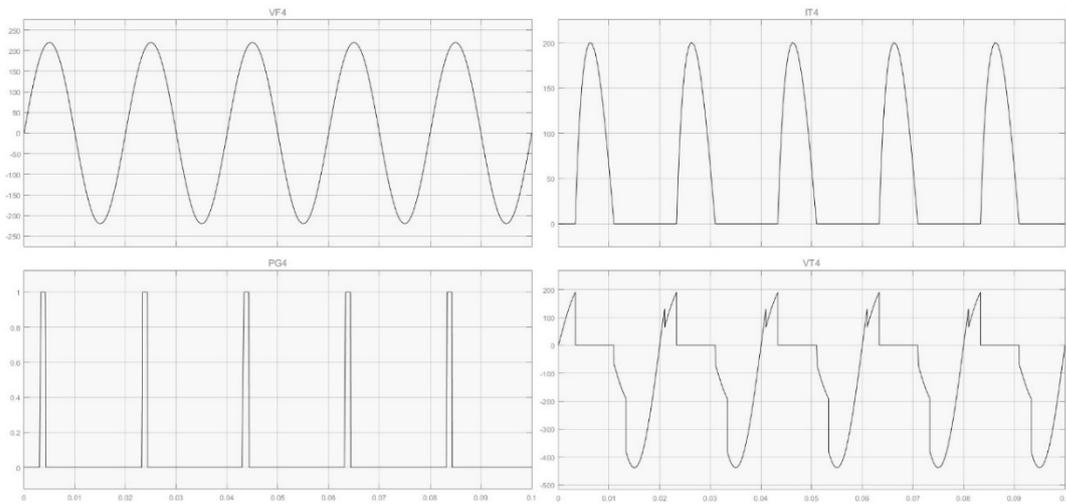
La representación del circuito del rectificador bifásico de media onda controlado es similar al del no controlado teniendo en cuenta la sustitución de diodos por tiristores y la introducción de generadores de la señal de disparo.

Introduciendo de nuevo las herramientas de medida y visualización, así como las de control de la señal de disparo podremos llevar a cabo su estudio.

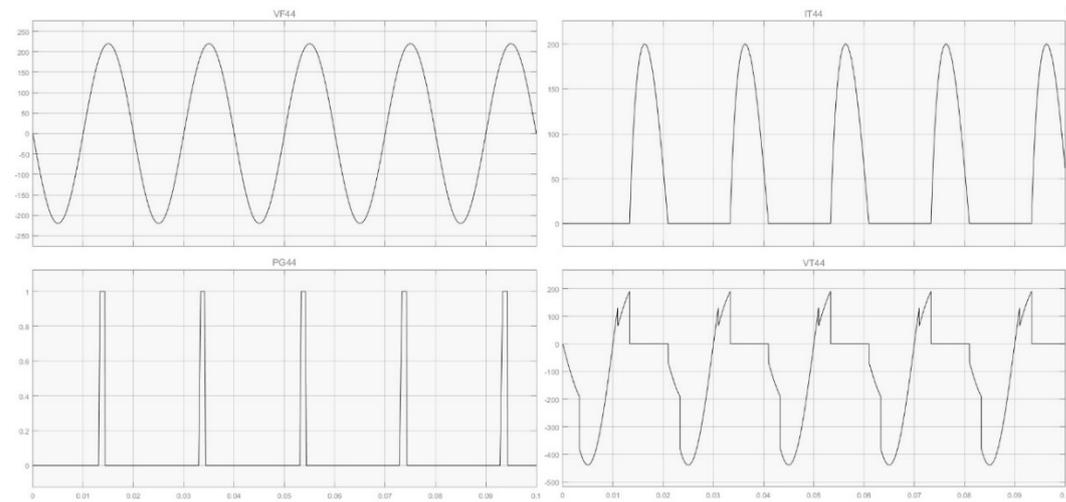


El funcionamiento del rectificador se observa en los siguientes gráficos.

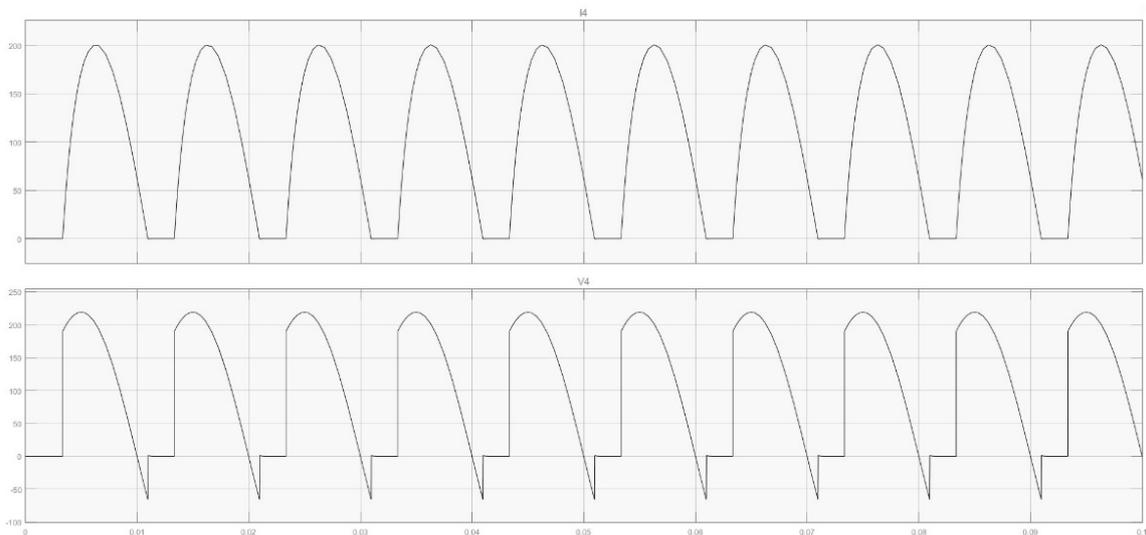
Funcionamiento Tiristor 1



Funcionamiento Tiristor 2



Funcionamiento Rectificador



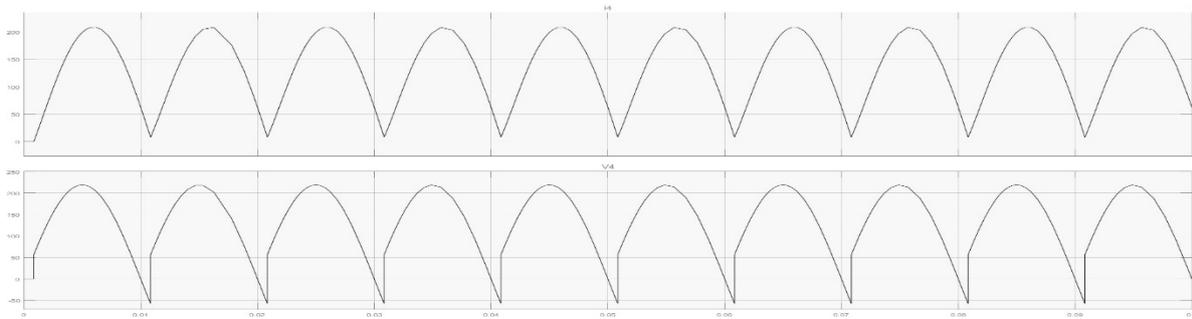
Al igual que en el caso no controlado, vemos como los tiristores entran y salen de conducción forzados por la fuente de alimentación y la señal de disparo. Lógicamente, las fuentes de alimentación también están desfasadas 180°. De esta forma siempre va a haber un tiristor polarizado en directa y el otro en inversa.

Así, siempre hay un tiristor que va a permitir el paso de la corriente. La diferencia con el caso no controlado es que ahora ese paso de corriente también va a depender de la señal de disparo.

En el rectificador bifásico no controlado la corriente no se extingüía, en el controlado sí. Esto es debido al ángulo de disparo con el que estemos trabajando. En este caso, 60°, es suficiente para que la corriente se extinga por un breve periodo de tiempo.

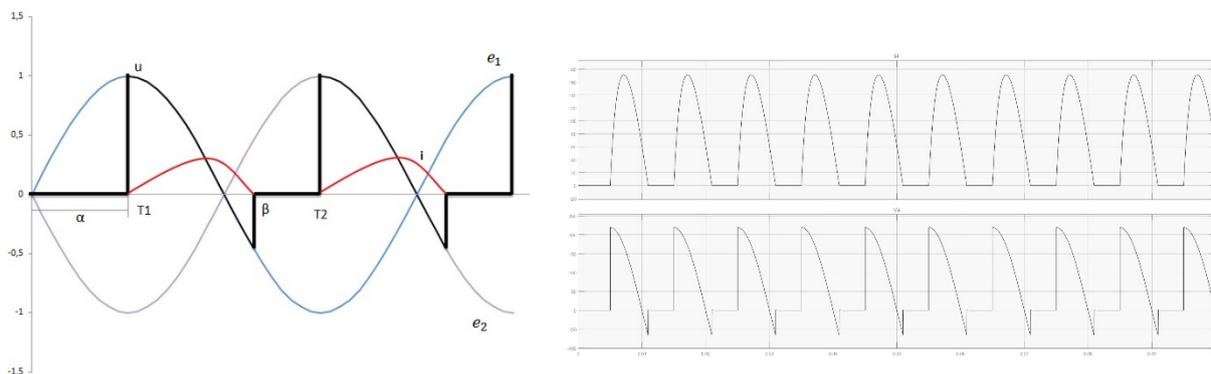
También ocurre con la diferencia de potencial en la carga, que tiene intervalos positivos, negativos y nulos.

Si ponemos la condición de un ángulo de disparo de, por ejemplo, 15°, obtenemos el siguiente funcionamiento.



Vemos como en este caso la corriente ya no se extingue.

Como ya estudiamos anteriormente, el caso ideal se da para un ángulo de disparo de 90°. La comparativa de gráficas es la siguiente.



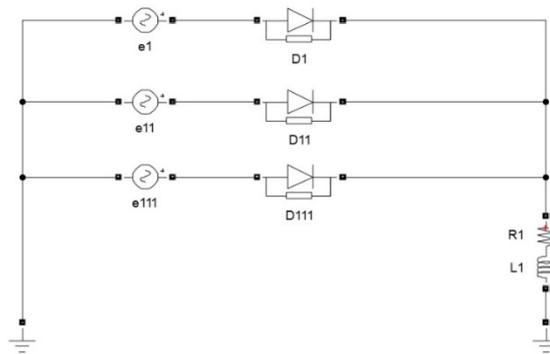
Como vemos, ambas gráficas se corresponden.

6.3. RECTIFICADOR TRIFÁSICO DE MEDIA ONDA

Como cabe esperar, y siguiendo los pasos de sus predecesores, el rectificador trifásico de media onda consta de tres fuentes de alimentación, tres diodos o tiristores (dependiendo del grado de control) y la carga correspondiente.

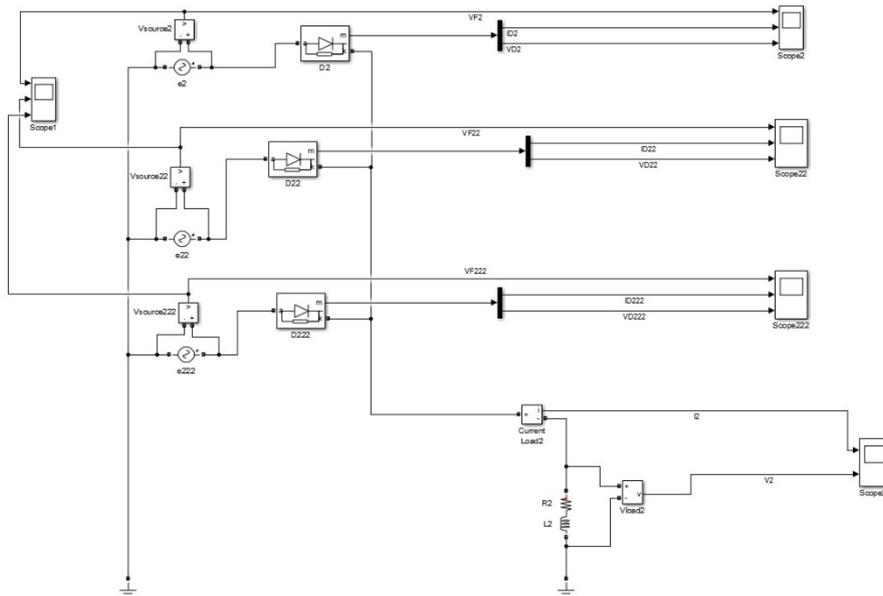
6.3.1. Rectificador trifásico de media onda no controlado

La representación de este modelo para su posterior simulación es la siguiente.

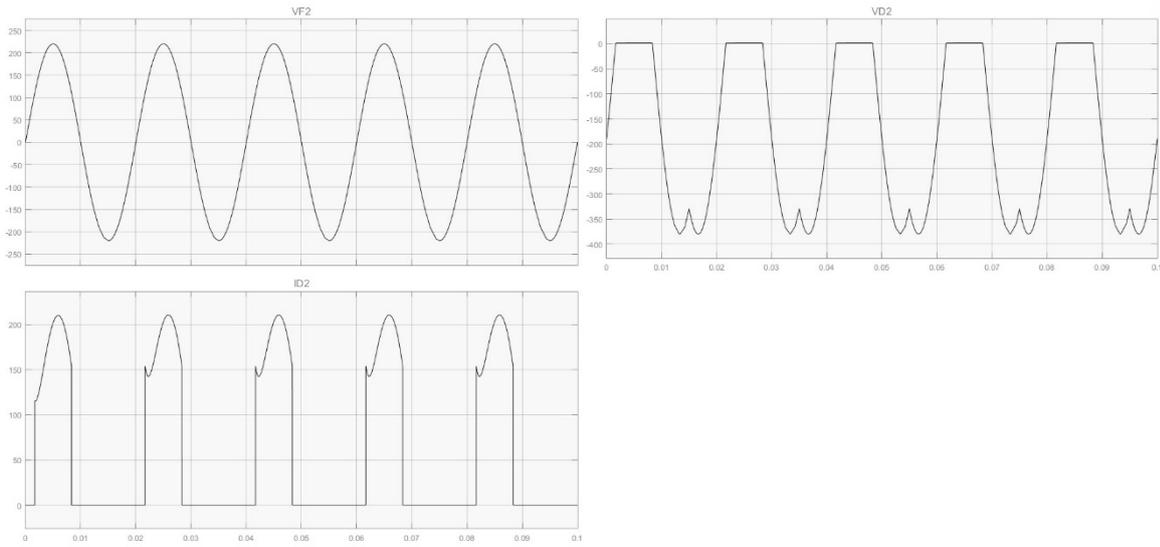


Seguiremos el mismo procedimiento que en los casos anteriores para proceder con su estudio mediante la introducción de las herramientas de medida y visualización. Obtenemos el siguiente modelo.

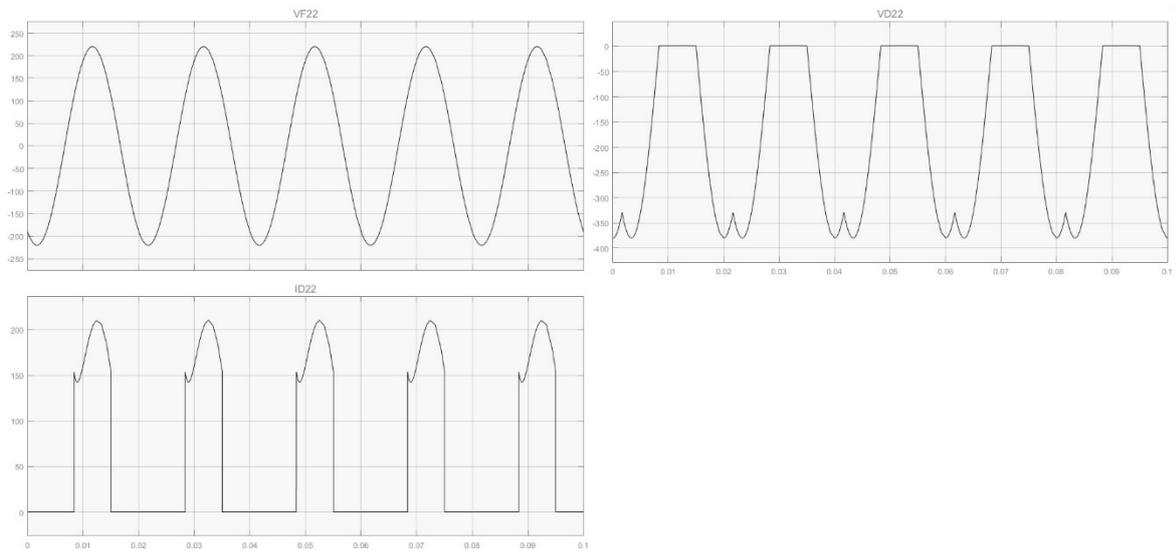
El funcionamiento del rectificador se observa en los siguientes gráficos.



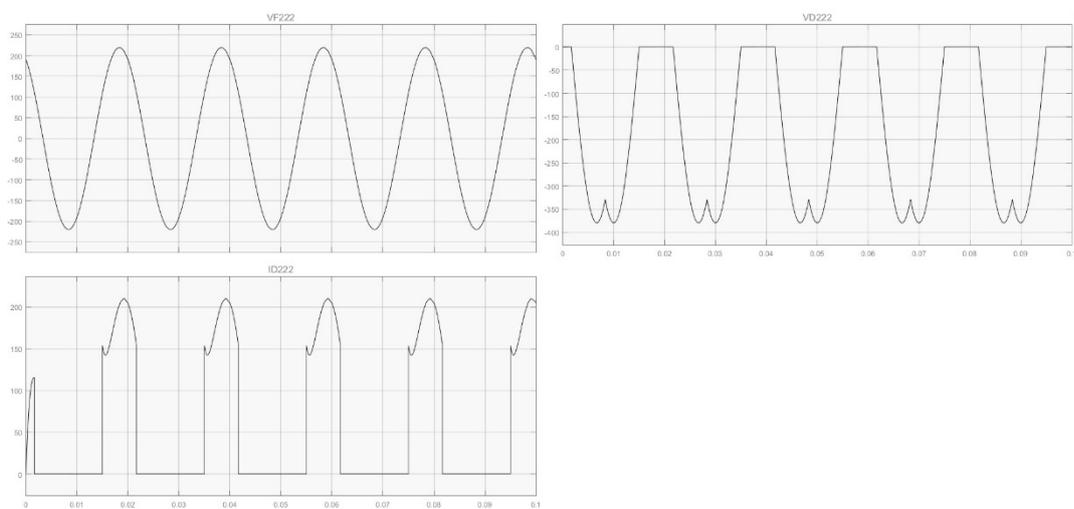
Funcionamiento Diodo 1



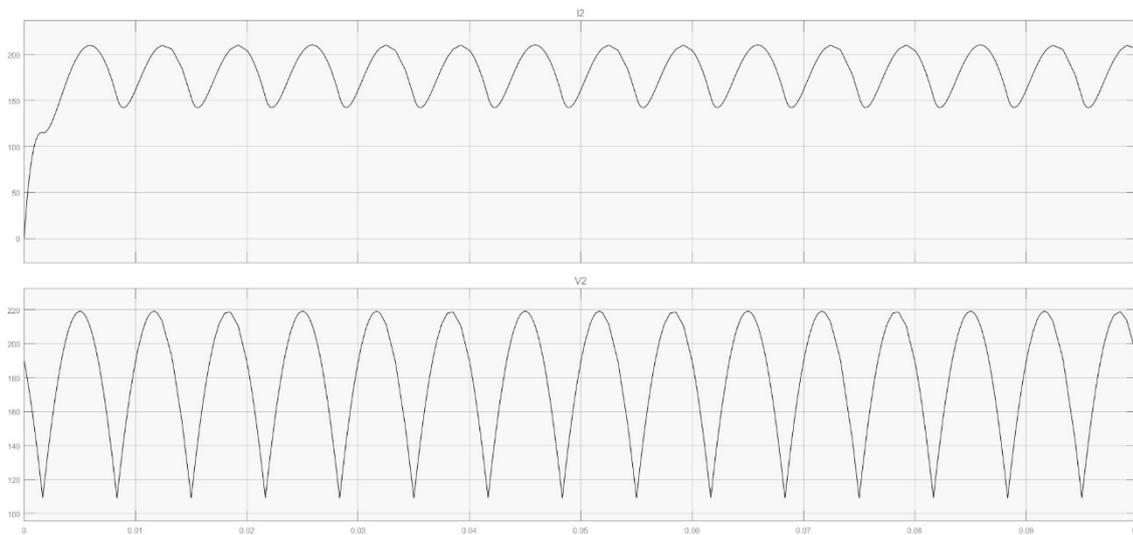
Funcionamiento Diodo 2



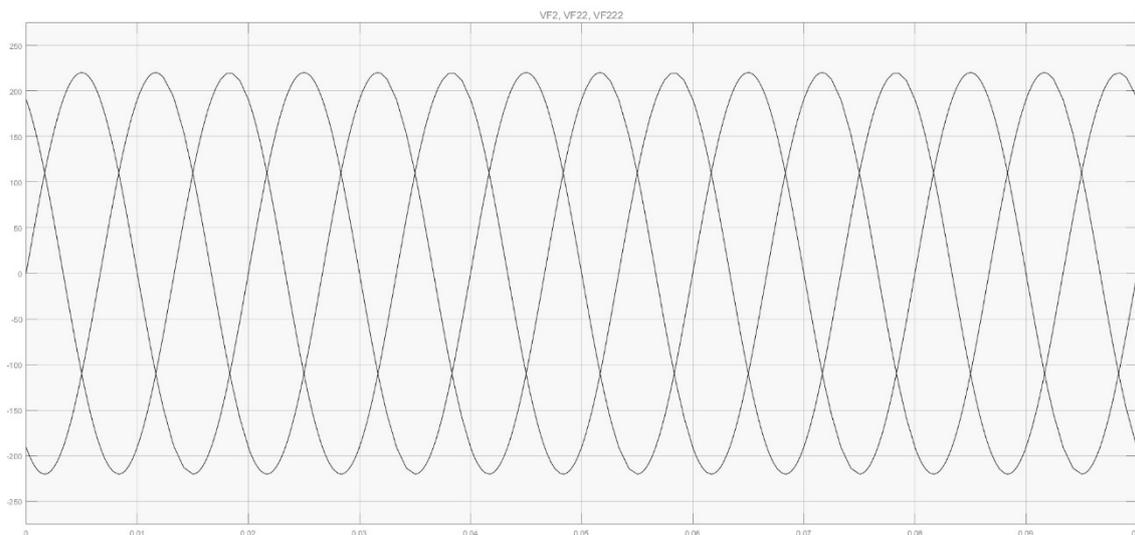
Funcionamiento Diodo 3



Funcionamiento Rectificador



Lo primero que se aprecia es la conducción de los diodos. Éstos ya no entran y salen de conducción dependiendo únicamente de “su fuente de alimentación” sino que van a depender de las tres fuentes de alimentación. El desfase entre las fuentes de alimentación es de 120° de modo que sus ciclos se solapan.

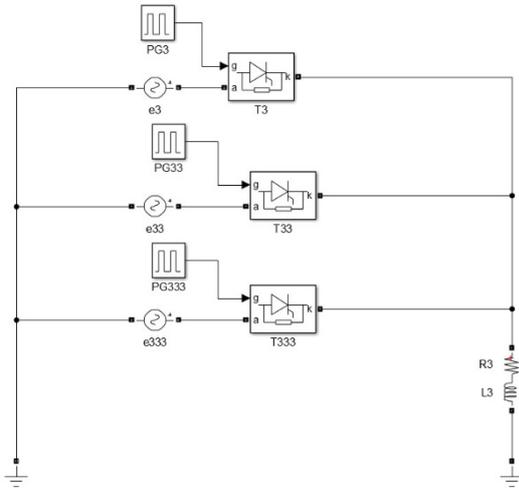


De este modo la polarización de los diodos ya no va a depender únicamente de su fuente de alimentación. Al igual que en el caso bifásico, siempre vamos a tener un diodo que permita el paso de la corriente eléctrica. Cada diodo conducirá la tercera parte de la corriente.

En las gráficas que rigen el funcionamiento del rectificador vemos como la tensión ya no va a ser negativa ni nula, será la mayor de las tensiones de entrada. De esta forma se da un paso adelante con respecto a la configuración bifásica.

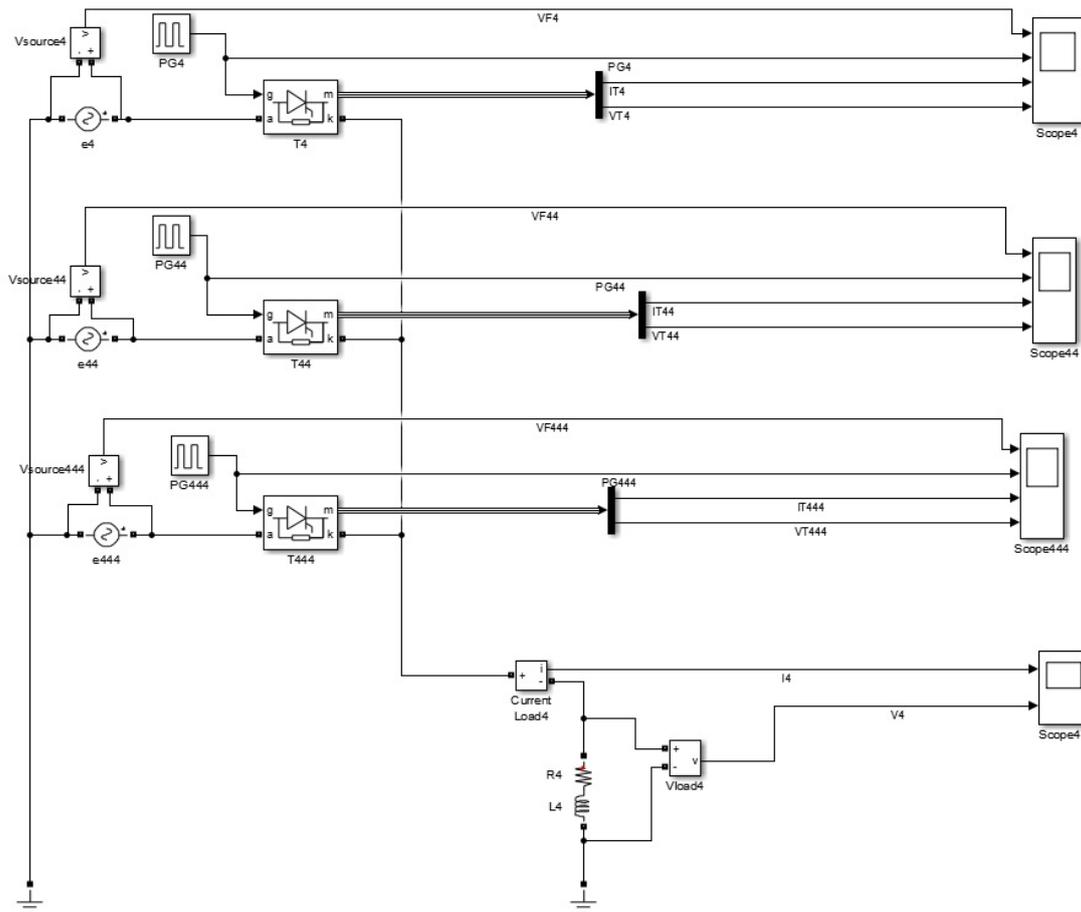
Por último, podemos apreciar una mejora en el paso de la corriente con respecto al caso bifásico. Lejos de extinguirse como pasaba en el modelo monofásico, al incrementar el número de fases la intensidad presenta la mejor condición de salida vista hasta el momento con una ondulación mucho menor que en los casos anteriores.

6.3.2. Rectificador trifásico de media onda controlado



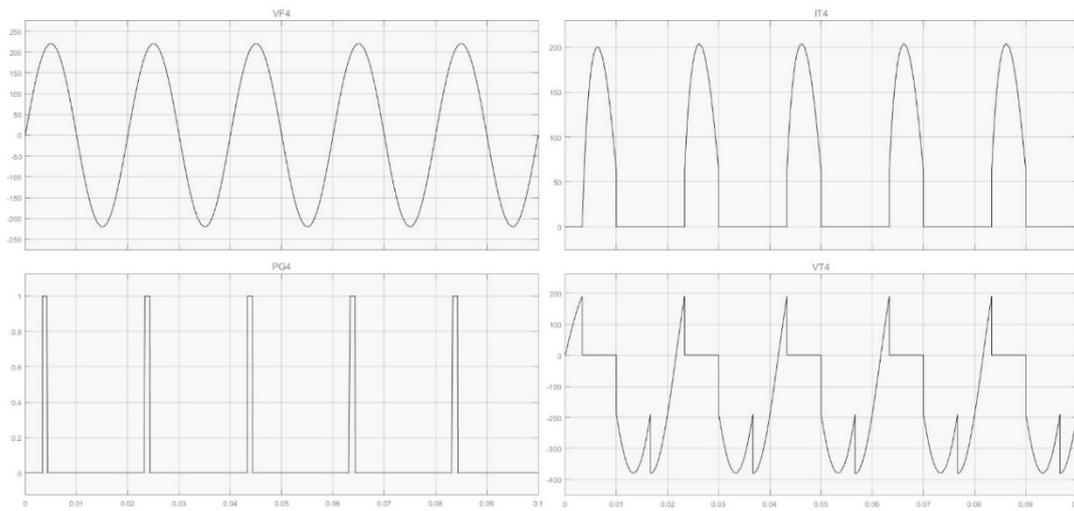
Siguiendo el mismo patrón empleado en los casos anteriores, la representación gráfica del rectificador trifásico controlado se basa en la sustitución de los diodos de la opción controlada por tiristores introduciendo, claro está, los generadores de pulsos para establecer la señal de entrada y poder así ejercer un cierto control que de otra forma no tendríamos.

Como hemos hecho en casos anteriores, introducimos las herramientas que pone a nuestra disposición el programa como son elementos de medida y visualización así como de control con objeto, una vez más, de llevar a cabo su estudio.

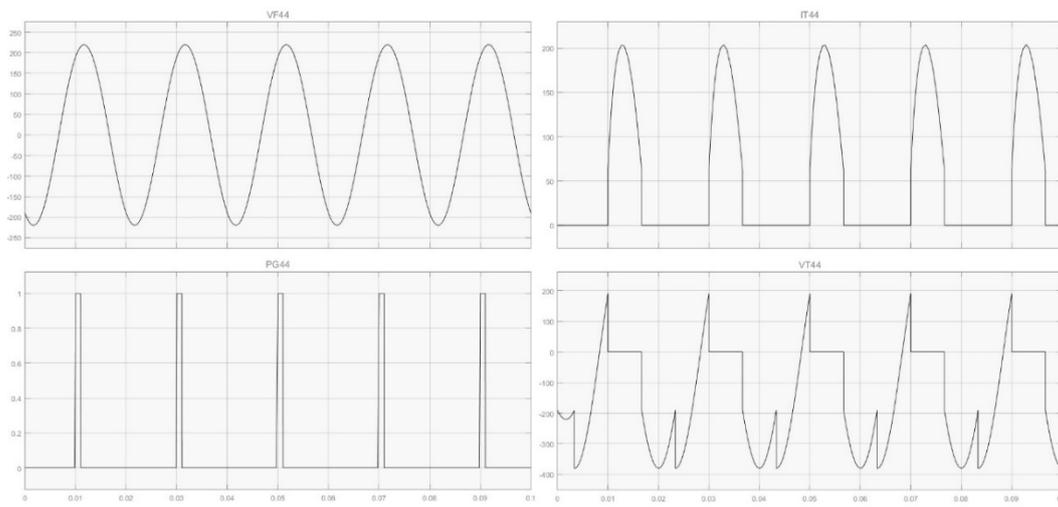


Los siguientes gráficos nos muestran el funcionamiento del rectificador.

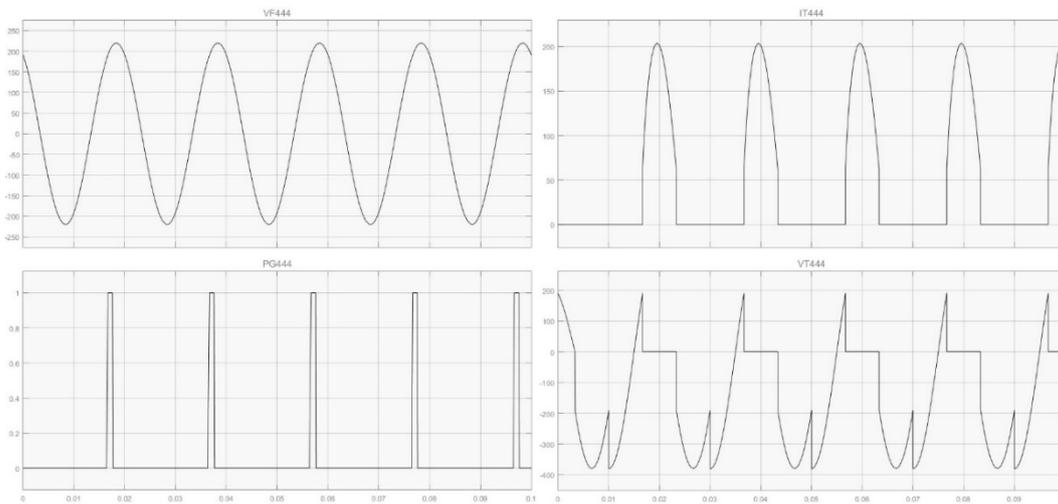
Funcionamiento Tiristor 1



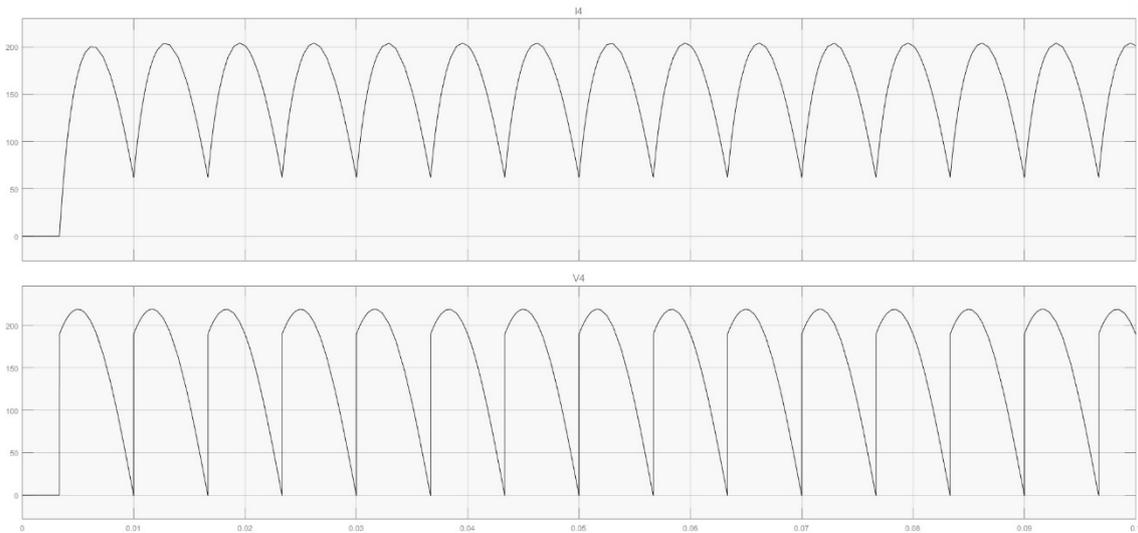
Funcionamiento Tiristor 2



Funcionamiento Tiristor 3



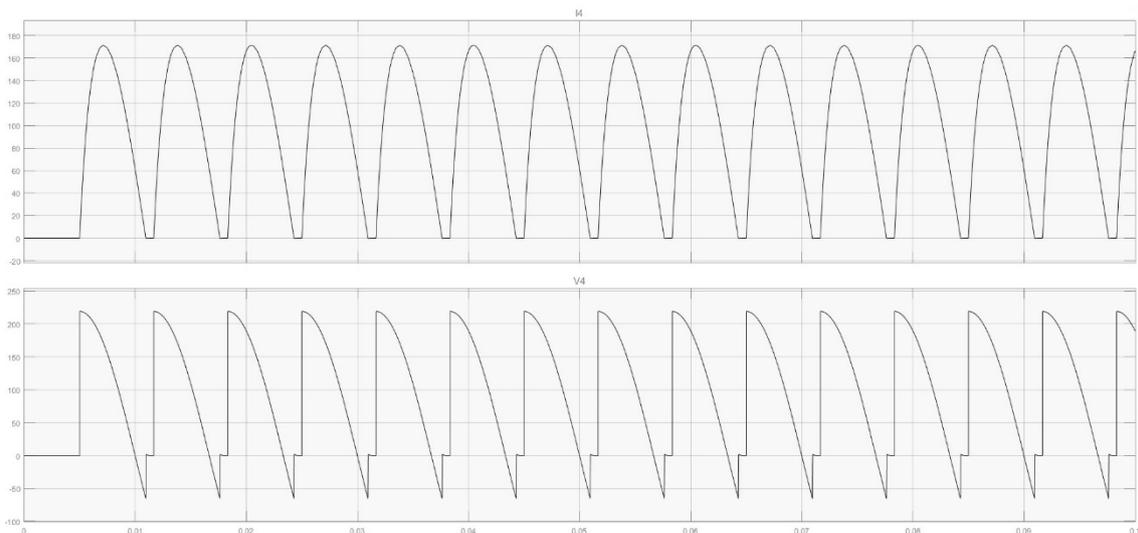
Funcionamiento Rectificador



Una vez más, vemos como los tiristores entran y salen de conducción forzados por las fuentes de alimentación y la señal de disparo. Como en el modelo no controlado, las fuentes de alimentación están desfasadas 120° de forma que siempre va a haber un tiristor polarizado en directa.

Con esto nos aseguramos que siempre exista un tiristor que permita el paso de la corriente eléctrica. Como ocurría en el rectificador bifásico controlado, el paso de corriente también va a depender de la señal de disparo.

Al igual que ocurría en el rectificador bifásico controlado, en este caso la extinción de la corriente también va a depender del ángulo de disparo con el que estemos trabajando. Vemos como con un ángulo de 60° la corriente no se extingue. Veamos que ocurre, por ejemplo, con un ángulo de 90°.

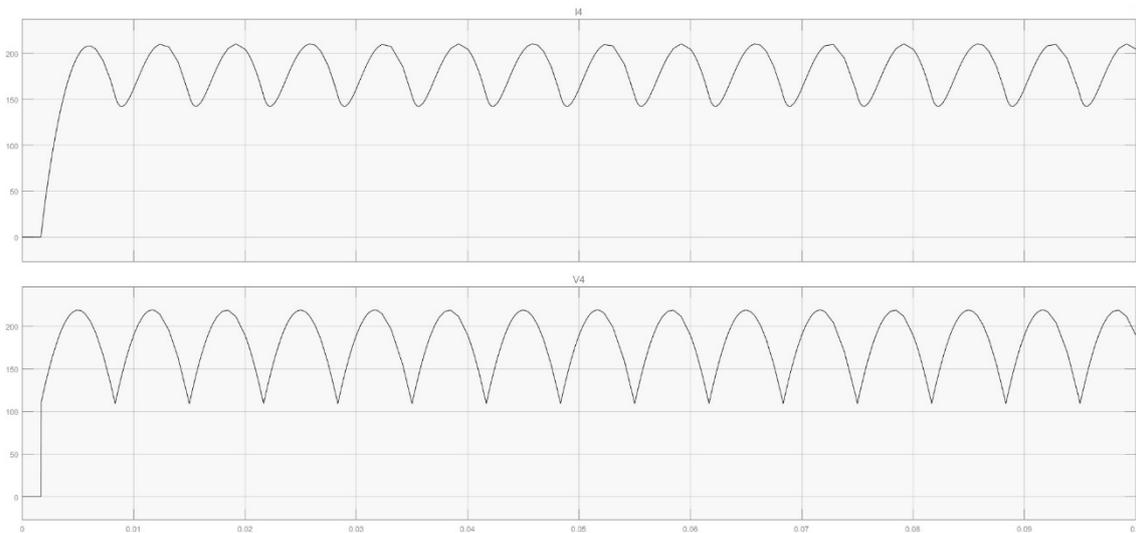


Como vemos, la extinción de la corriente sigue dependiendo de la señal de disparo. Lo mismo ocurre con la diferencia de potencial, que en este caso también tiene intervalos negativos y nulos.

Esto se denomina conducción discontinua y puede mejorarse mediante la introducción de un diodo de libre circulación.

Para el modelo trifásico, el ángulo de disparo se va a medir a partir del punto de conmutación natural (punto donde se cruzan los ciclos positivos), que en este caso es de 30° . Si estábamos trabajando con un ángulo de disparo de 60° , ahora equivale a trabajar con uno de 30° .

Para una señal de disparo de 0° estaremos trabajando con la máxima tensión, corriente y potencia.



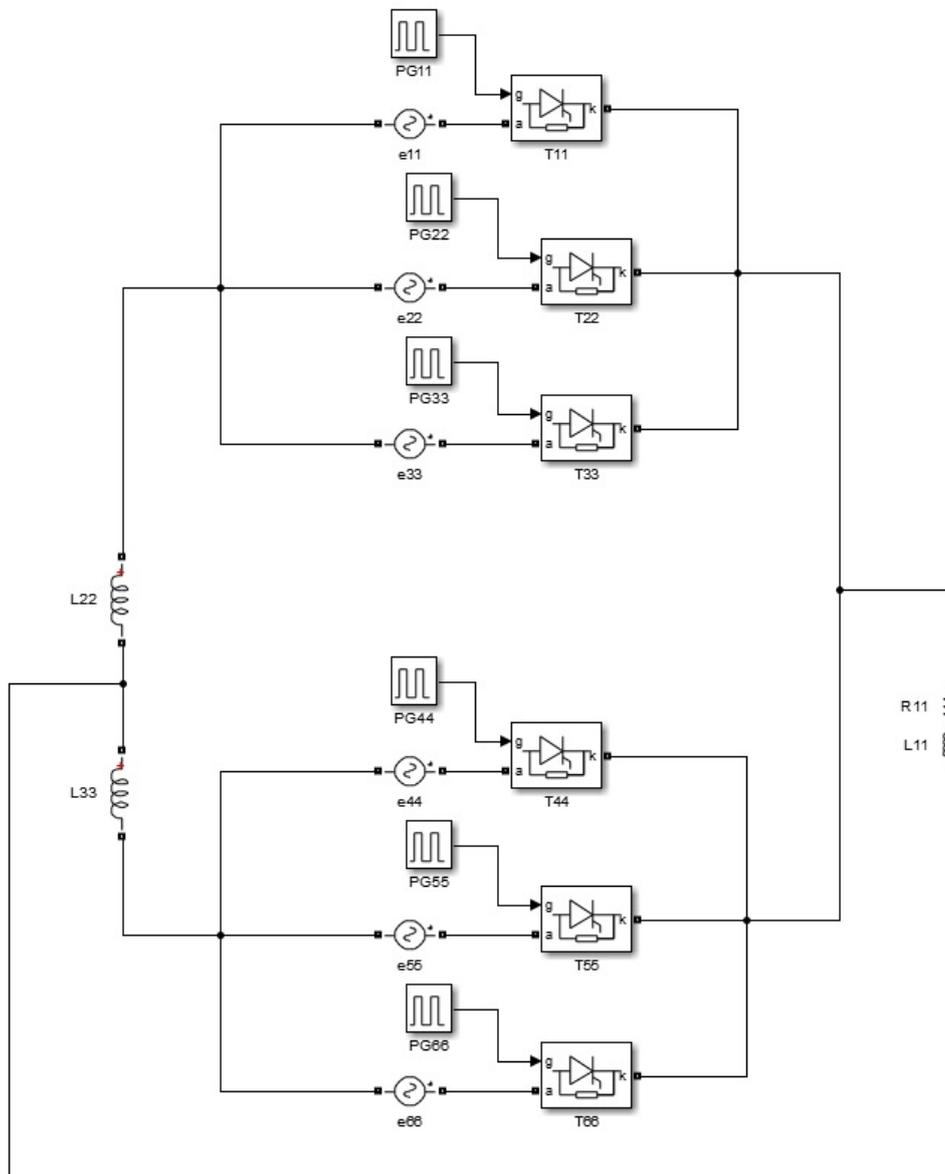
Capítulo 7

Montaje en doble estrella con bobina de absorción

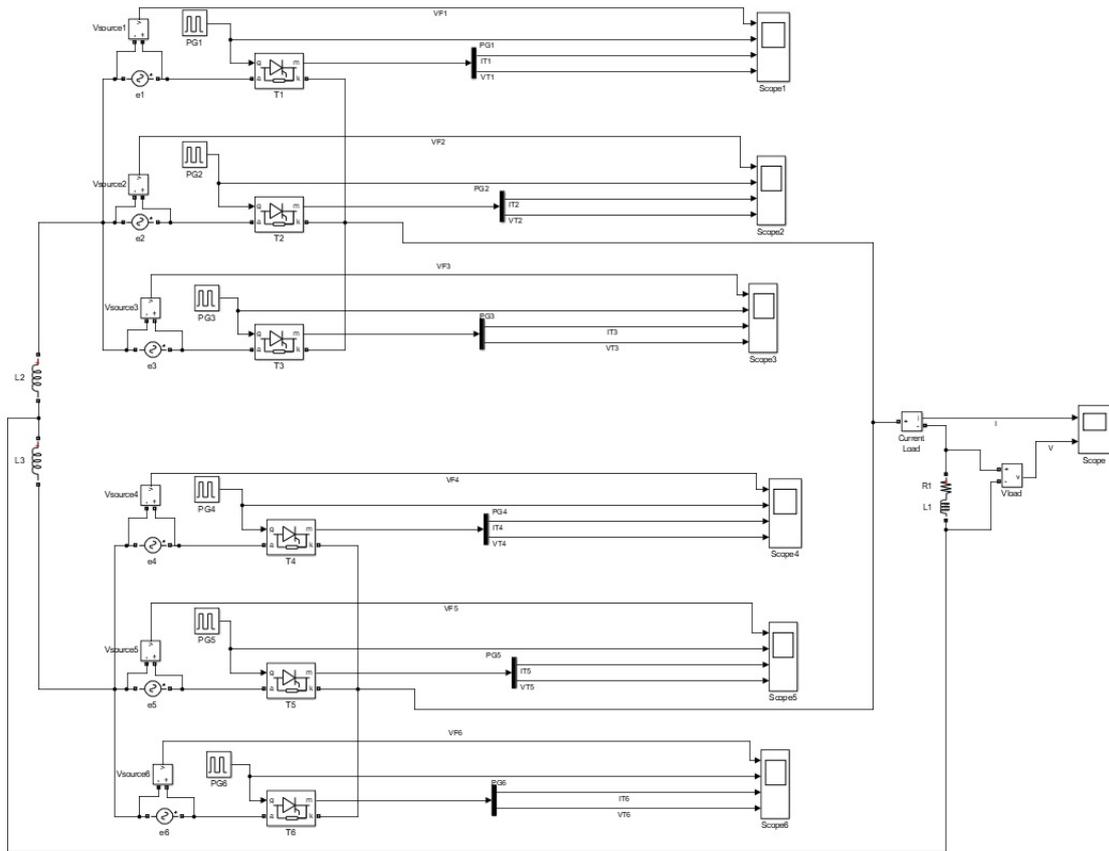
Capítulo 7

MONTAJE EN DOBLE ESTRELLA CON BOBINA DE ABSORCIÓN

La representación del modelo del montaje en doble estrella con bobina de absorción en “Matlab” es la más compleja y completa vista hasta el momento.

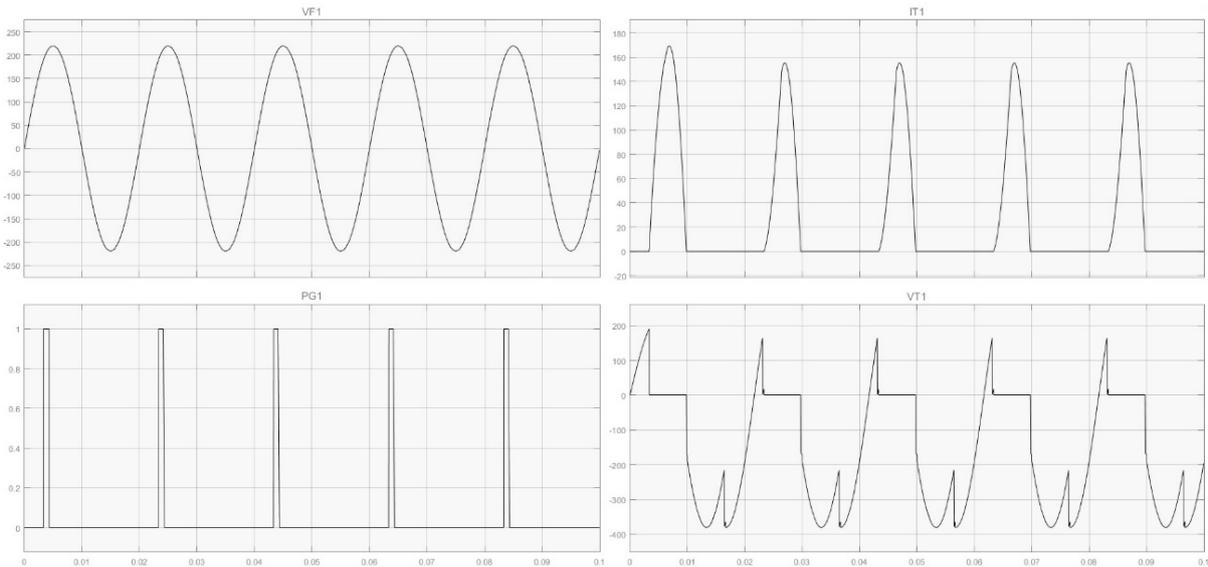


Como hemos hecho en los casos anteriores, debemos hacer uso de las herramientas de medida, visualización y control que el programa nos facilita para llevar a cabo su estudio.

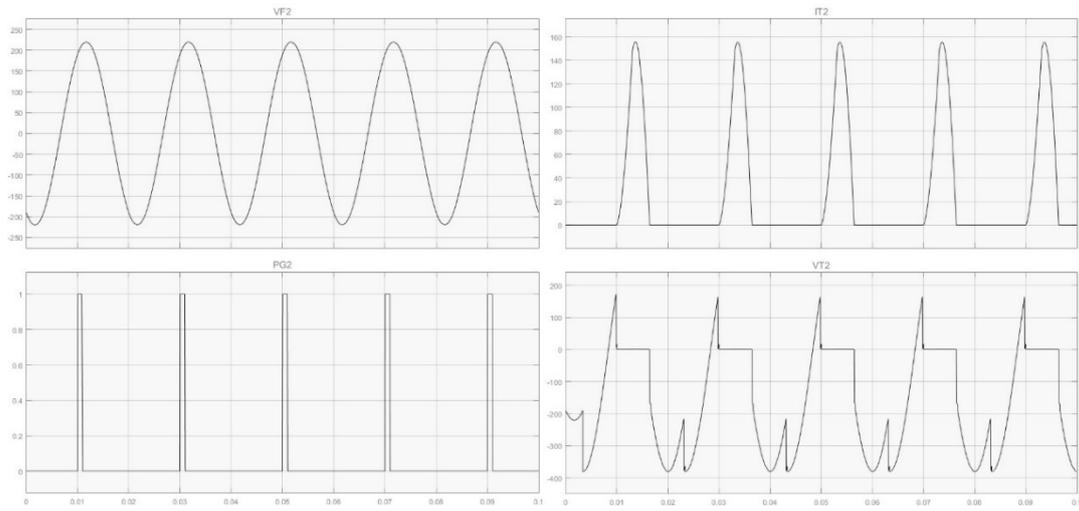


Veamos los gráficos de funcionamiento de tiristores y del rectificador.

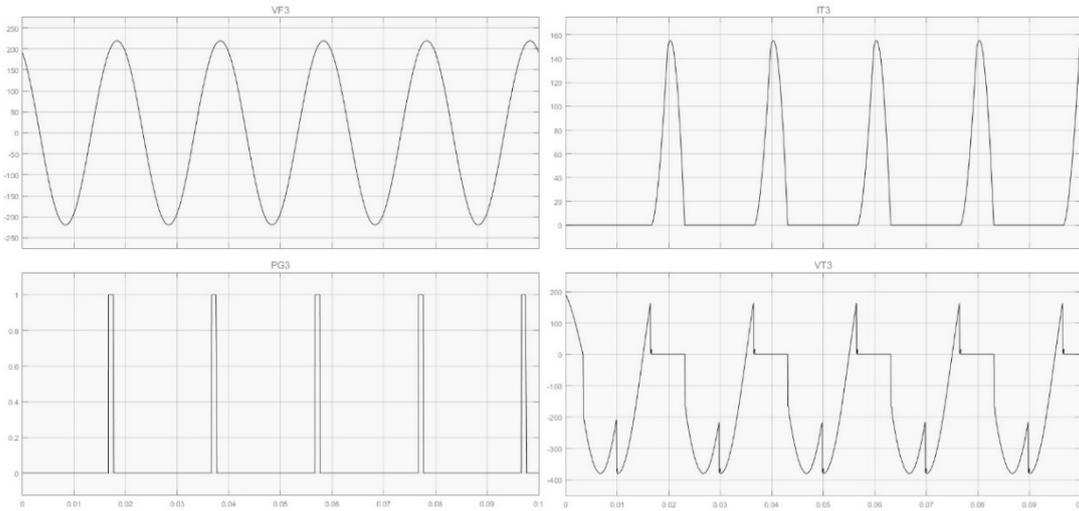
Funcionamiento Tiristor 1



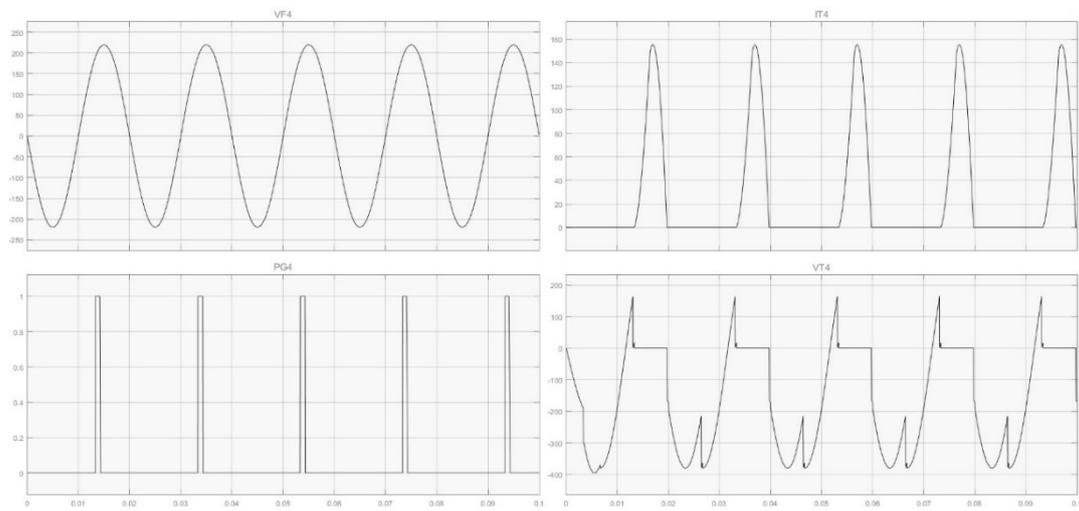
Funcionamiento Tiristor 2



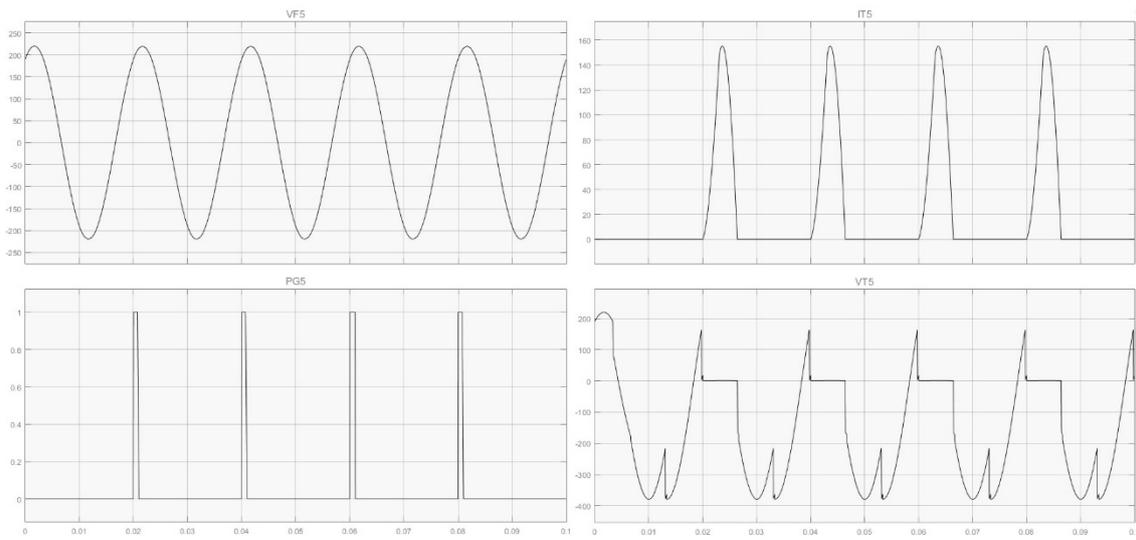
Funcionamiento Tiristor 3



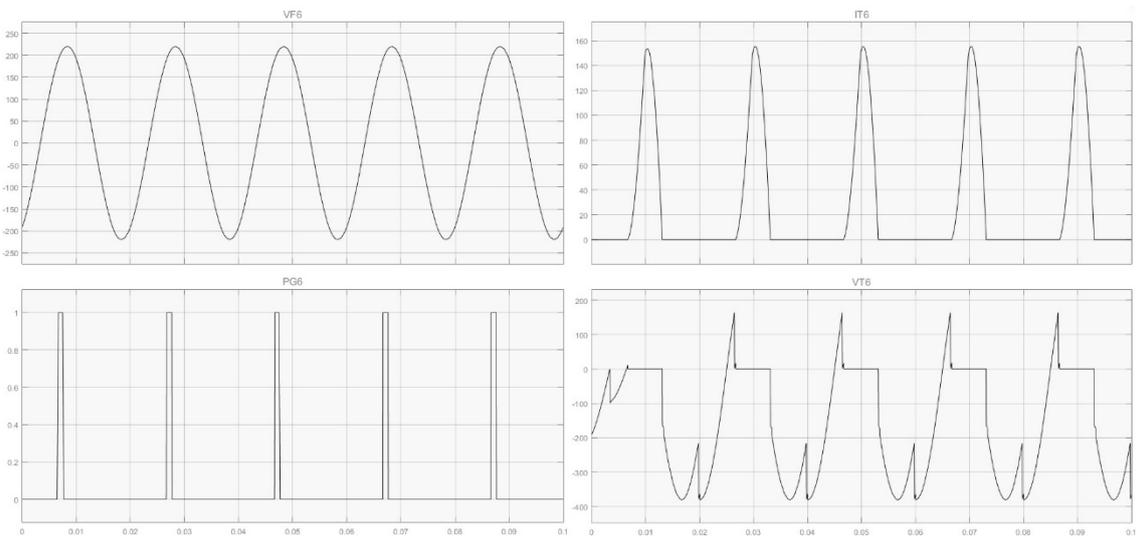
Funcionamiento Tiristor 4



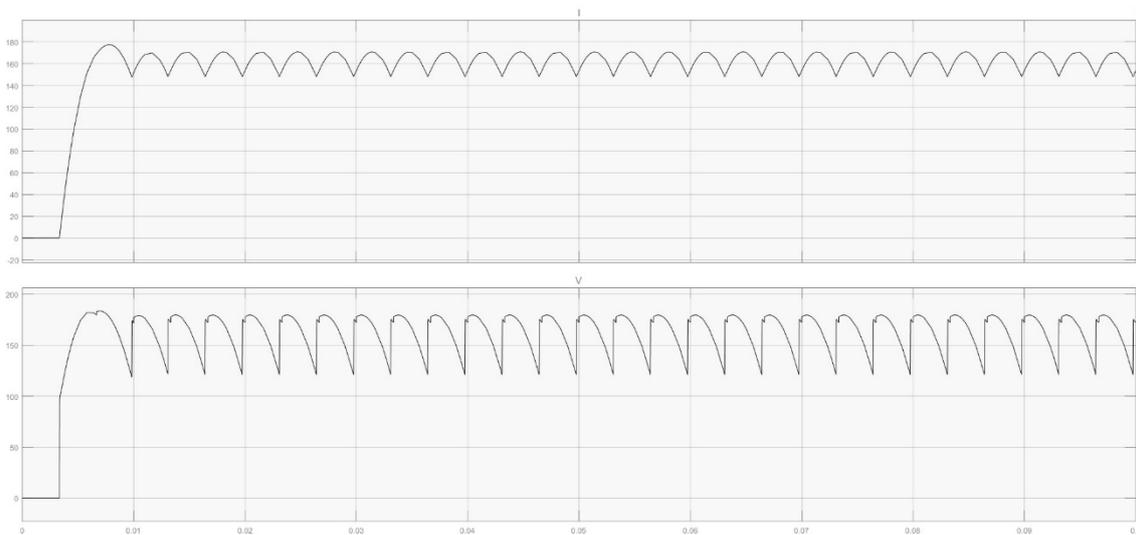
Funcionamiento Tiristor 5

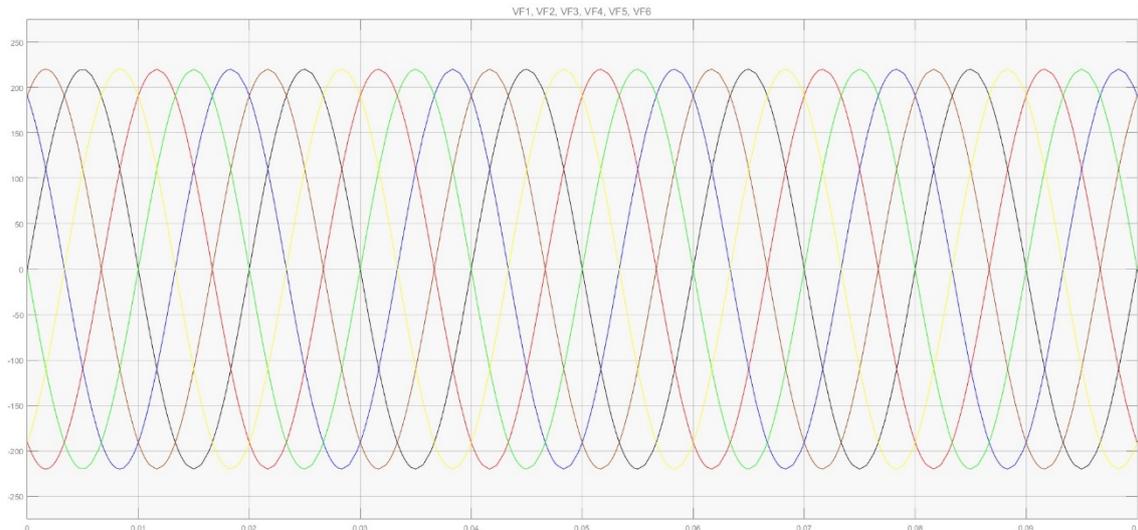


Funcionamiento Tiristor 6



Funcionamiento Rectificador



Funcionamiento Fuentes de alimentación

El funcionamiento del rectificador de doble estrella es el esperado. Tenemos dos grupos de tiristores, el de la primera estrella y el de la segunda funcionando con total normalidad acompañados por las fuentes de alimentación y las señales de disparo.

Las fuentes de alimentación de cada grupo trabajan desfasadas 120° entre sí y 180° con respecto a las del otro grupo. Esta característica se aprecia claramente en el gráfico “*Funcionamiento Fuentes de alimentación*”.

Cada tiristor trabaja con un ángulo de disparo de 60° con respecto a su fuente de alimentación de forma que los tiristores entran y salen de conducción dependiendo de sus “propias” fuentes de alimentación y de sus “propios” generadores de pulsos al igual que en los casos anteriores. Este comportamiento descrito se aprecia de forma clara en los gráficos de funcionamiento de cada tiristor donde se ve reflejada la fuente de alimentación, el momento en el que se genera el pulso que polariza en directa el tiristor y la tensión e intensidad del mismo. La polarización en directa del tiristor abarca, obviamente, desde el ángulo de disparo hasta la finalización del ciclo positivo de tensión de la fuente de alimentación.

Con respecto al funcionamiento general del modelo de doble estrella, vemos como cada tiristor conduce la sexta parte del total. Este intervalo de tiempo se corresponde con la fuente de alimentación que en ese intervalo esté aportando el valor positivo más alto.

Como ya hemos mencionado, contamos con un ángulo de desfase de 120° entre las fuentes de alimentación de un mismo grupo y 180° entre ambos grupos. Como sabemos, cada tiristor conduce la sexta parte del periodo por lo que el desfase entre el tiristor que conduce en un determinado instante, el tiristor que dejó de conducir antes y el tiristor que será el siguiente en conducir es de 60° . Esto provoca que la secuencia de conducción venga dada por el desfase existente siguiendo siempre un mismo orden. En este caso nuestro orden es el siguiente:

$$V_{F5} \rightarrow V_{F1} \rightarrow V_{F6} \rightarrow V_{F2} \rightarrow V_{F4} \rightarrow V_{F3}$$

La característica de salida de la intensidad es bastante buena y estable. Tal y como refleja el gráfico, presenta la menor ondulación vista hasta el momento. Lo mismo podemos decir de la diferencia de potencial.

En cuanto a la extinción de la corriente (aspecto tratado en los modelos anteriores), no tiene mucho sentido en este modelo. Anteriormente abordamos el estudio de los modelos y su comportamiento pero ahora tratamos la aplicación de este modelo en un caso práctico. Es decir, debe existir la corriente y debe tener un valor. Si elevamos demasiado el ángulo de disparo, llegará un momento en el que la corriente se extinga. Esta opción no se contempla ya que no tiene sentido en el caso práctico que nos ocupa.

Capítulo 8

Regulación de corriente

Capítulo 8

REGULACIÓN DE CORRIENTE

8.1. INTRODUCCIÓN

Una vez estudiado el modelo de rectificador de doble estrella con bobina de absorción, el siguiente paso es su puesta en marcha mediante la aplicación en el proceso que nos ocupa, la electrólisis.

Durante el proceso de electrólisis, el rectificador deberá hacer frente a las demandas de corriente que surjan durante el mismo. Así, será necesaria la adecuación del rectificador en cada instante para poder satisfacer las necesidades del proceso en tiempo real. Esto será factible mediante la introducción de un sistema de control que lleve a cabo la modificación de parámetros óptima en cada momento.

Por tanto, el siguiente paso es el estudio de un sistema de control que permita satisfacer las necesidades del proceso adecuando el rectificador a su funcionamiento más eficiente.

8.2. SISTEMA DE CONTROL

¿Qué es un sistema de control? Para entender este concepto pongamos un ejemplo.

La temperatura del cuerpo humano es aproximadamente constante (en una persona sana, que no esté enferma) independientemente de la temperatura exterior, es decir, tanto si hace frío como si hace calor. Para poder mantener dicha temperatura constante, el cuerpo cuenta con un sistema de control de temperatura. Si la temperatura sobrepasa los “límites establecidos”, el cuerpo se encarga de que vuelva a la normalidad. El sistema de control recibe una entrada enviada por unos sensores que le indican cual es la temperatura para poder compararla con el valor que debe tener. Acto seguido, se produce la respuesta para lograr el equilibrio.

En este caso se trata de un sistema de control por retroalimentación ya que las señales de salida regresan como entrada con el fin de obtener la respuesta que queremos. Estos sistemas de control están presentes hoy día en infinidad de aplicaciones.

Existen básicamente dos tipos de sistema de control: el de lazo abierto y el de lazo cerrado.

- El sistema de control en lazo abierto es aquel en el que se ajusta la señal de entrada con unos valores, se realiza el proceso y se obtiene la señal de salida con otros valores.

No es, obviamente, el control que nosotros buscamos ya que en nuestro caso debemos tener en cuenta los parámetros de salida para que tengan el valor que se ajusta a nuestras necesidades.

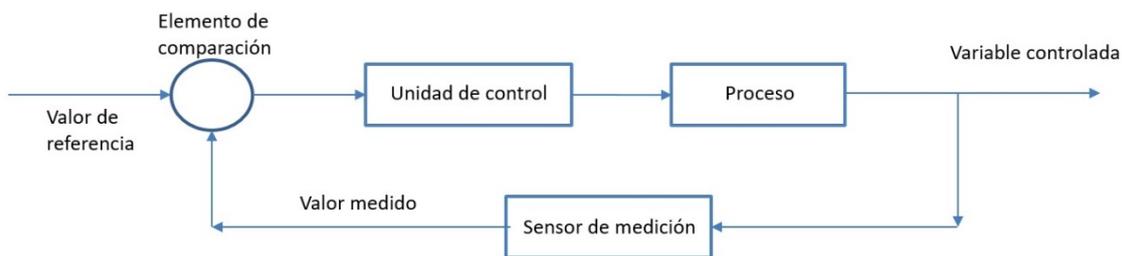
- El sistema de control en lazo cerrado. En este caso se tienen en cuenta los valores de la señal de salida con el objetivo de definir los de la señal de entrada. Estamos ante un control con realimentación. Es decir, nuestro objetivo es que la señal de salida tenga un valor determinado para lo cual estudiamos sus datos y actuamos sobre la señal de entrada para que, una vez realizado el proceso, la señal de salida sea lo más parecido a lo que buscamos.

Este tipo de control se basa en la comparación de la señal de salida real con la señal de salida que queremos obtener.

El sistema de control que nosotros buscamos sería algo parecido a este sistema, el de control en lazo cerrado.

8.2.1. Sistema de control en lazo cerrado.

Una posible configuración general de un sistema de control en lazo cerrado se muestra en la siguiente imagen.



Como vemos, consta de los siguientes elementos:

- Elemento de comparación. Es el encargado de comparar el valor medido de la señal de salida con el valor que nosotros queremos que tenga dicha señal.
- Elemento de control. Su función es la de ejecutar la orden con la información que viene del elemento de comparación.
- Sensor de medición. Se encarga de recopilar la información de la señal de salida.

Capítulo 9

Aplicación práctica del sistema de control

Capítulo 9

APLICACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA DE CONTROL

Anteriormente llevamos a cabo el estudio del modelo de rectificador de doble estrella con bobina de absorción utilizando los siguientes parámetros:

- Diferencia de potencial de las fuentes de alimentación: 220V.
- Resistencia de la carga: 1Ω .
- Inductancia de la carga y de la bobina de absorción: 1mH.
- Ángulo de disparo: 60° .

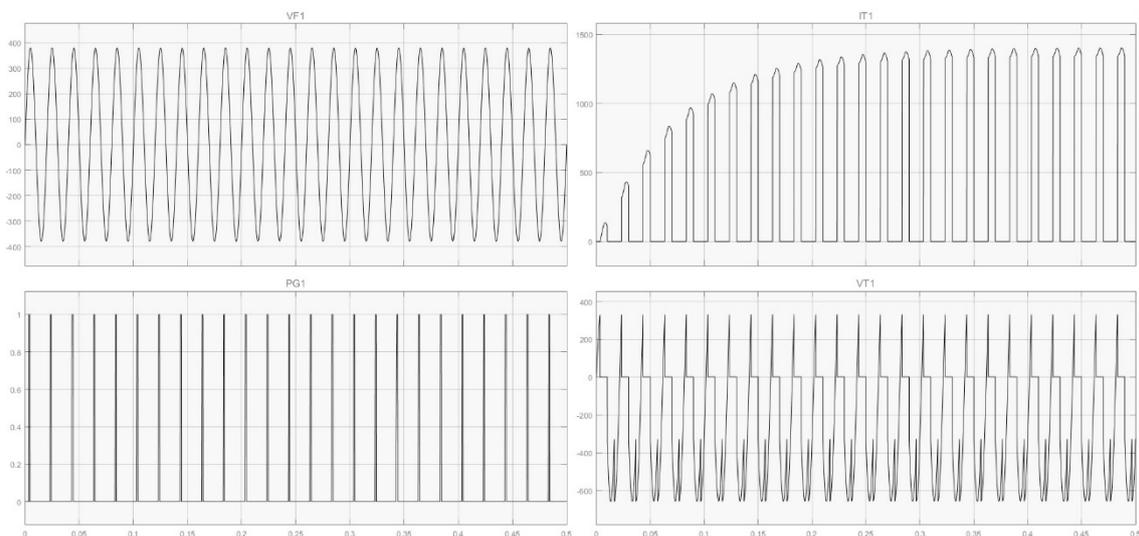
9.1. SITUACIÓN DE PARTIDA

Para tratar de entender cómo va a trabajar nuestro rectificador con la inclusión del sistema de control a efectos prácticos, partiremos con los siguientes valores para nuestros parámetros:

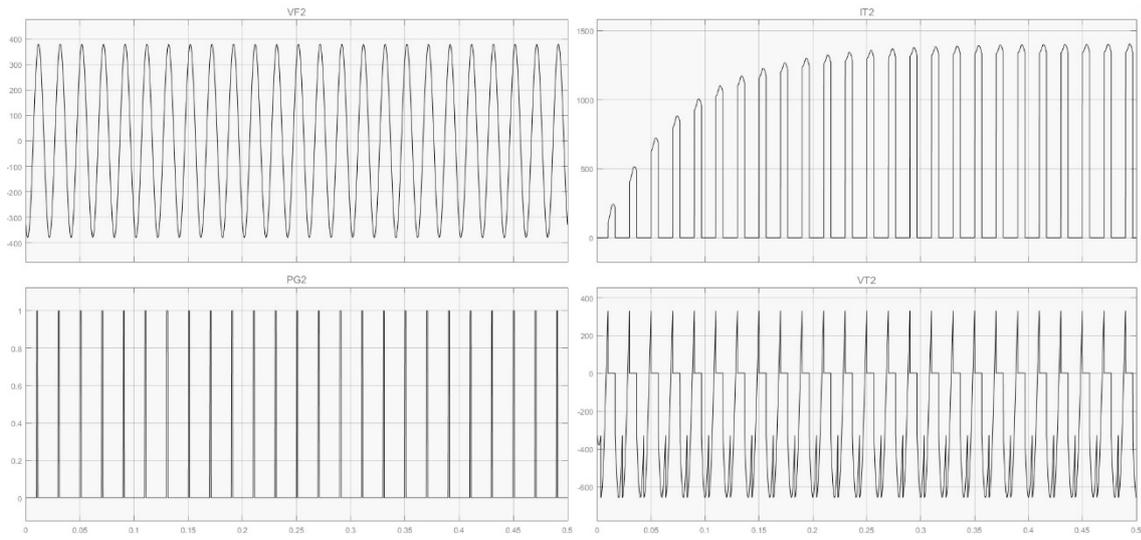
- Diferencia de potencial de las fuentes de alimentación: 380V.
- Resistencia de la carga: 0.1Ω .
- Inductancia de la carga y de la bobina de absorción: 5mH.
- Ángulo de disparo: 60° .

Veamos el funcionamiento de nuestro rectificador con estos nuevos valores:

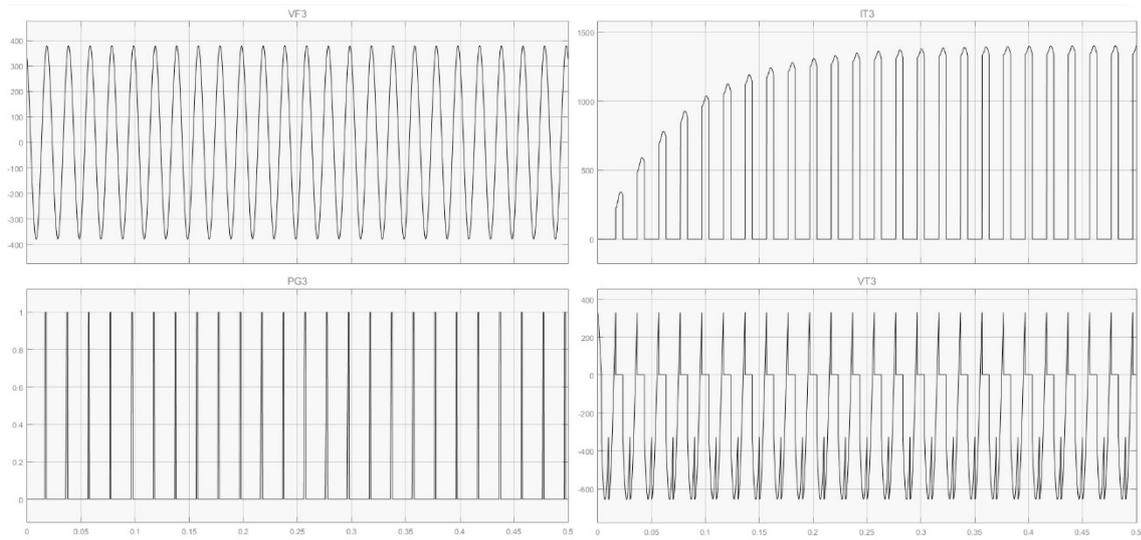
Funcionamiento Tiristor



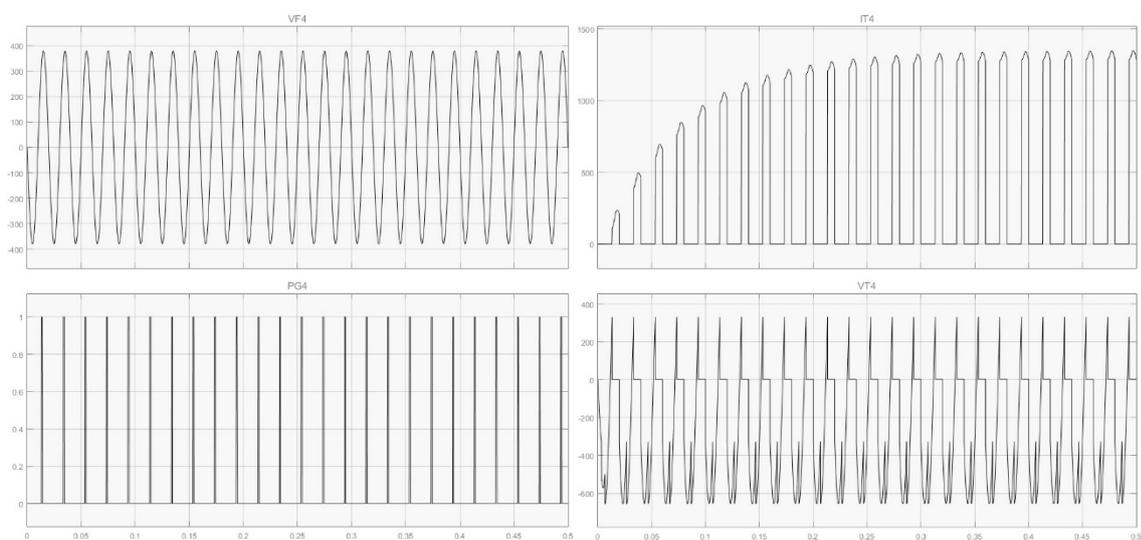
Funcionamiento Tiristor 2



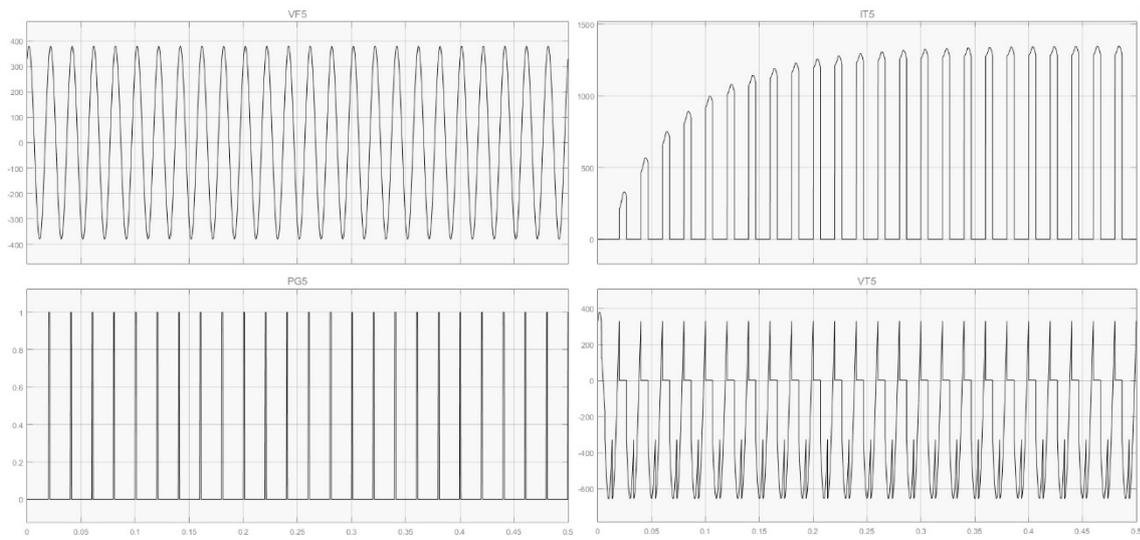
Funcionamiento Tiristor 3



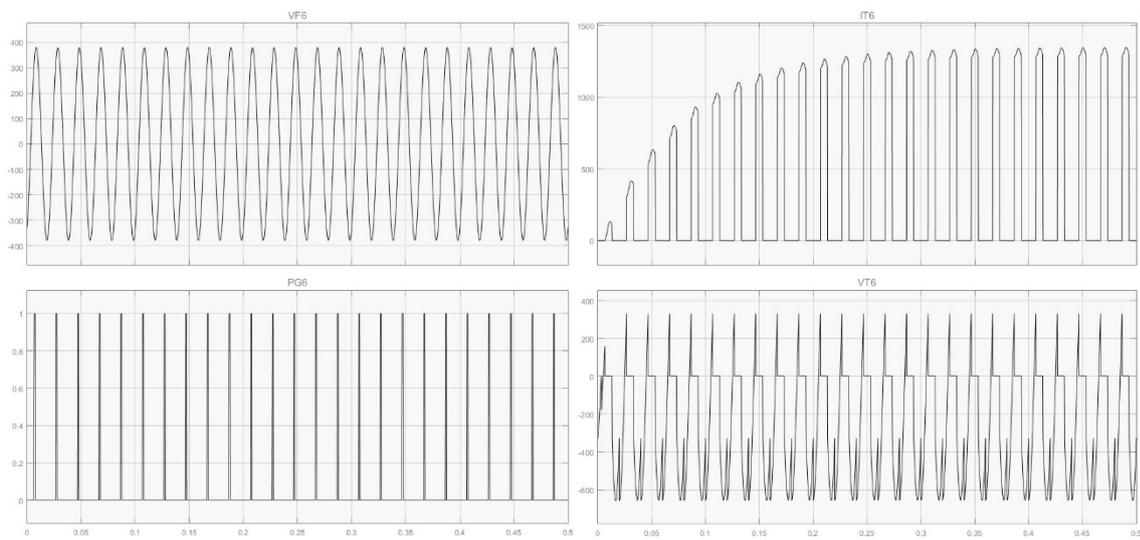
Funcionamiento Tiristor 4



Funcionamiento Tiristor 5

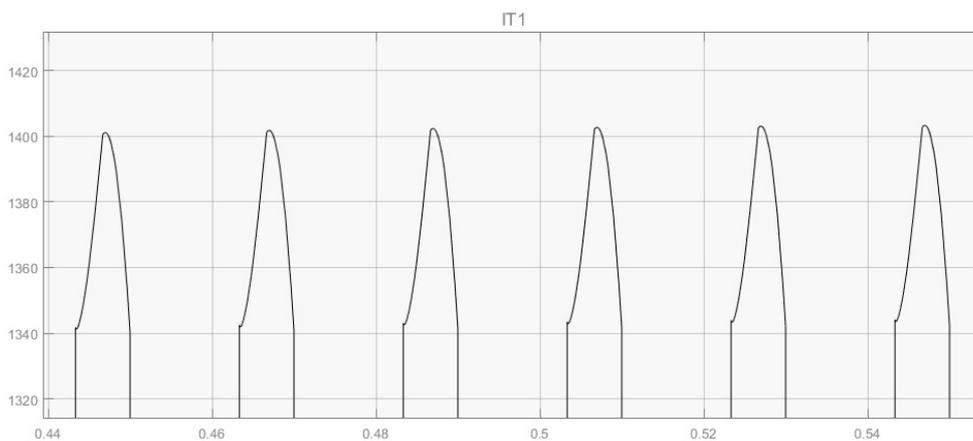


Funcionamiento Tiristor 6



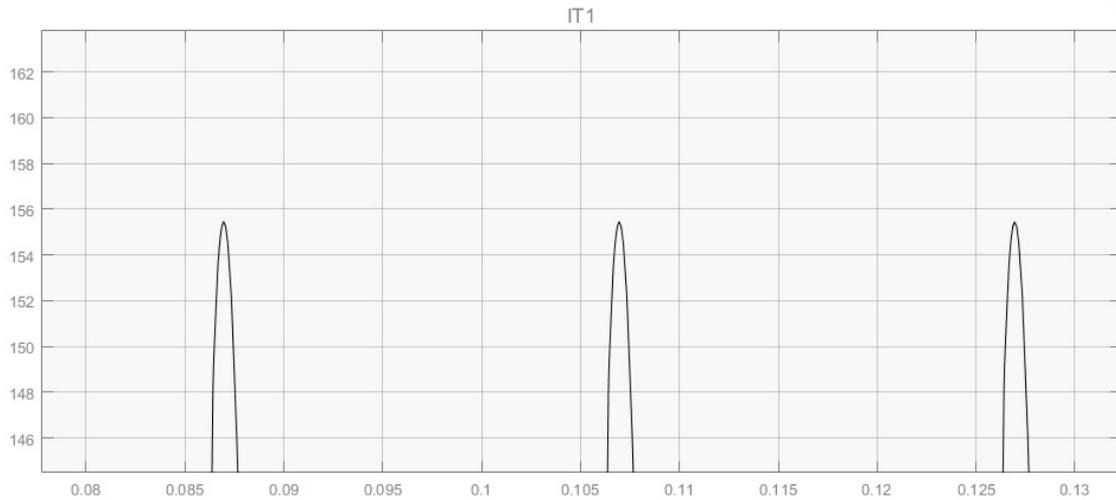
En primer lugar, vemos como el funcionamiento de los tiristores, su polarización, su entrada y salida de conducción es el esperado.

La corriente eléctrica que circula por ellos alcanza la estabilidad en torno al segundo 0.5.



Como vemos, el valor pico de la intensidad se mantiene en el intervalo aproximado 1.340 – 1.410 A.

Si nos fijamos en el anterior caso estudiado (con sus valores ya indicados al comienzo de este capítulo), vemos como la intensidad es estable desde el primer momento.



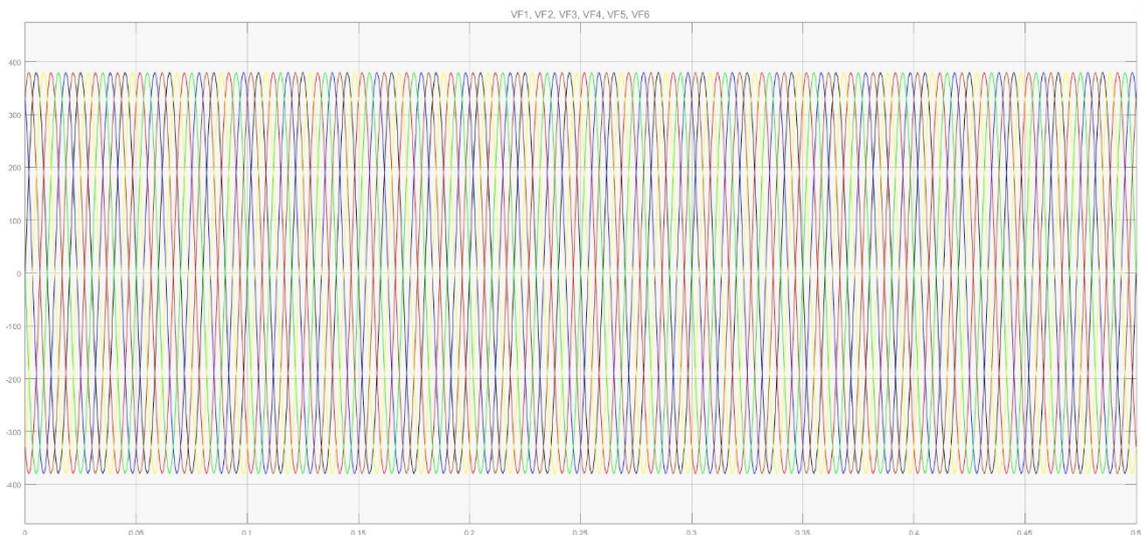
La intensidad alcanza su pico en torno a 154 – 156 A. Es evidente el muy notable aumento de la intensidad.

Este aumento de la intensidad es debido en gran parte al proceso que va a tener nuestro rectificador como aplicación práctica ya que en caso de necesitar valores altos de corriente, podemos adecuar los parámetros para conseguirlos.

Con respecto a la forma de onda de la tensión de los tiristores, es la misma, como cabía esperar, teniendo en cuenta el incremento de valores debido a las fuentes de alimentación.

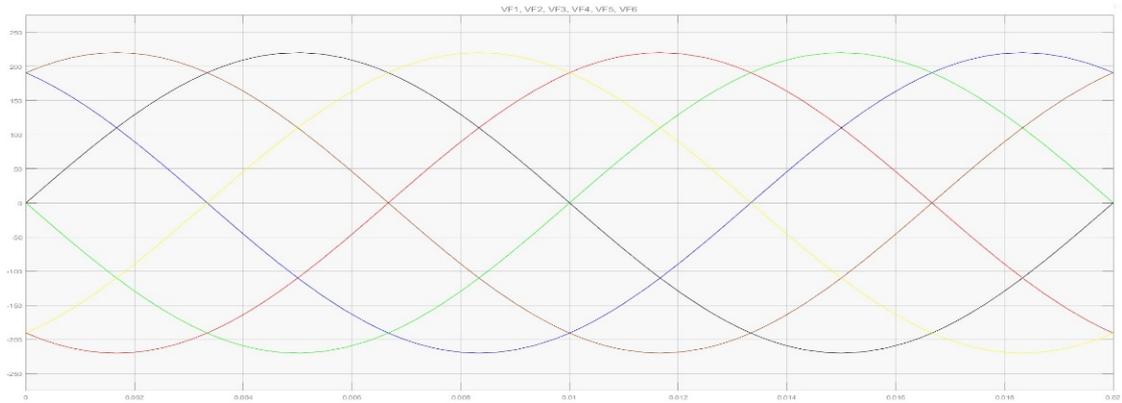
Otra diferencia significativa entre ambos casos es la necesidad de un intervalo de tiempo para posibilitar que la intensidad alcance el estado estacionario.

Funcionamiento Fuentes de Alimentación

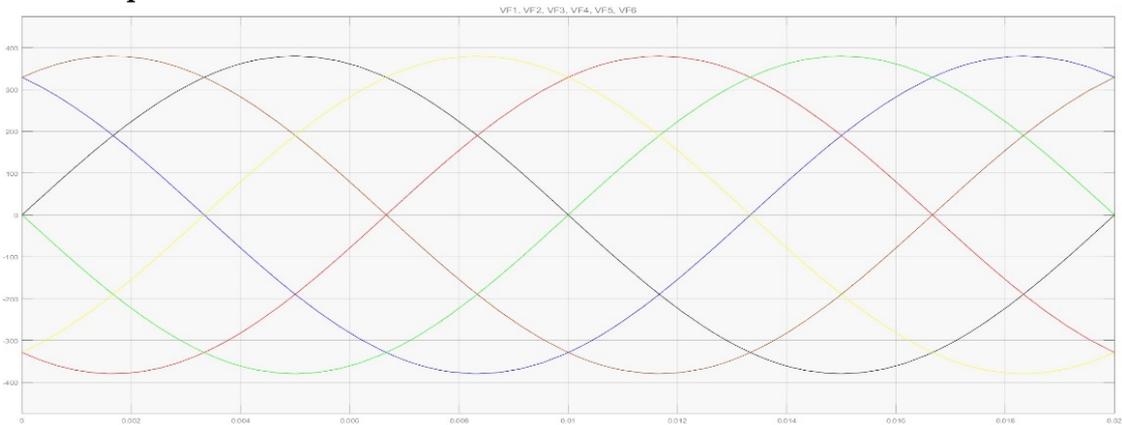


Con respecto a las fuentes de alimentación no parece necesario detallar su funcionamiento en exceso ya que tenemos la misma forma de onda con distintos valores:

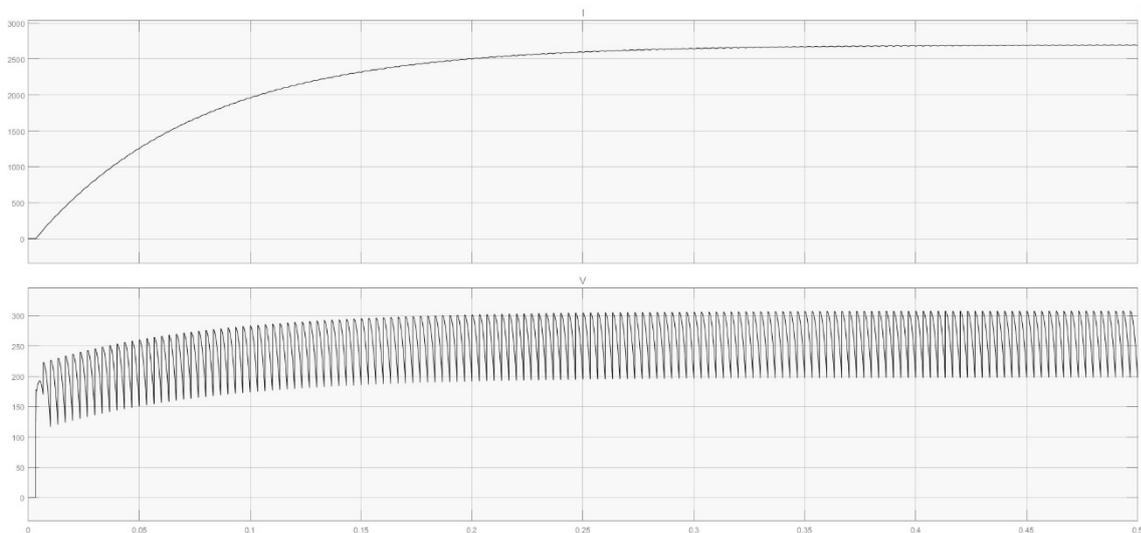
Caso estudiado 220 V



Situación de partida 380 V

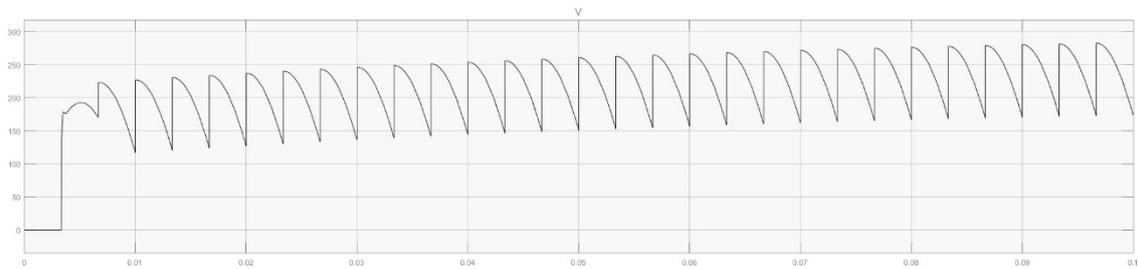


Funcionamiento General

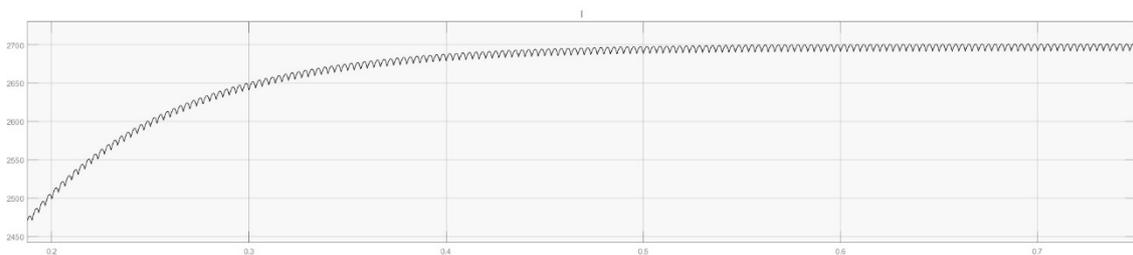


Graduamos la escala para apreciar mejor la forma de onda de tensión e intensidad:

- Tensión rectificador.



- Intensidad rectificador.



Ambos gráficos están escalados individualmente.

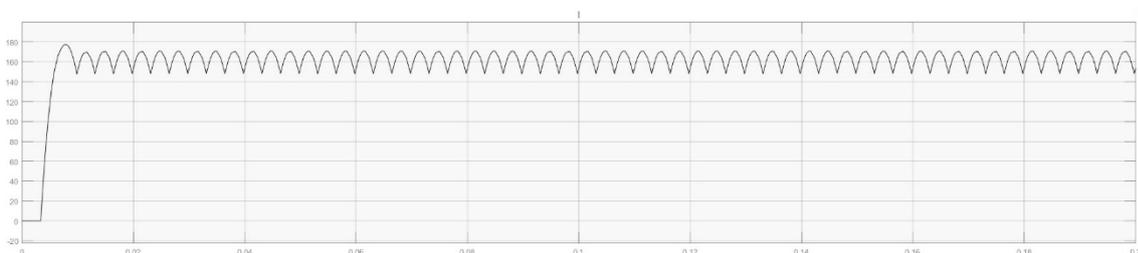
El funcionamiento en conjunto del rectificador es el ya explicado en el caso estudiado anteriormente.

Como se observa en el gráfico la intensidad necesita un cierto intervalo de tiempo para alcanzar el estado estacionario. Este aspecto difiere del caso anterior ya que en éste el estado estacionario era alcanzado directamente al comienzo.

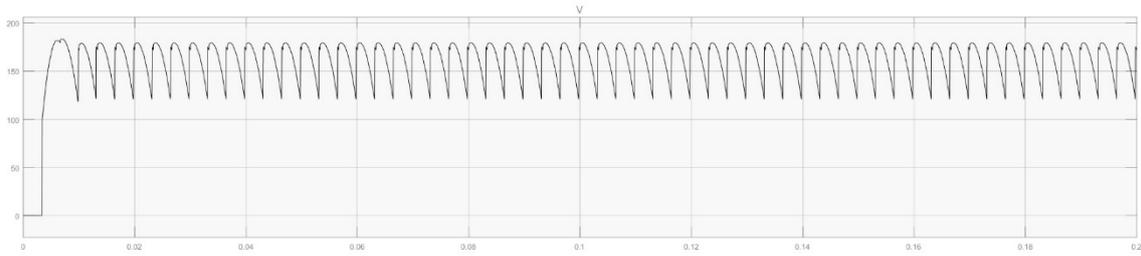
La tensión que tenemos en la carga sigue el mismo patrón, no se hace estacionaria hasta transcurrido un intervalo de tiempo.

Comparando el estado estacionario de ambos se hace evidente la diferencia de magnitud en los valores de los resultados obtenidos:

Caso estudiado

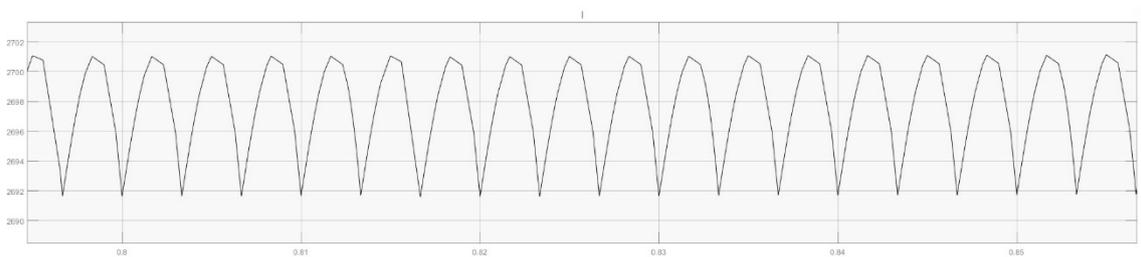


La intensidad se sitúa en torno a los 160 A en estado estacionario.

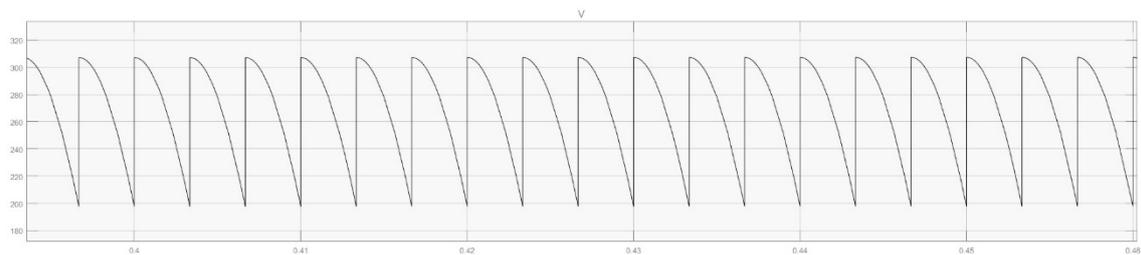


La tensión tiene un valor medio en torno a los 150 V.

Situación de partida



La intensidad se sitúa en torno a los 2700 A en estado estacionario.

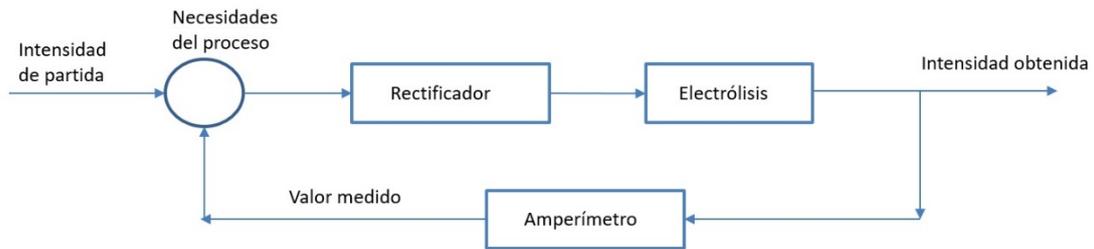


La diferencia de potencial oscila entre 190 y 310 V. Podríamos decir que su valor medio se sitúa aproximadamente en 260V.

Como vemos, ambas características de salida han sufrido un incremento, el cual es mucho más considerable, lógicamente, en el caso de la intensidad.

9.2. SISTEMA DE CONTROL

En el supuesto caso de que nuestro proceso necesitara una intensidad mayor, el sistema de control deberá detectarlo y “comunicárselo” al rectificador para que éste la proporcione. En líneas generales el sistema de control que nuestro proceso requiere se representa mediante el siguiente diagrama:

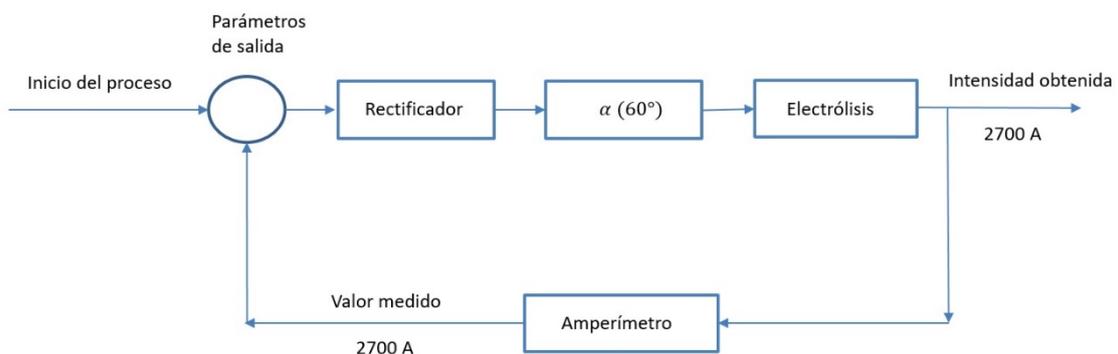


Contamos con unos parámetros de salida definidos en la situación de partida.

El rectificador realiza su trabajo y se lleva a cabo el proceso, la electrólisis. Gracias a un amperímetro identificamos la corriente que está circulando y detectamos si es la necesaria, o si por el contrario se necesita una intensidad mayor o menor.

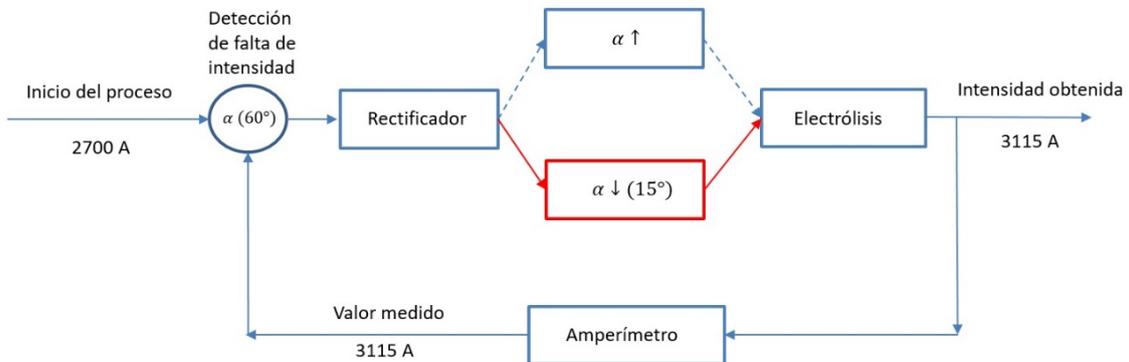
En caso de ser así, actuamos sobre el rectificador y éste nos proporciona el valor que estamos buscando.

De este modo, tendríamos un diagrama a efectos prácticos que sería el siguiente:



9.3. SITUACIÓN DE GANANCIA

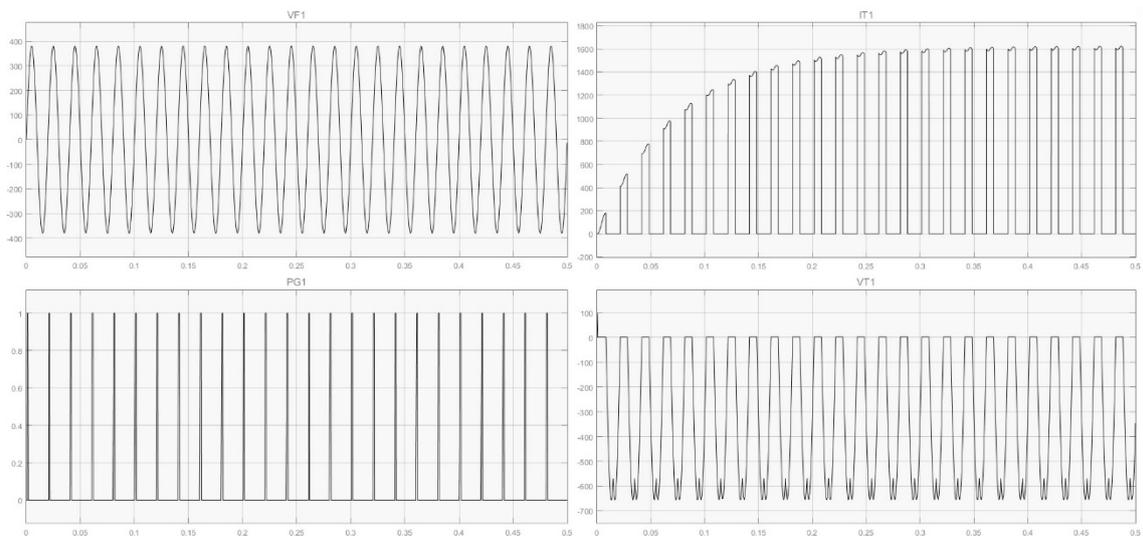
Supongamos ahora que el proceso requiere más intensidad:



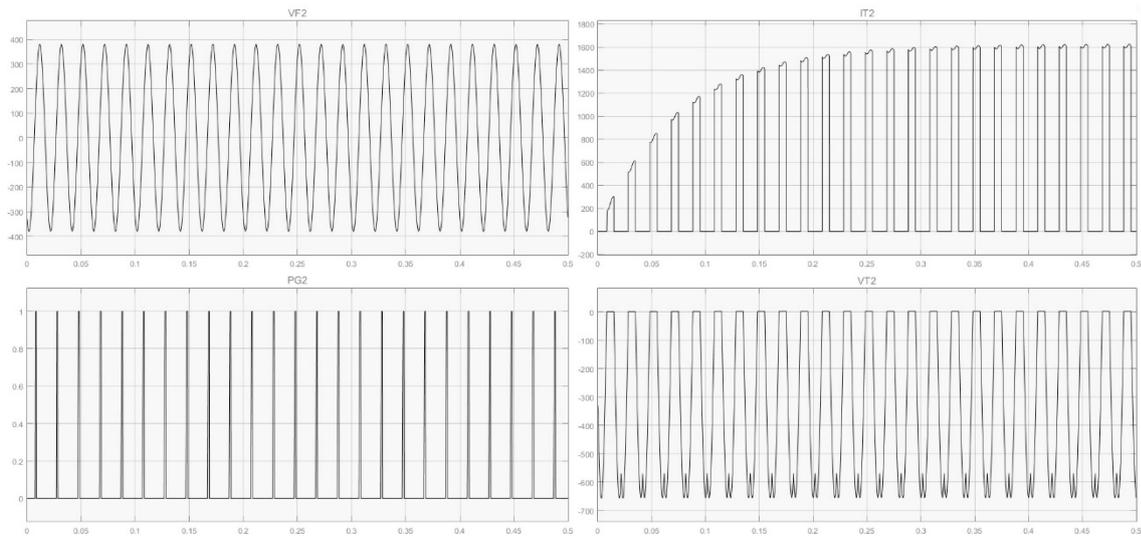
Veamos el funcionamiento del rectificador con los nuevos parámetros. Recordemos que en este caso únicamente vamos a incidir en el ángulo de disparo.

- Diferencia de potencial de las fuentes de alimentación: 380V.
- Resistencia de la carga: 0.1Ω .
- Inductancia de la carga y de la bobina de absorción: 5mH.
- Ángulo de disparo: 15° .

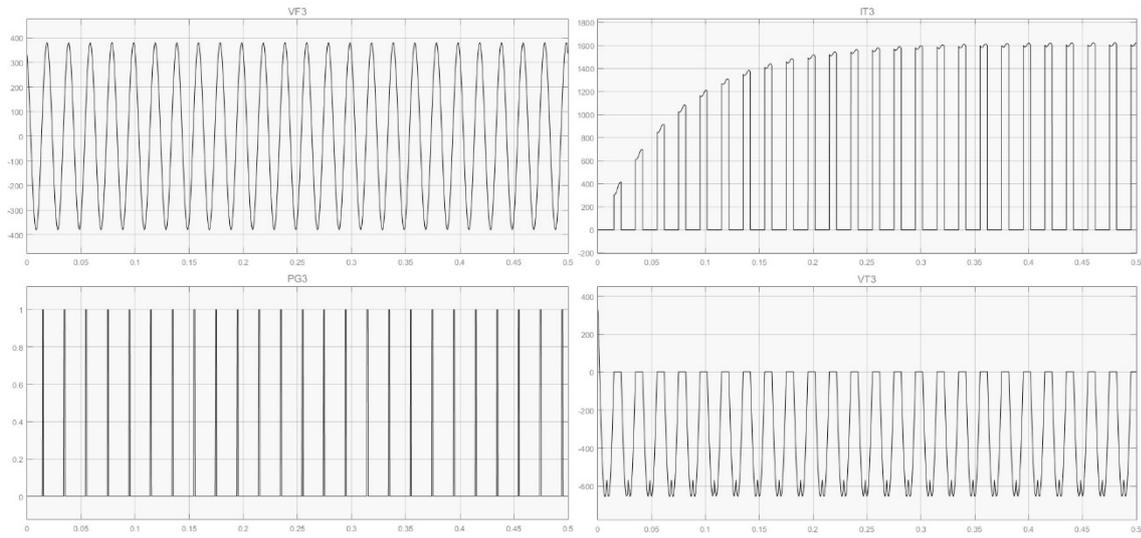
Funcionamiento Tiristor 1



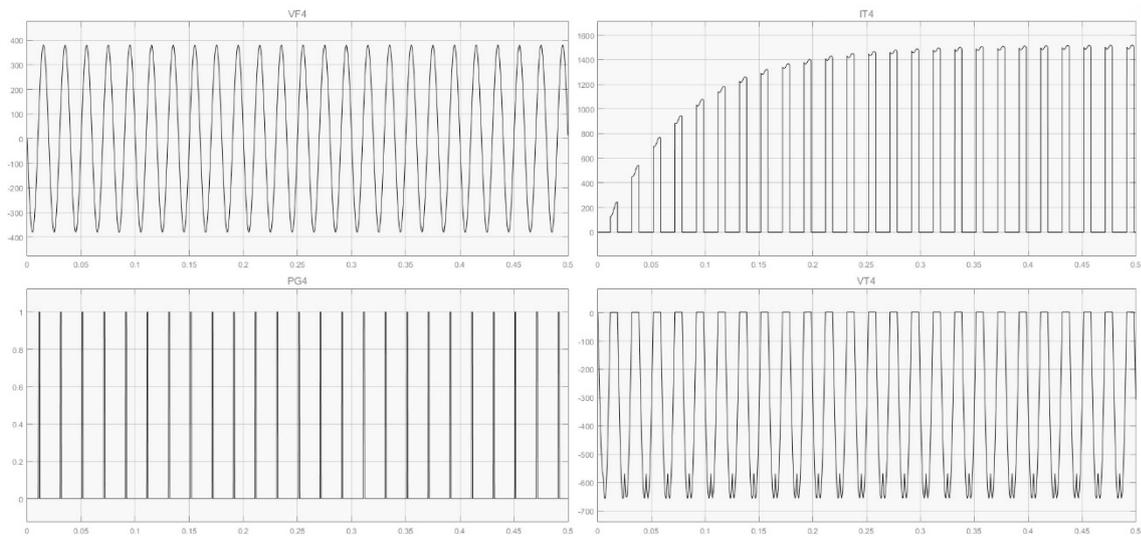
Funcionamiento Tiristor 2



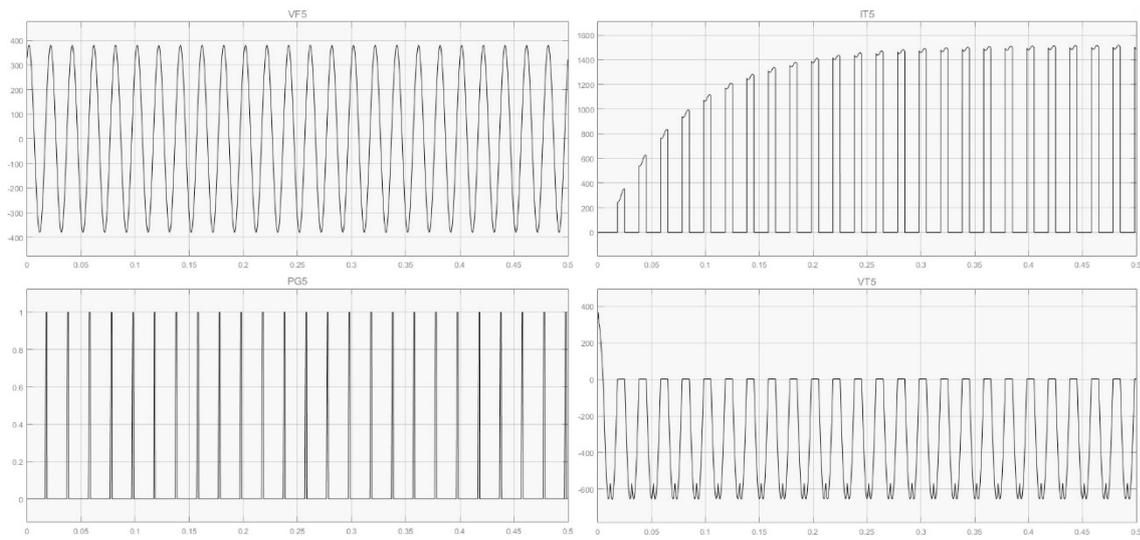
Funcionamiento Tiristor 3



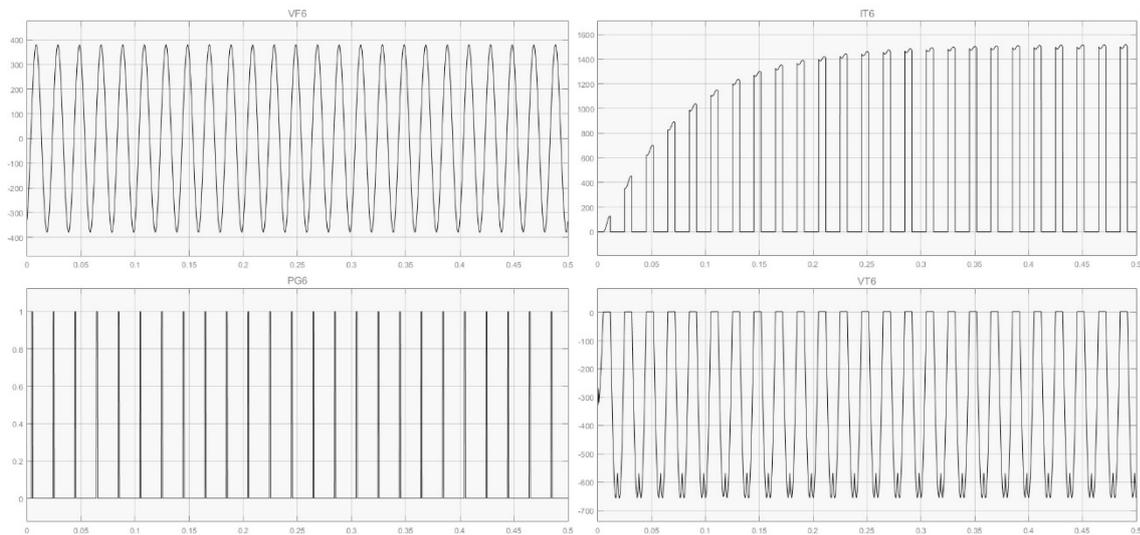
Funcionamiento Tiristor 4



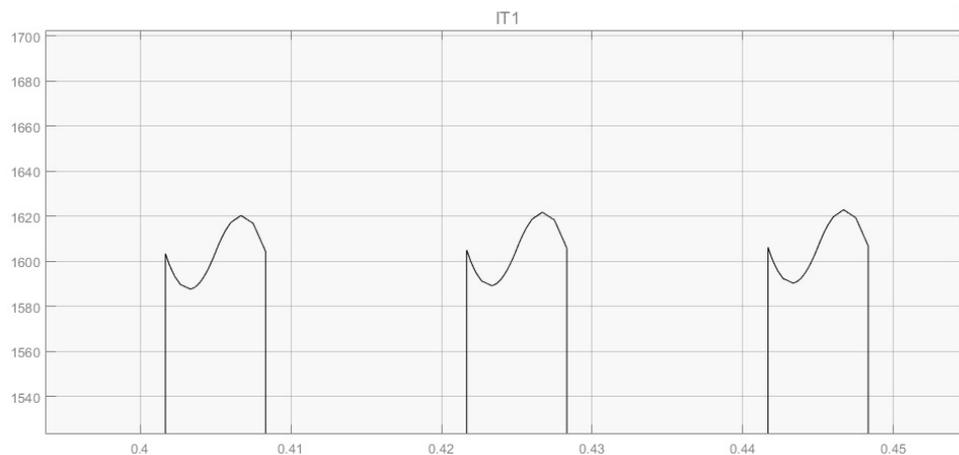
Funcionamiento Tiristor 5



Funcionamiento Tiristor 6

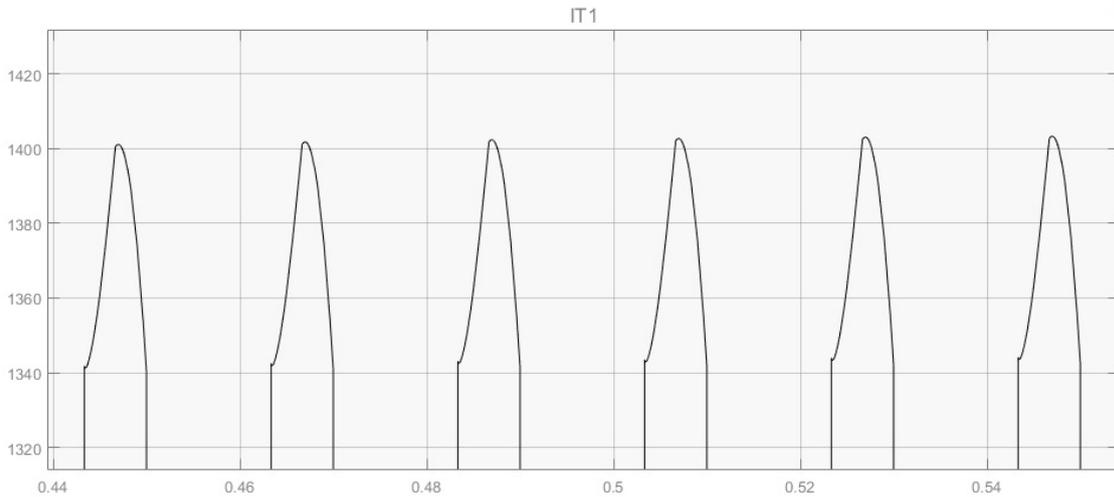


Vemos como las formas de onda de los diferentes parámetros que definen al tiristor son similares a la situación de partida. En este caso, la corriente eléctrica que circula por ellos alcanza el estado estacionario en torno al segundo 0.4.



Los valores que toma la intensidad en el estado estacionario a lo largo del tiempo se sitúan en el intervalo aproximado 1.580 – 1.640 A.

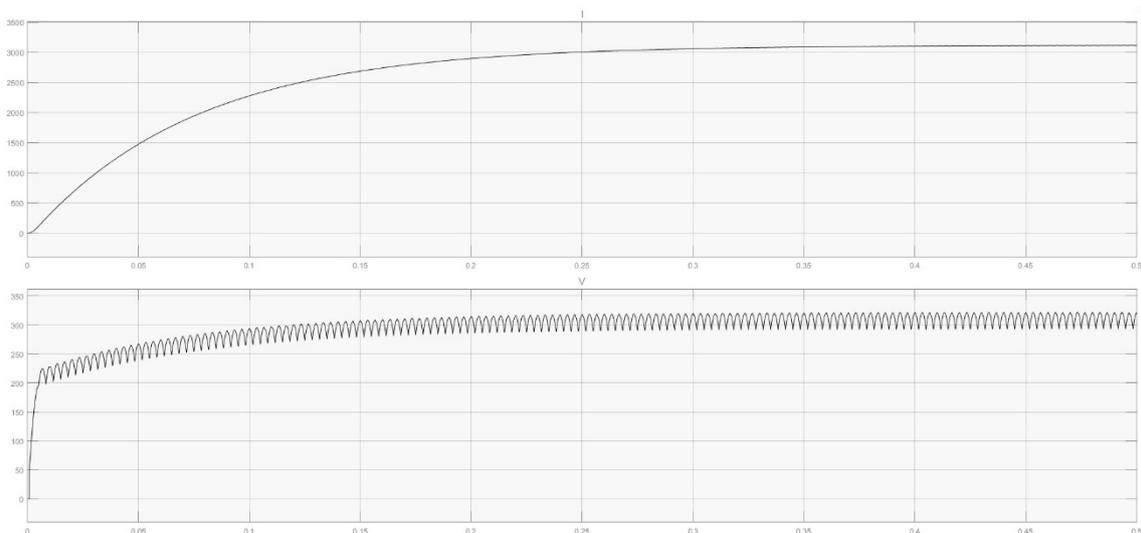
Gracias a estos datos podemos comprobar que la intensidad alcanza ahora el estado estacionario una décima de segundo antes que en la situación de partida, recordamos que en ese caso se necesitaban 0.5s.



Además, teníamos un valor de intensidad situado en el intervalo 1.340 – 1.410 A, lo que significan unos 240A de ganancia.

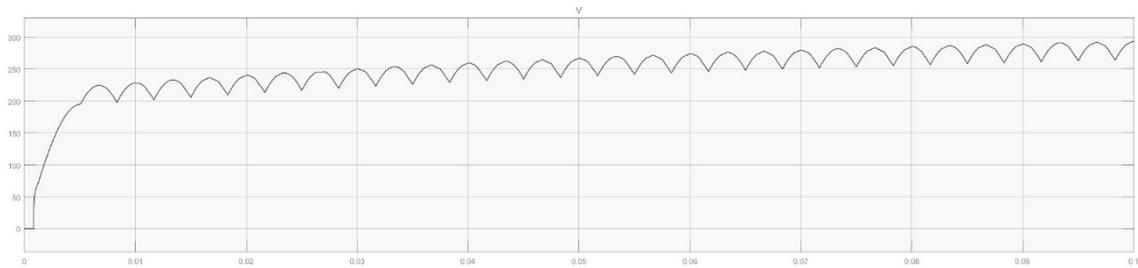
Podemos concluir, por tanto, con respecto a los parámetros que gobiernan los tiristores, que disponemos de un mayor valor de intensidad y un tiempo menor para alcanzar el estado estacionario de la misma.

Funcionamiento General

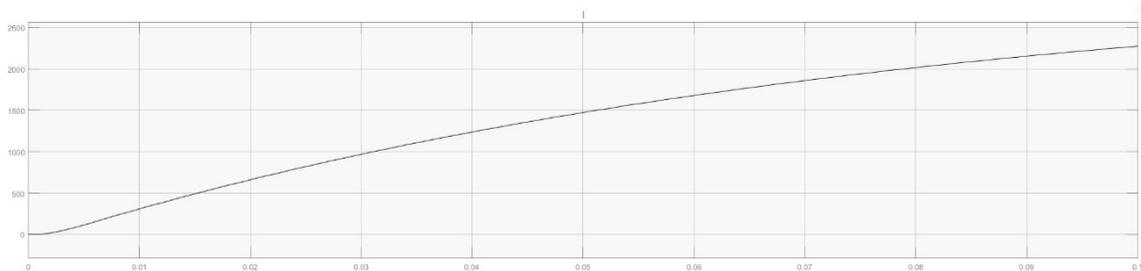


Debido a los valores con los que estamos trabajando, se hace necesario graduar la escala de ambas magnitudes (tanto tensión como intensidad) para poder apreciar la forma de onda que tienen.

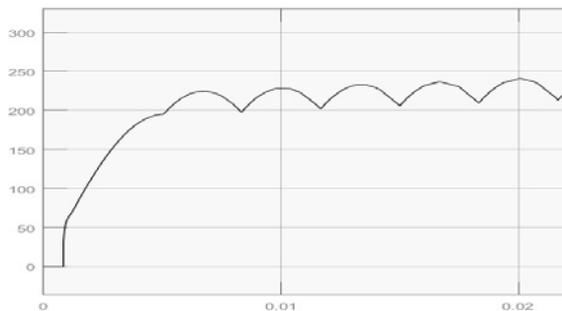
- Tensión rectificador



- Intensidad rectificador



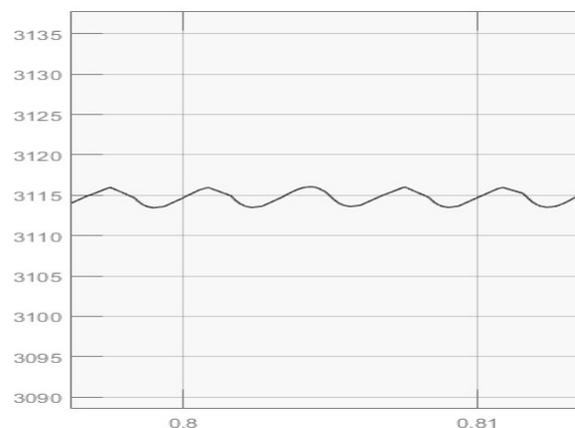
Ambos gráficos están escalados individualmente.



En el caso de la tensión del rectificador, como vemos, no se hace necesario llevar a cabo una gran ampliación ya que su forma de onda se aprecia perfectamente.

Sin embargo, la intensidad tiene aparentemente una forma de onda con escaso rizado y es necesario llevar a cabo un escalado mucho más exhaustivo para poder apreciar su forma de onda.

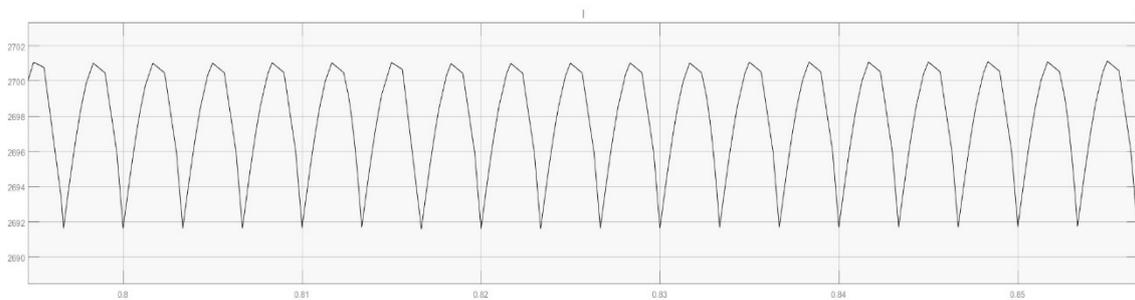
En el gráfico se observa claramente el valor que toma la intensidad en estado estacionario así como el intervalo de tiempo en el que nos situamos. Esto nos da una idea de la magnitud de la ampliación que es necesaria para poder apreciar su forma de onda.



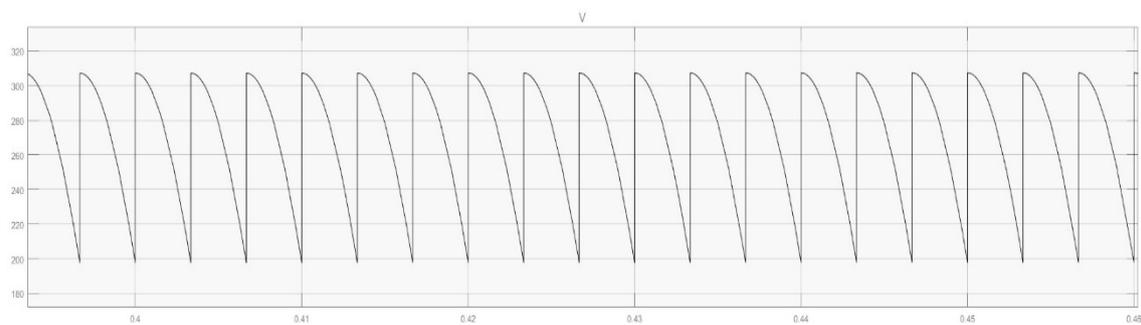
Con respecto al comportamiento del rectificador en líneas generales, es similar al que teníamos en la situación de partida con las diferencias de los estados estacionarios y sus valores.

Veamos la comparación entre la situación de partida y la situación actual (situación de ganancia).

Situación de partida (ya estudiada, sus valores son los siguientes)

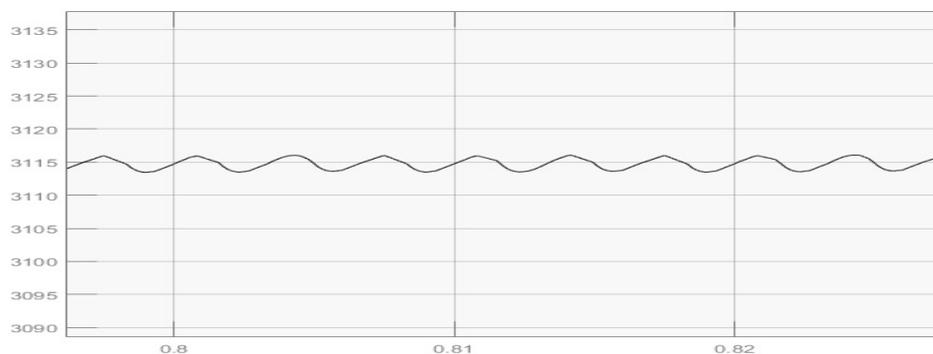


La intensidad se sitúa en torno a los 2700 A en estado estacionario.

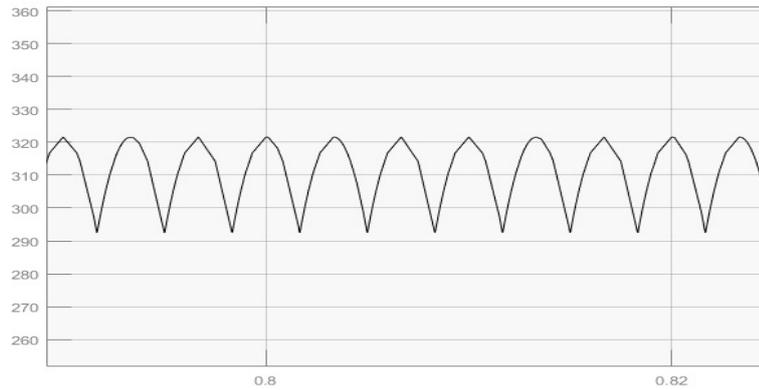


La diferencia de potencial oscila entre 190 y 310 V. Su valor medio se sitúa aproximadamente en 260V.

Situación actual



La intensidad tiene un valor aproximado de 3.115A en estado estacionario.



La diferencia de potencial oscila entre 290V y 330V. Su valor medio ronda los 305V.

Como vemos, los resultados obtenidos en la “*Situación de ganancia*” son los esperados, siendo mayores que los de la “*Situación de partida*”:

- Con respecto a la intensidad, hemos pasado de 2.700A a 3.115A.
- Con respecto a la tensión, también ha sufrido un incremento pasando de 260V a 305V.

Podemos concluir que hemos conseguido nuestro objetivo. Las necesidades del proceso requerían un incremento de corriente eléctrica y, gracias a la modificación de los parámetros del rectificador, ese aumento ha sido posible.

9.4. SITUACIÓN DE PÉRDIDA

Hemos visto como obtener un mayor valor de intensidad en caso de ser necesario.

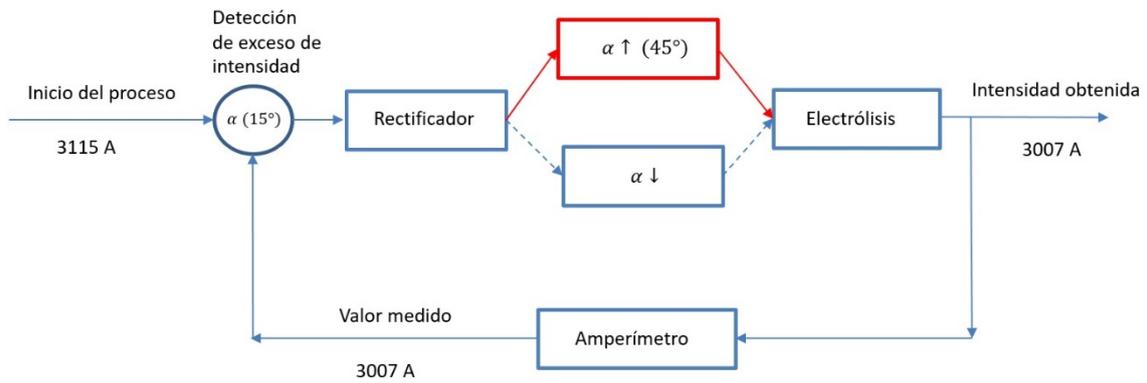
Supongamos ahora que la intensidad ha aumentado demasiado y nuestro proceso requiere un menor valor para que la eficiencia del mismo sea la más alta posible. En este caso debemos realizar una bajada de intensidad.

Debemos tener en cuenta que para una señal de disparo de 60° nuestro proceso sufría una escasez de corriente eléctrica y para una señal de disparo de 15° obteníamos un valor de intensidad demasiado elevado. Por tanto, una señal de disparo contenida entre ambos valores será aquella que nos haga obtener el mayor rendimiento posible.

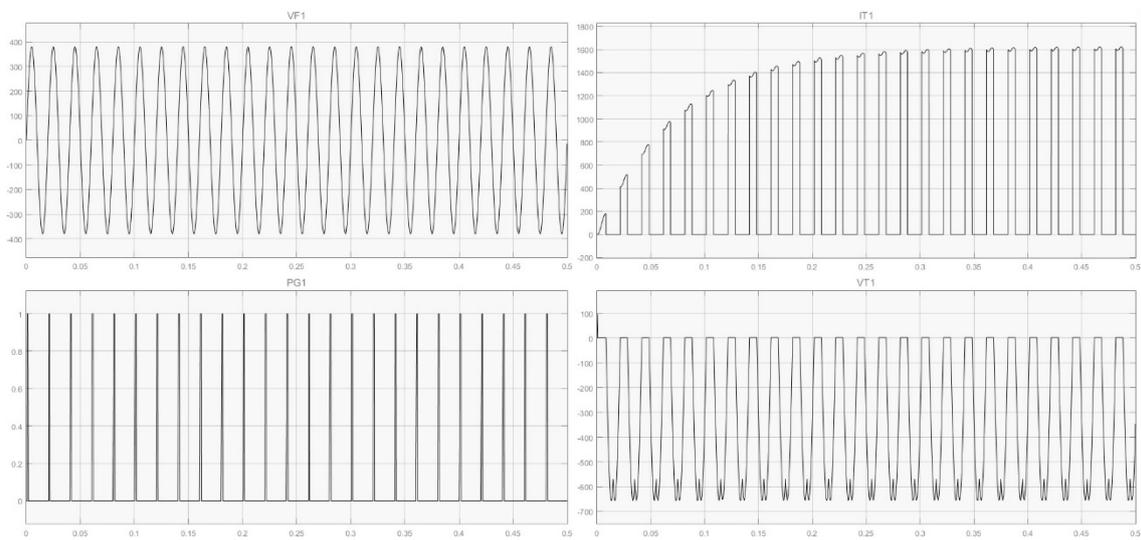
Como hemos hecho hasta ahora, estudiaremos el funcionamiento del rectificador con los nuevos ajustes. Tal y como hicimos en el caso anterior, solo modificaremos la señal de disparo.

- Diferencia de potencial de las fuentes de alimentación: 380V.
- Resistencia de la carga: 0.1Ω .
- Inductancia de la carga y de la bobina de absorción: 5mH.
- Ángulo de disparo: 45° .

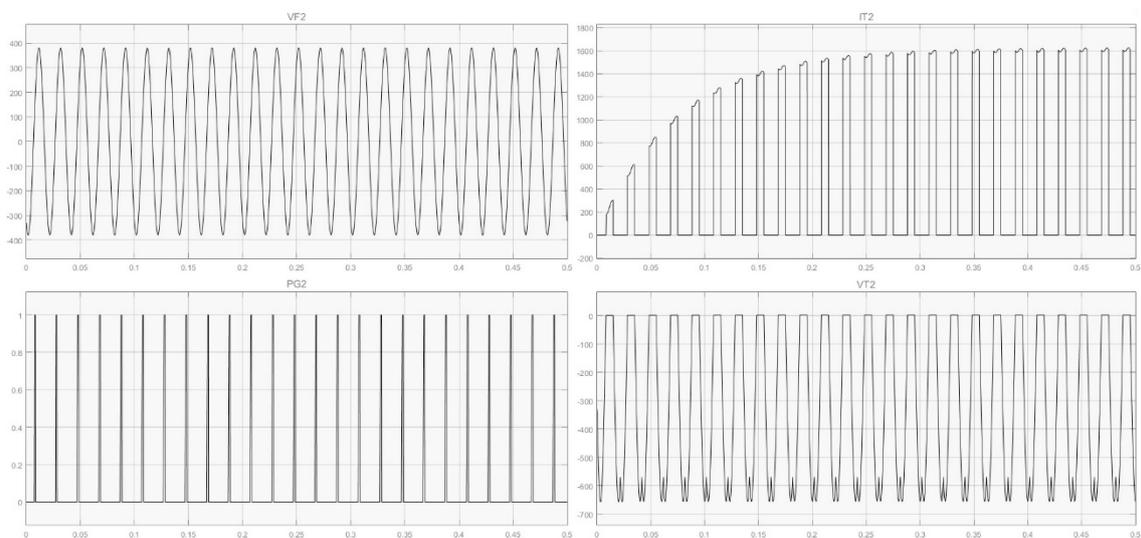
Veamos nuestro diagrama de bloques en caso de necesitar menos corriente eléctrica:



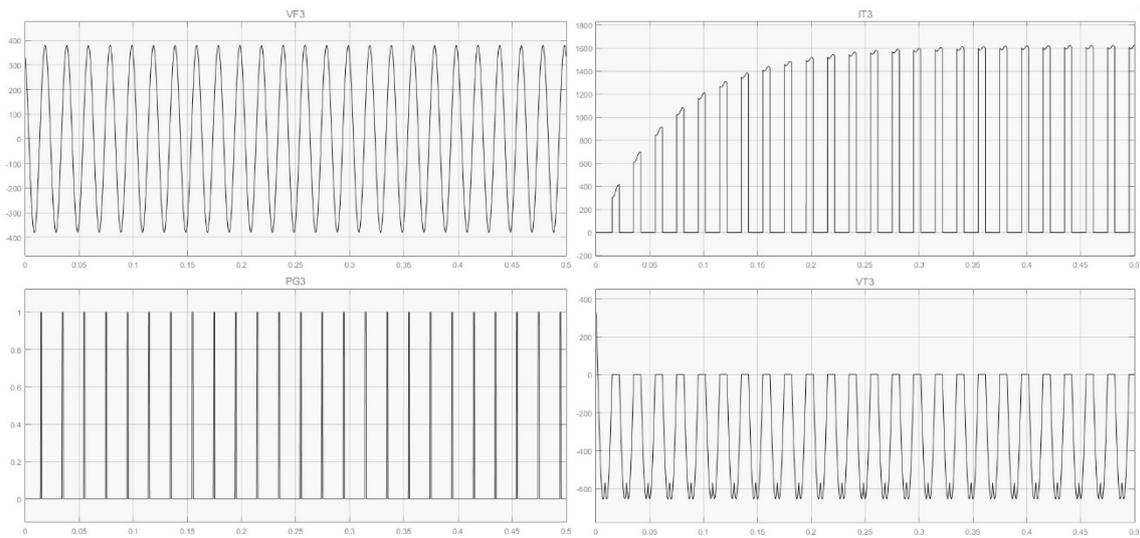
Funcionamiento Tiristor 1



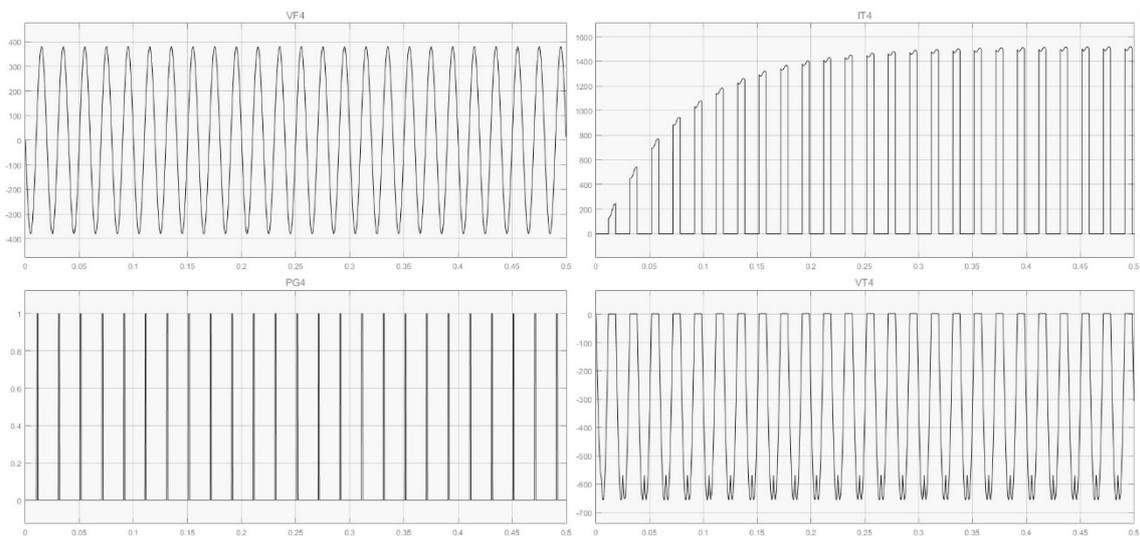
Funcionamiento Tiristor 2



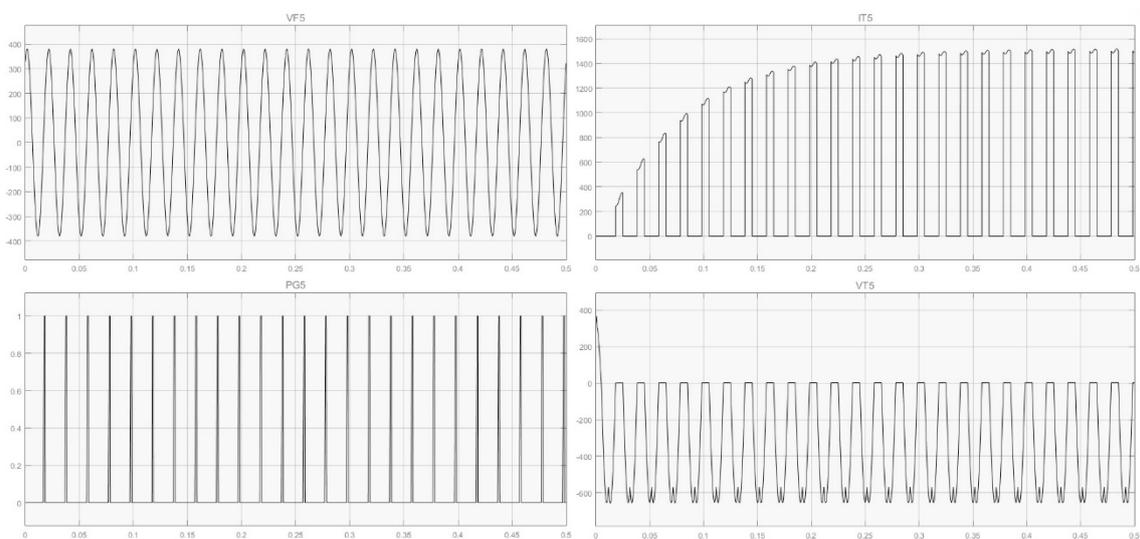
Funcionamiento Tiristor 3



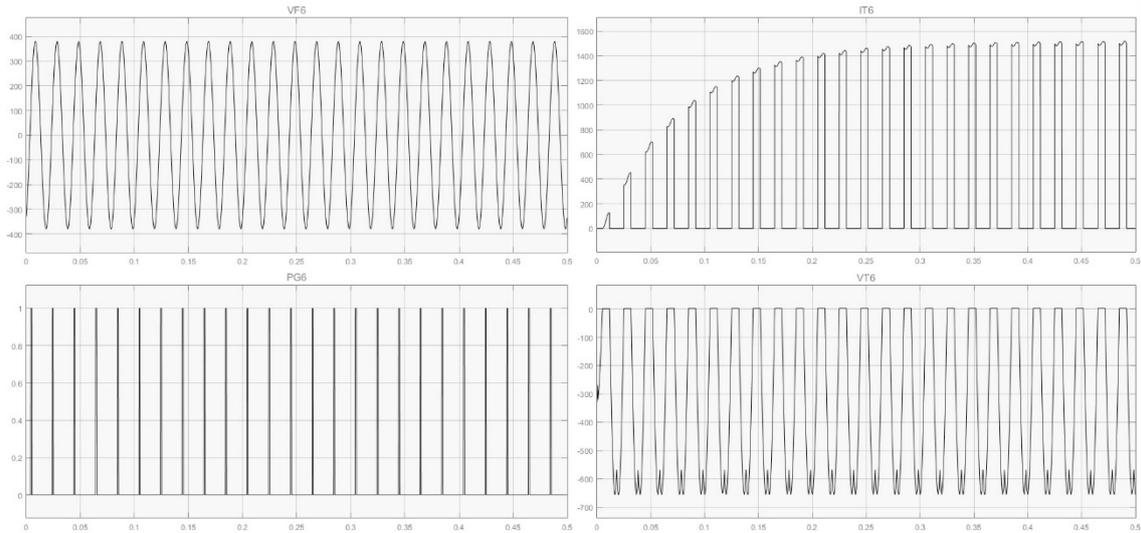
Funcionamiento Tiristor 4



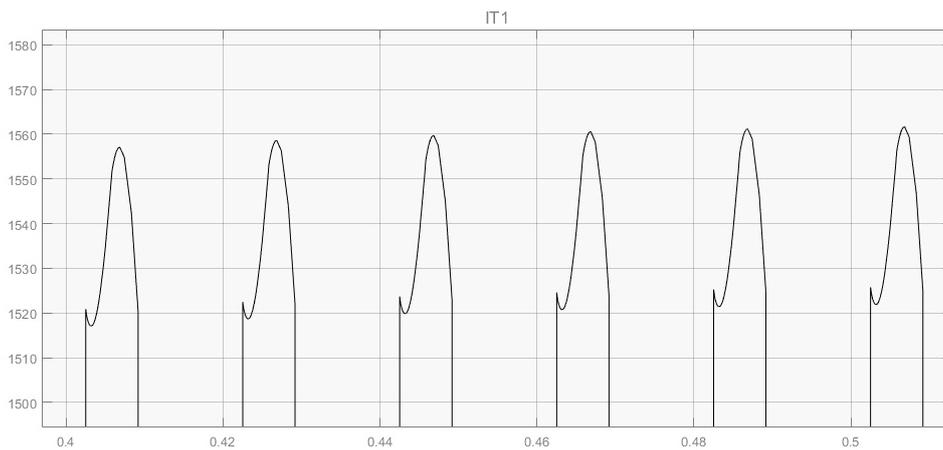
Funcionamiento Tiristor 5



Funcionamiento Tiristor 6

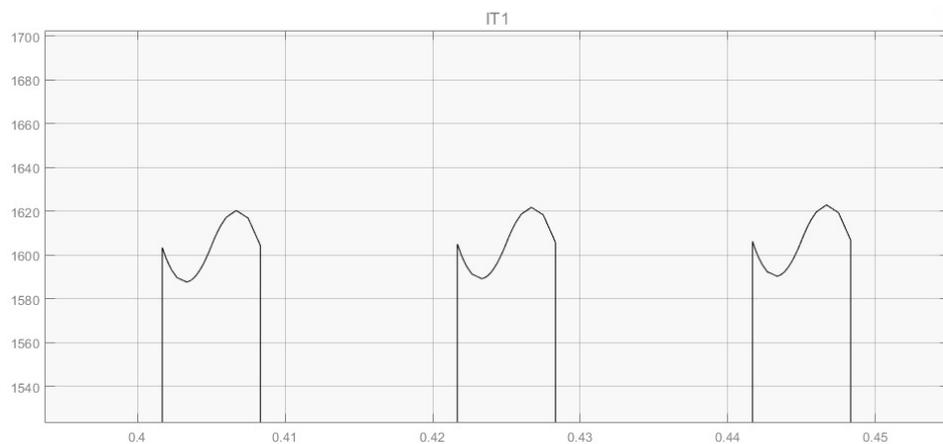


Las formas de onda de los parámetros que definen a los tiristores son similares a las de la “Situación de ganancia”. En este caso, la intensidad de los tiristores alcanza el estado estacionario en torno al segundo 0.45s.



Los valores que presenta la intensidad en el estado estacionario a lo largo del tiempo están situados entre 1.520A y 1.570A.

En la “Situación de ganancia”, el estado estacionario se alcanza en el segundo 0.4 aproximadamente.



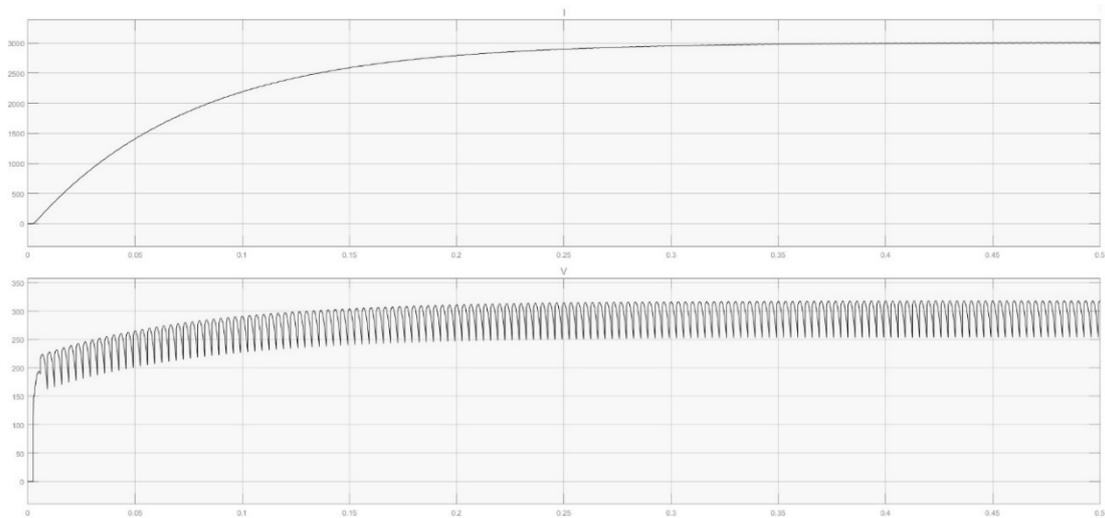
Vemos que la diferencia entre la “*Situación de ganancia*” y la “*Situación de pérdida*” es mínima, tan sólo media décima de segundo. La diferencia entre la “*Situación de partida*” y la “*Situación de ganancia*” era mayor situándose en torno a una décima de segundo.

Estas diferencias tienen lógica si tenemos en cuenta las variaciones de la señal de disparo ya que en la primera variación pasamos de 60° a 15° y en la segunda de 15° a 45°.

Los valores que tomaba la intensidad en el estado estacionario en la “*Situación de ganancia*” se sitúan en el intervalo aproximado 1.580 – 1.640 A, es decir, muy similares a los que tenemos en la “*Situación de pérdida*”, si bien es cierto que podríamos decir que son mínimamente inferiores en este último caso.

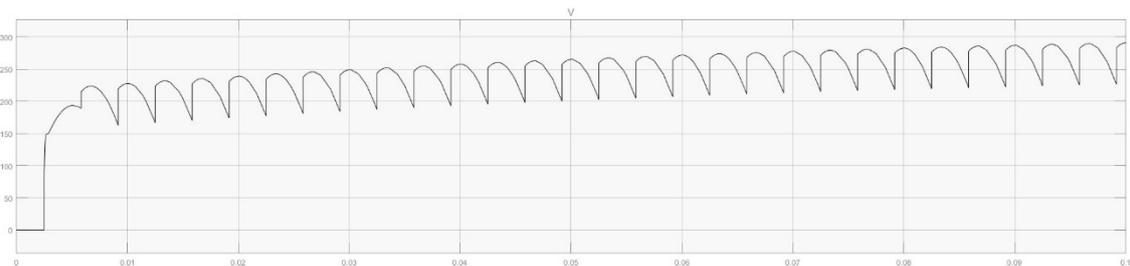
Por tanto, obtenemos valores similares en lo que a intensidad se refiere pero el estado estacionario es alcanzado en un intervalo de tiempo menor.

Funcionamiento General

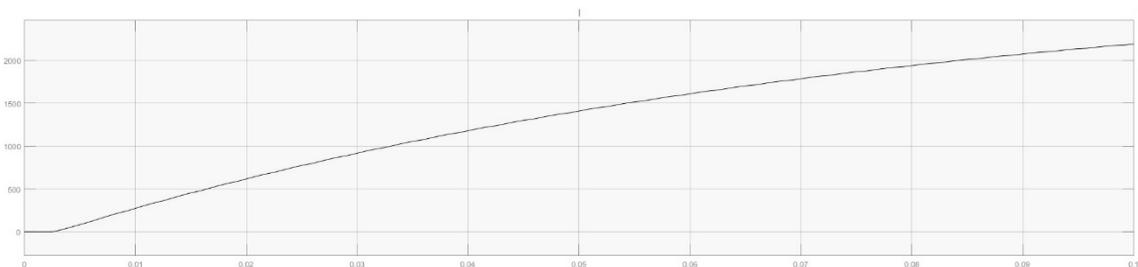


Como hemos hecho en las ocasiones anteriores, graduamos la escala de las dos magnitudes para apreciar su forma de onda.

- Tensión rectificador

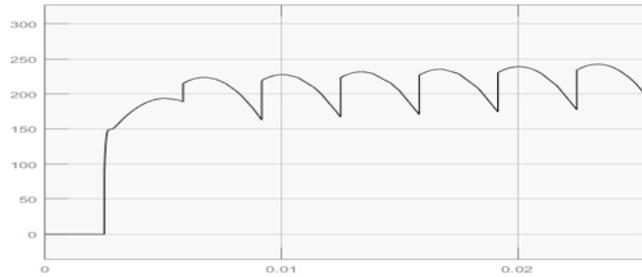
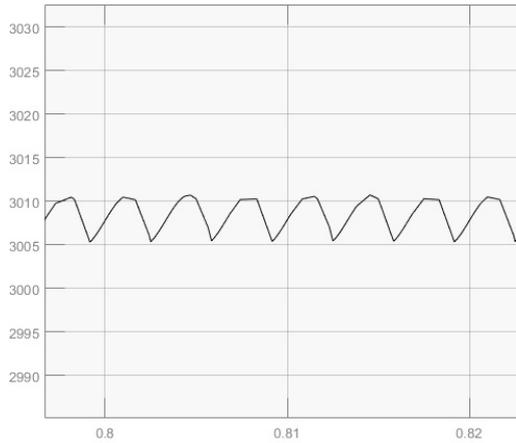


- Intensidad rectificador



Como ya ocurría en el caso anterior, debemos escalar de forma distinta ambos parámetros debido a su nivel de ondulación.

Con respecto a la tensión del rectificador, su gráfico es muy similar al caso anterior. Su forma de onda se aprecia sin apenas modificar la escala.



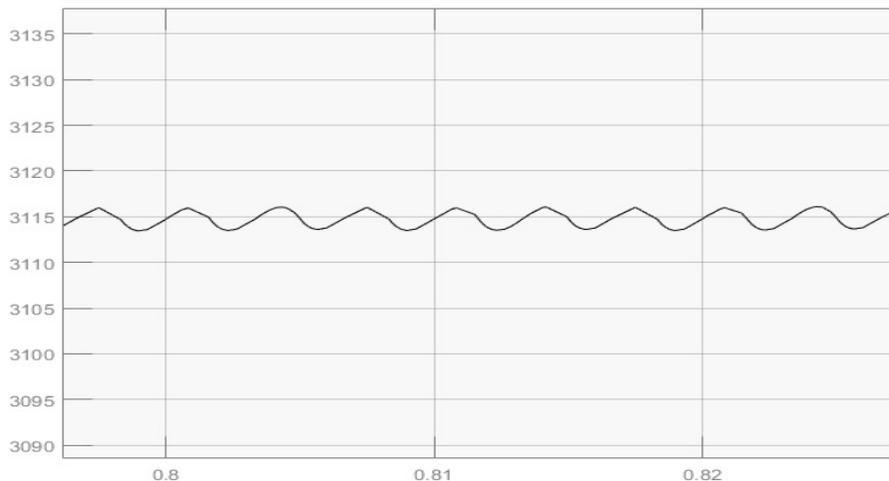
Sin embargo, como ocurría en la situación anterior, la intensidad tiene aparentemente una forma de onda con escaso rizado y es necesario llevar a cabo un escalado mucho más exhaustivo para poder apreciar su forma de onda.

En el gráfico se observa claramente el valor que toma la intensidad en estado estacionario así como el intervalo de tiempo en el que nos situamos. Esto nos da una idea de la magnitud de la ampliación que es necesaria para poder apreciar su forma de onda.

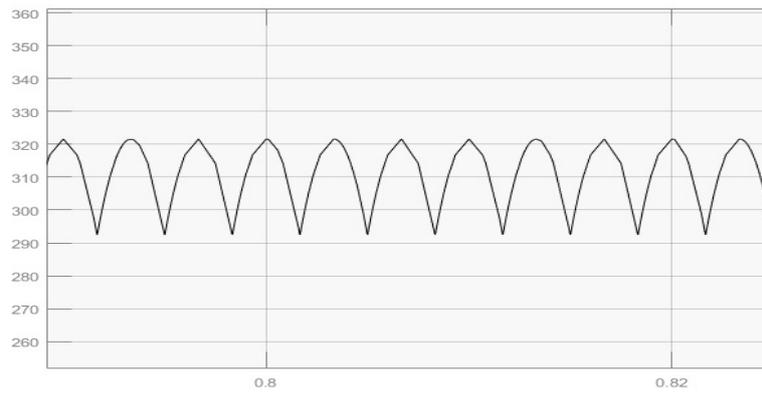
Con respecto al comportamiento del rectificador en líneas generales, es similar al que hemos estudiado en las situaciones anteriores teniendo en cuenta las diferencias de los estados estacionarios y sus valores.

Estudiadas las comparaciones entre los estados anteriores, veamos ahora la comparación que nos falta, la comparación entre la situación de ganancia y la situación de pérdida.

Situación de ganancia (ya estudiada, sus valores son los siguientes)

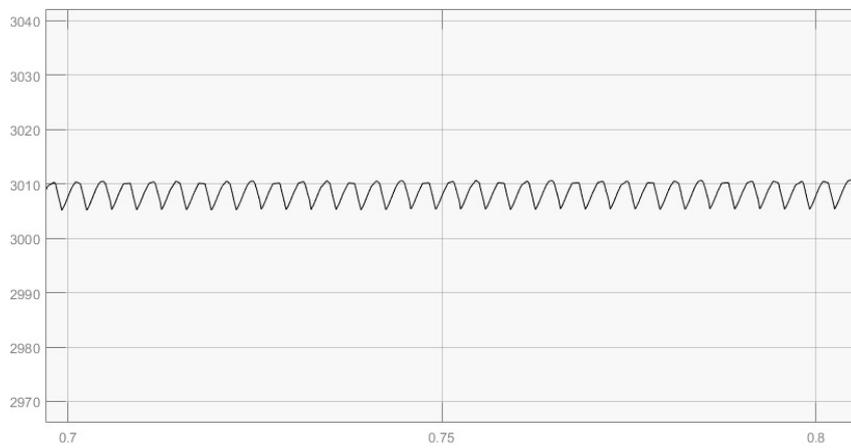


La intensidad tiene un valor aproximado de 3.115A en estado estacionario.

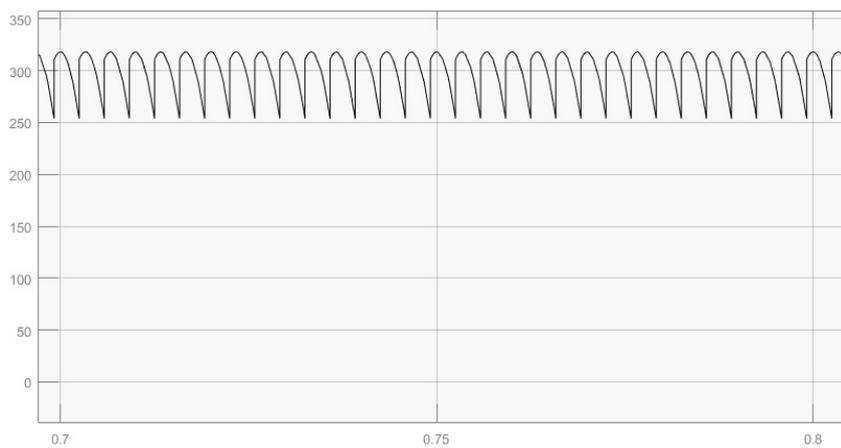


La diferencia de potencial oscila entre 290V y 330V. Su valor medio ronda los 305V.

Situación de pérdida



La intensidad tiene un valor aproximado de 3.007A en estado estacionario.



La diferencia de potencial oscila entre 250V y 320V. Su valor medio ronda los 280V.

Como vemos, los resultados obtenidos en la “*Situación de pérdida*” son una vez más los esperados, siendo menores que los de la “*Situación de ganancia*”:

- Con respecto a la intensidad, hemos pasado de 3.115A a 3.007A.
- Con respecto a la tensión, también ha sufrido una reducción pasando de 305V a 280V.

Podemos concluir que hemos conseguido nuestro objetivo, al igual que en el caso anterior. Las necesidades del proceso requerían unos valores menores de corriente eléctrica y, gracias a la modificación de los parámetros del rectificador, esa disminución ha sido posible.

Capítulo 10

Estudio económico

Capítulo 10

ESTUDIO ECONÓMICO

10.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los puntos clave a la hora de la realización de un proyecto es el estudio económico del mismo. Los resultados de este estudio nos darán una idea de la viabilidad de nuestro proyecto, es decir, de si es factible o no llevarlo a cabo.

El objetivo de nuestro proyecto es el desarrollo de un rectificador de alta potencia que cubra las necesidades de un proceso de electrólisis. Para poder realizar dicho rectificador se requieren horas de trabajo con un potente software. Estamos hablando de Matlab, una herramienta de gran ayuda gracias a la cual podemos llevar a cabo nuestro trabajo.

10.2. ETAPAS DEL PROYECTO

Nuestro proyecto ha sufrido una secuencia cronológica de etapas que han marcado su desarrollo. Estas son las siguientes:

Puesta en marcha

En primer lugar es necesario conocer la idea que queremos llevar a cabo para poder sentar las bases a partir de las cuales se realizará todo el trabajo. Este punto es vital para el desarrollo del proyecto ya que es el que marcará las directrices principales del mismo.

En esta primera fase se definirá lo que “queremos hacer” y “cómo lo queremos hacer”. También se tratarán aspectos como las responsabilidades y funciones de cada integrante del equipo.

Análisis inicial

Constará de la identificación de los medios y herramientas necesarias para llevar a cabo el proyecto así como de las fuentes de información adecuadas que debamos consultar.

Construcción del modelo

Es una de las fases más importantes. Se basa en la utilización del software para realizar el montaje de nuestros modelos.

Experimentación y toma de datos

Una vez que tenemos nuestro modelo funcionando correctamente se procede a tomar los datos pertinentes. Se realizan varios ensayos y se recogen los datos que arroja nuestro modelo.

Análisis de resultados

Se toman las conclusiones resultantes de la aplicación del rectificador. En este momento poseemos todos los datos e información necesaria que nos dicen cómo está trabajando nuestro rectificador.

Redacción del proyecto

Se basa fundamentalmente en plasmar el trabajo realizado durante el desarrollo del proyecto. Se elabora un informe en el que se detalla todo lo referente al proyecto y a la forma de proceder durante el desarrollo del mismo.

Presentación del proyecto

Última etapa. Una vez finalizado el proyecto, se procede a su presentación para darlo a conocer.

10.3. EQUIPO DE TRABAJO

Este proyecto constará de la participación de dos trabajadores fundamentalmente:

Director de proyecto

Es el encargado de supervisar en todo momento al ingeniero durante el desarrollo del proyecto.

Ingeniero

Es el encargado de la realización del proyecto. El ingeniero es el que lleva todo el peso de trabajo del proyecto llevando a cabo todas las etapas antes mencionadas.

10.4. RECURSOS EMPLEADOS

Para poder hacer realidad nuestro rectificador, necesitaremos una serie de recursos que lo posibiliten. Los recursos empleados son todos los medios y herramientas necesarias que utilizará el ingeniero para dicho fin.

Nuestros recursos son los siguientes:

Software

- Sistema Operativo Microsoft Windows 10 Home.
- Paquete ofimático Microsoft Office 2013
- Programa de análisis Matlab R2016a.
- Programas de uso cotidiano: correo electrónico, Adobe Acrobat...

Hardware

- PC: MSI Intel Core i7.
- Impresora.
- Otras herramientas como: pen drives, ratón óptico...

Material de oficina

En este apartado se engloba todo lo necesario como fotocopias, libros, bolígrafos, CD's y demás herramientas de uso diario.

10.5. COSTES DEL PROYECTO

Para poder hacer una estimación del coste de nuestro proyecto, es necesario llevar a cabo una distinción entre los distintos costes que tenemos. El coste total será la suma de todos los costes asociados al proyecto.

En general podemos hacer una distinción entre costes directos y costes indirectos.

Costes directos

Los costes directos son aquellos que dependen de las etapas de desarrollo del proyecto y que, básicamente, están formados por:

- Coste de personal.
- Costes amortizables de programas y equipos.
- Costes de los materiales directos empleados.

Costes indirectos

Los costes indirectos son aquellos de los cuales no depende el desarrollo del proyecto en sí mismo pero que son necesarios para poderlo llevar a cabo. Este tipo de costes se corresponden con consumos del siguiente tipo:

- Consumo eléctrico
- Consumo de combustible
- Consumos telefónicos
- Internet...

10.5.1. Costes Directos

Coste del personal

Para calcular los costes directos comenzamos por los costes de personal. La elaboración de este proyecto ha sido llevada a cabo por dos integrantes, un director de proyecto y un ingeniero.

Para realizar este cálculo es necesario conocer las horas empleadas en el proyecto de ambos empleados.

En primer lugar, veamos las horas laborables al año:

- Días totales anuales: 365 días.
- Días pertenecientes a fines de semana: 52 fines de semana, 104 días.
- Días festivos: dependen de la comunidad autónoma y ciudad, en Valladolid 14 días.
- Días de vacaciones: 30 días.
- Días de asuntos propios: 5 días.

A los días totales le restamos todos aquellos no laborables:

$$\text{Días laborables} = 365 - 104 - 14 - 30 - 5 = 212 \text{ días}$$

Como tenemos 8 horas laborables al día:

$$\text{Días laborables} = 212 \cdot 8 \text{ horas/día} = 1.696 \text{ horas}$$

Veamos ahora el salario por hora de los integrantes del grupo:

Director de proyecto

Un director de proyecto tiene un salario medio neto anual es de 50.000€ aproximadamente. Teniendo en cuenta los impuestos y cotización (en torno al 35%), tenemos un salario bruto anual de 67.500€.

Aplicando las horas laborables obtenemos:

$$\text{Coste por hora} = \frac{67.500\text{€}}{1.696\text{horas}} = 39,80 \text{ €/hora}$$

Ingeniero

En el caso del ingeniero, el salario medio neto anual es de 36.000€ aproximadamente. Teniendo en cuenta los impuestos y cotización (en torno al 35%), tenemos un salario bruto anual de 48.600€.

Aplicando las horas laborables obtenemos:

$$\text{Coste por hora} = \frac{48.600\text{€}}{1.696\text{horas}} = 28,66 \text{ €/hora}$$

Una vez obtenido el coste por hora de ambos integrantes del grupo de trabajo, necesitamos el tiempo empleado en realizar el proyecto para saber el coste directo del mismo.

Tal y como explicamos anteriormente, el proyecto se subdivide en una serie de etapas. Cada una de estas etapas tiene una duración y un coste dependiendo del número de horas empleadas por el director de proyecto y el ingeniero.

A continuación se muestran una serie de tablas que recogen tanto el número de horas empleadas por cada uno en cada etapa como su coste:

ETAPA	DIRECTOR DE PROYECTO (horas)	INGENIERO (horas)
Puesta en marcha	8	8
Análisis inicial	8	8
Construcción del modelo	32	296
Experimentación y toma de datos	8	80
Análisis de resultados	8	40
Redacción del proyecto	8	40
Presentación del proyecto	8	8
TOTAL	80	480

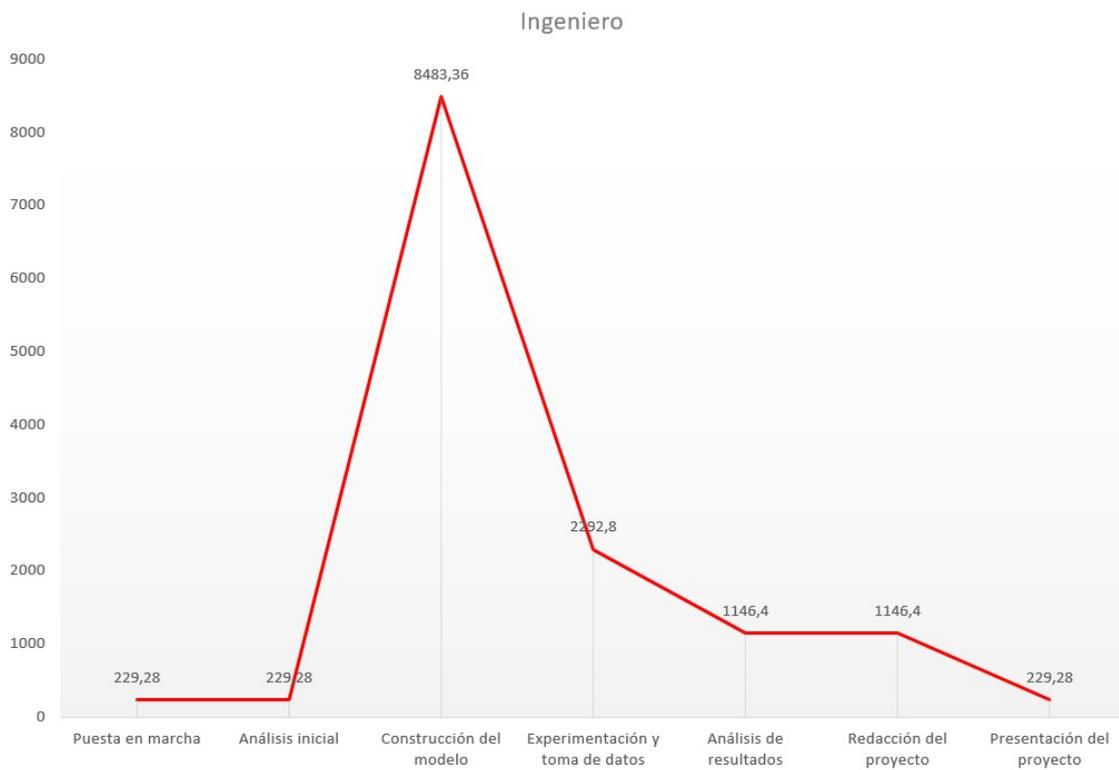
Director de proyecto: 39,80 €/hora

ETAPA	DIRECTOR DE PROYECTO (horas)	DIRECTOR DE PROYECTO (€)
Puesta en marcha	8	318,4
Análisis inicial	8	318,4
Construcción del modelo	32	1.273,6
Experimentación y toma de datos	8	318,4
Análisis de resultados	8	318,4
Redacción del proyecto	8	318,4
Presentación del proyecto	8	318,4
TOTAL	80	3.184



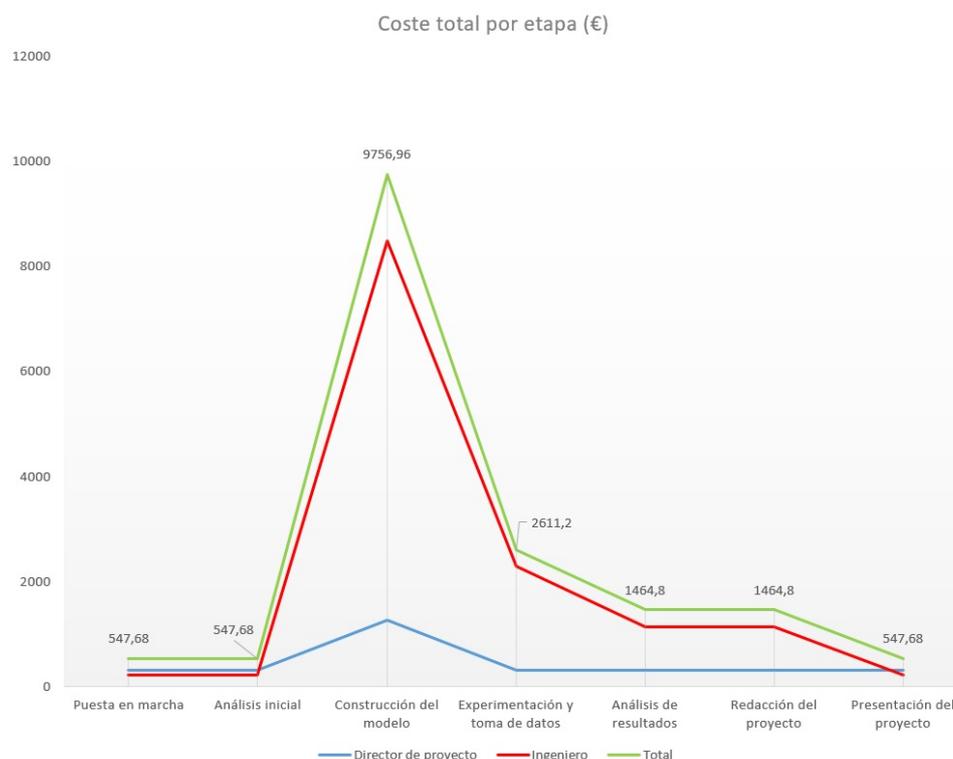
Ingeniero: 28,66 €/hora

ETAPA	INGENIERO (horas)	INGENIERO (€)
Puesta en marcha	8	229,28
Análisis inicial	8	229,28
Construcción del modelo	296	8.483,36
Experimentación y toma de datos	80	2.292,8
Análisis de resultados	40	1.146,4
Redacción del proyecto	40	1.146,4
Presentación del proyecto	8	229,28
TOTAL	480	13.756,8



Coste total por etapa

ETAPA	DIRECTOR DE PROYECTO (€)	INGENIERO (€)	TOTAL (€)
Puesta en marcha	318,4	229,28	547,68
Análisis inicial	318,4	229,28	547,68
Construcción del modelo	1.273,6	8.483,36	9.756,96
Experimentación y toma de datos	318,4	2.292,8	2.611,2
Análisis de resultados	318,4	1.146,4	1.464,8
Redacción del proyecto	318,4	1.146,4	1.464,8
Presentación del proyecto	318,4	229,28	547,68
TOTAL	3.184	13.756,8	16.940,8



Como vemos, el coste total del personal asciende a un valor de 16.940,8 €.

Costes amortizables de programas y equipos

Los costes amortizables de programas y equipos son aquellos que se corresponden con el uso de las herramientas necesarias para poder llevar a cabo el proyecto y que son amortizables a lo largo de su vida útil.

En primer lugar debemos conocer la inversión inicial para realizar una amortización lineal.

Consideraremos material amortizable a todo lo utilizado en relación a los equipos informáticos, tanto hardware como software. Su período de amortización varía en función de la inversión inicial y de su vida útil.

En la actualidad, en el campo de los “Equipos electrónicos e informáticos. Sistemas y programas”, tenemos los siguientes coeficientes de amortización lineal relacionados con nuestro proyecto:

- Equipos para procesos de información: 25%
- Sistemas y programas informáticos: 33%

Tenemos una duración de proyecto estimada de:

Duración de proyecto = Director de proyecto (80 horas) + Ingeniero (480 horas)

Duración de proyecto = 560 horas

Interpolando, obtenemos nuestros coeficientes de amortización lineal:

Equipos para procesos de información: 8,25%

<i>HERRAMIENTA UTILIZADA</i>	<i>COSTE (€)</i>	<i>AMORTIZACIÓN (€)</i>
Ordenador personal	1.500	123,75
Impresora	100	8,25
TOTAL	1.600	132

Programas informáticos: 10, 90%

HERRAMIENTA UTILIZADA	COSTE (€)	AMORTIZACIÓN (€)
Microsoft Windows 10	145	15,81
Microsoft Office 2010	149	16,24
Matlab R2016a (versión educación)	83,49	9,1
TOTAL	377,49	41,15

El coste total amortizable de programas y equipos asciende a:

Coste total = 132€ + 41,15€ = 173,15€
--

Costes de los materiales directos empleados

En este apartado se engloban los materiales “consumibles” utilizados durante el desarrollo del proyecto tales como:

- Herramientas de escritura: bolígrafos, lapiceros, papel...
- Fotocopias
- Tinta
- Encuadernaciones
- Otros

Estimaremos un coste aproximado para este apartado de 200€.
--

Una vez conocidos todos los costes directos, obtenemos los costes directos totales:

Coste directo total = 16.940,8€ + 173,15€ + 200€ = 17.313,95€
--

10.5.2. Costes Indirectos

Como ya hemos explicado, los costes indirectos son aquellos que son necesarios para realizar el proyecto pero que no pueden ser considerados como directos. Estos costes suelen ser la mayoría consumos como el consumo eléctrico o el consumo de combustible.

Estimaremos los costes de este apartado en torno a un valor de 300€.

10.5.3. Coste del proyecto

En este tipo de proyectos la suma de los Costes Directos e Indirectos se la denomina “Presupuesto de Ejecución Material (PEM)”.

$$\text{PEM} = \text{CD} + \text{CI} = 17.313,95\text{€} + 300\text{€} = 17.613,95\text{€}$$

A este presupuesto hay que añadirle:

- Gastos Generales (GG), que se fijan en torno a un 13% del PEM.

$$\text{GG} = 13\% \text{ del PEM} = 2.289,81\text{€}$$

- Beneficio Industrial (BI), que se fijan en torno a un 6% del PEM.

$$\text{BI} = 6\% \text{ del PEM} = 1.056,84\text{€}$$

El presupuesto total del proyecto será la suma de estos valores.

$$\text{PEM} + \text{GG} + \text{BI} = 20.960,6\text{€}$$

Aplicando el Impuesto sobre el Valor Añadido (IVA) al 21% obtenemos el coste total del proyecto:

$$\text{Coste total} = 25.362,33\text{€}$$

El presupuesto total de ejecución del proyecto asciende a la cantidad de:

VEINTICINCO MIL TRESCIENTOS SESENTA y DOS Euros con TREINTA y TRES céntimos.

Capítulo 11

Conclusiones

Capítulo 11

CONCLUSIONES

El objetivo del proyecto es diseñar y analizar en Matlab un rectificador de alta potencia para la electrólisis. Para ello, es necesario conocer en qué consiste este proceso, cuál es el funcionamiento de los rectificadores que mejor se ajusta y estudiar el comportamiento del rectificador destinado a este fin.

En primer lugar, se lleva a cabo un estudio del proceso de electrólisis. Se trata de una breve introducción en este campo ya que no se trata del tema principal del proyecto pero se detallan los aspectos fundamentales de la misma.

Podemos aprender qué es la electrólisis, lo que ocurre cuando se produce, qué es necesario para que se produzca... Además, se particulariza en el caso del agua debido a la importancia que cobra en la actualidad.

En segundo lugar, tratamos la conversión de corriente alterna en corriente continua. Este es el primer paso que nos introduce verdaderamente en el tema principal de nuestro proyecto ya que esta conversión es la que buscamos con nuestro rectificador.

Simplificando mucho el proceso, la tarea del rectificador que vamos a diseñar es, básicamente, convertir la corriente alterna que tenemos a la entrada en corriente continua que necesitamos a la salida.

Seguidamente nos introducimos en el mundo del rectificador. Lo primero es hacer una distinción entre rectificadores no controlados y rectificadores controlados. Llevaremos a cabo un estudio de ambos empezando por los primeros.

Los rectificadores no controlados son los convertidores que iniciaron la Electrónica de Potencia. Por ello, se explica lo que son y las características que tienen.

Como es lógico, debemos conocer las posibles conexiones que podemos hacer con estos circuitos basados en los diodos y la forma de mejorar los resultados que obtenemos.

Posteriormente, apareció la opción controlada de los rectificadores. El uso de tiristores en lugar de diodos permite obtener convertidores de corriente con salida regulada, lo que es un paso muy importante que permite ampliar y mejorar el abanico de aplicaciones que ya nos ofrecían los rectificadores no controlados.

Al igual que con la versión no controlada, se lleva a cabo un estudio de las posibles conexiones que podemos hacer con estos circuitos basados, esta vez, en tiristores.

Una vez vistos los rectificadores, el proyecto se centra en la búsqueda de un rectificador que nos permita llevar a cabo nuestro objetivo. Es por este motivo por el que se estudian los rectificadores monofásicos, bifásicos y trifásicos de media onda, tanto el modelo no controlado como el controlado.

Llevamos a la práctica el funcionamiento de estos rectificadores gracias a Matlab. Vemos como trabajan mediante la simulación de los mismos.

Gracias a los gráficos que obtenemos de estas simulaciones, vemos con claridad la diferencia que existe desde el modelo más básico (monofásico) hasta el más completo (trifásico), sobretodo en las características de salida como son tensión en intensidad.

Son estas diferencias las que marcan el camino a seguir en la elección de nuestro rectificador, el modelo en doble estrella con bobina de absorción.

Los resultados obtenidos en la simulación de este modelo ratifican que no nos equivocamos en su elección y provocan que sigamos adelante mediante su adecuación a las necesidades del proceso.

La adecuación de nuestro modelo consiste en la implantación de un sistema de control que sea el encargado de modificar la característica de salida para hacer frente a la demanda de corriente existente.

Los resultados obtenidos del ejemplo práctico nos dan a entender el buen funcionamiento de nuestro rectificador en conjunto con el sistema de control.

Por último, se realiza un estudio económico con el objetivo de obtener un presupuesto aproximado.

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- WILLIAM BOLTON, “Mechatronics, Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering”, Ed. 2ª, Addison Wesley Longman Limited, 2001.
- SALVADOR MARTÍNEZ GARCÍA, JUAN GUALDA GIL, “Electrónica de potencia. Componentes, topologías y equipos, Thomson Ediciones Paraninfo, 2006.
- MUHAMMAD H. RASHID, “Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y aplicaciones.”, Ed. 3ª, Pearson Educacion, México, 2004.
- PABLO ALCALDE SAN MIGUEL, “Electrónica”, Ediciones Paraninfo. Ed. 1ª , 2009.
- PABLO ALCALDE SAN MIGUEL, “Electrónica aplicada”, Ediciones Paraninfo. Ed. 1ª , 2010.
- El de los apuntes fotocopiados.