

RECTIFICADOR CONTROLADO CON CONVERTIDOR CD-CD DE ELEMENTOS REDUCIDOS



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, COLOMBIA
2019**

**RECTIFICADOR CONTROLADO CON CONVERTIDOR CD-CD DE
ELEMENTOS REDUCIDOS**

Autor:

JENNIFER CAROLINA COGOLLO ROMERO

Trabajo presentado para optar por el título de:

Ingeniero Eléctrico

Director:

MSc. LUIS DAVID PABÓN FERNÁNDEZ

Ingeniero Eléctrico

Codirector:

MSc. EDISON ANDRES CAICEDO PEÑARANDA

Ingeniero Eléctrico

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PAMPLONA, COLOMBIA**

2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios por la vida, la salud y el entendimiento. Infinitas gracias a mis padres por ser mi apoyo incondicional, y mí fuerza en los momentos difíciles.

A mi director Luis David Pabón por transmitirme las enseñanzas y conocimientos necesarios para formarme académicamente en un profesional.

A mis amigos y compañeros encontrados en este hermoso camino, que aportaron algo la obtención de este logro.

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado una vida llena sabiduría, perseverancia, salud, carisma y sobre todo amor para alcanzar cualquier cosa que me proponga.

A mis padres YANETH y MILTON, por haberme formado en principios y valores, por el amor, dedicación, esfuerzo y apoyo incondicional, a ellos infinitas gracias, les amaré siempre.

A mis hermanos ADRIANA, CAMILO y ANDRÉS, por ser el aliciente para lograr lo que me propongo y ser cada día mejor, siendo así un buen ejemplo de hermana mayor.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	10
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
OBJETIVOS.....	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos.....	13
JUSTIFICACIÓN	14
ACOTACIÓN.....	14
CAPÍTULO 1	15
MARCO TEÓRICO.....	15
1.1. CONVERTIDOR CD-CD.....	16
1.1.1. Definición	16
1.1.2. Aplicaciones	17
1.1.3. Tipos de convertidores CD – CD	17
1.2. RECTIFICADORES CA/CD	31
1.2.1. Definición	31
1.2.2. Clasificación de los rectificadores CA/CD	32
CAPÍTULO 2	¡Error! Marcador no definido.
TOPOLOGÍA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO Y EL CONVERTIDOR CD-CD	39
2.1. Rectificador trifásico.....	40
2.2 Convertidor CD-CD	42
2.1.1. Diagrama circuital.....	42
CAPÍTULO 3	¡Error! Marcador no definido.
DISEÑO DEL SISTEMA	44
3.1. Convertidor CD-CD.....	45
3.1.1. Selección de componentes.....	45
3.1.2. Cálculos del convertidor CD-CD.....	46
3.1.3. Diseño del convertidor CD-CD	47
3.1.3.4. Etapa de potencia	53

3.1. Rectificador ca-cd.....	61
3.2.1. Cálculos del rectificador trifásico	61
3.2.2. Diseño del rectificador trifásico	62
CAPÍTULO 4	¡Error! Marcador no definido.
SIMULACIÓN DEL SISTEMA	64
4.1. Rectificador trifásico:	65
4.2. Convertidor CD-CD:	65
4.3. Acople final del sistema.....	66
4.4. Simulación sistema	68
4.4.1. Entrada trifásica	68
4.4.2. Voltaje después de la rectificación sin filtro capacitivo	68
4.4.3. Voltaje después de la rectificación con filtro capacitivo.....	69
4.5. Simulación diodos rectificadores	69
4.5.1. Diodo 1	70
4.5.2. Diodo 2	70
4.5.3. Diodo 3	71
4.5.4. Diodo 4	71
4.5.5. Diodo 5	72
4.5.6. Diodo 6	72
4.6. Simulación como reductor	73
4.6.1. Step.....	73
4.6.2. Señales de control	73
4.6.3. Voltaje de salida funcionando como reductor	74
4.6.4. Corriente de salida funcionando como reductor	75
4.7. Simulación como elevador.....	75
4.7.1. Step.....	75
4.7.2. Señales de control	76
4.7.3. Voltaje de salida funcionando como elevador	76
4.7.4. Corriente de salida funcionando como elevador.....	77
CAPÍTULO 5	¡Error! Marcador no definido.
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA	78

5.1. Implementación del rectificador trifásico	79
5.1.1. Alimentación.....	79
5.1.2. Filtro	79
5.1.3. Implementación real.....	79
5.2. Implementación del convertidor CD-CD.....	80
5.2.1. Alimentación.....	80
5.2.1. Prototipo final	81
5.2.2. Implementación real del convertidor.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de convertidor CD-CD tipo Boost.....	18
Figura 2. Convertidor Boost durante "topología ON"	19
Figura 3. Convertidor Boost durante "topología OFF"	19
Figura 4. Convertidor Boost durante "topología $t \leq \text{OFF}$ "	20
Figura 5. Esquema convertidor CD-CD tipo Buck.....	21
Figura 6. Convertidor Buck durante "topología ON"	22
Figura 7. Convertidor Buck durante "topología OFF"	22
Figura 8. Convertidor Buck durante "topología $t \leq \text{OFF}$ "	23
Figura 9. Esquema de un convertidor Cuk.....	24
Figura 10. Convertidor Cuk durante "topología ON"	25
Figura 11. Convertidor Cuk durante "topología OFF"	25
Figura 12. Convertidor Cúk durante "Topología OFF"	26
Figura 13. Esquema del convertidor elevador-reductor.....	27
Figura 14. Modos de operación del convertidor elevador-reductor.....	28
Figura 15. Modo de operación 1, del convertidor elevador-reductor	29
Figura 16. Modo de operación 3, del convertidor elevador-reductor	30
Figura 17. Esquema del convertidor elevador-reductor.....	30
Figura 18. Rectificador de onda completa	32
Figura 19. Recticador monofásico de onda completa.....	32
Figura 20. Rectificador trifásico de onda completa.....	33
Figura 21. Rectificador hexafásico	33
Figura 22. Rectificador trifásico de onda completa no controlado.....	34

Figura 23. Rectificador trifásico de onda completa controlado	35
Figura 24. Clasificación de un rectificador trifásico [5]	36
Figura 25. Rectificador en matriz de conversión.....	37
Figura 26. Rectificador trifásico en puente	37
Figura 27. Diseño del rectificador trifásico	40
Figura 28. Diseño del rectificador trifásico	41
Figura 29. Sistema trifásico	41
Figura 30. Diagrama circuital del convertidor CD-CD.....	43
Figura 31. Tipos de MOSFET	43
Figura 32. Diseño del sistema, Rectificador-convertidor.....	45
Figura 33. Regulador de voltaje.....	48
Figura 34. Etapa de control	48
Figura 35. Optoacoplador 6N137	49
Figura 36. Compuerta negadora SN74LS04N.....	49
Figura 37. Driver IR2110	49
<i>Figura 38. Arduino UNO</i>	<i>50</i>
Figura 39. Generación de frecuencia PWM	51
Figura 40. PWM (Pulse Width Modulation)	51
Figura 41. Programa en arduino UNO	52
Figura 42. Algoritmo de control del sistema	53
Figura 43. Etapa de potencia	54
Figura 44. MOSFET FDL100N50F.....	54
Figura 45. Diodos rectificadores en la etapa de potencia para el convertidor.....	55
Figura 46. Diodo dual schottky	55
Figura 47. Capacitor para el convertidor CD-CD.....	55
Figura 48. Inductancias en paralelo	56
Figura 49. Parámetros constructivos del núcleo ferromagnético	56
Figura 50. Modelo térmico del disipador de un puente	58
Figura 51. Onda resultante en cd	62
Figura 52. Simulación del rectificador trifásico	65
Figura 53. Simulación del convertidor CD-CD.....	66
Figura 54. Acople final del sistema, simulación	67
Figura 55. Señal trifásica entregada al sistema.....	68
Figura 56. Voltaje después de la rectificación sin filtro capacitivo	68
Figura 57. Voltaje después de la rectificación con filtro capacitivo.....	69
Figura 58. Simulación diodos.....	69
Figura 59. Corriente en el diodo 1 de rectificación	70
Figura 60. Corriente en el diodo 2 de rectificación	70
Figura 61. Corriente en el diodo 3 de rectificación	71
Figura 62. Corriente en el diodo 4 de rectificación	71
Figura 63. Corriente en el diodo 5 de rectificación	72

Figura 64. Corriente en el diodo 6 de rectificación	72
Figura 65. Señal de step al convertidor funcionando como reductor	73
Figura 66. Señales de control entregadas al convertidor funcionando como reductor	73
Figura 67. Voltaje de salida del convertidor funcionando como reductor	74
Figura 68. Voltaje de entrada vs salida del convertidor funcionando como reductor	74
Figura 69. Corriente de salida del convertidor funcionando como reductor.....	75
Figura 70. Señal de step al convertidor funcionando como elevador	75
Figura 71. Señales de control entregadas al convertidor funcionando como elevador.....	76
Figura 72. Voltaje de salida del convertidor funcionando como reductor	76
Figura 73. Voltaje de entrada vs salida del convertidor funcionando como reductor	77
Figura 74. Corriente de salida del convertidor funcionando como reductor.....	77
Figura 75. Prototipo de implementación para el rectificador trifásico	79
Figura 76. Implementación real del rectificador trifásico	80
Figura 77. Filtro capacitivo para el rectificador trifásico.....	80
Figura 78. Prototipo final del convertidor CD-CD.....	81
Figura 79. Bobinas implementadas para el convertidor CD-CD.....	81
Figura 80. Implementación final del convertidor CD-CD	82
Figura 81. Capacitor utilizado como filtro para el sistema	82
Figura 82. Implementación final del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos.....	83
Figura 83. Pruebas para la validación del sistema	85
Figura 84. Forma de onda de la tensión de entrada trifásica	86
Figura 85. Forma de onda y valor de la tensión a la salida del rectificador trifásico	86
Figura 86. Formas de onda de las señales de control tando en modo elevador como en modo reductor	87
<i>Figura 87. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD- CD, comportándose como reductor.....</i>	<i>88</i>
Figura 88. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD- CD, comportándose como reductor, 2da prueba	88
Figura 89. Valor de la carga utilizada para la prueba como reductor	89
Figura 90. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD- CD comportándose como elevador.....	89
Figura 91. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD- CD comportándose como elevador.....	90
Figura 92. Forma de onda de la corriente en el bus de CD	91
Figura 93. Forma de onda del voltaje en el bus de CD	91

INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones como cargadores de baterías, motores de cd, transmisión de altos voltajes en cd, etc., se requiere una conversión de corriente alterna a corriente directa, el cual parte de un rectificador de onda completa. Este proceso de rectificación CA/CD se lleva a cabo con diodos los cuales son dispositivos semiconductores que admiten el paso de la corriente en un sentido y lo impiden del otro, alimentados por una fuente trifásica de la red de energía eléctrica; la señal ya rectificada a la salida presenta grandes rizados, lo cual se hace necesario utilizar filtros para mitigarlos.

Existen rectificadores controlados y no controlados; este control se puede lograr de diferentes formas y una de ellas es con un convertidor CD-CD. Este tipo de conversión permite ir de una fuente de voltaje fijo CD a una variable también en CD.

Estos convertidores CD-CD tienen múltiples aplicaciones, entre ellas las fuentes de poder en computadoras, sistemas distribuidos de potencia, sistemas de potencia en vehículos eléctricos, etc. Las configuraciones básicas son tres: Buck (reductor), Boost (elevador) y Buck-Boost (elevador/reductor). Estas configuraciones permiten elevar, reducir o elevar/reducir el voltaje de alimentación en la salida. Cada configuración a su vez contiene cuatro elementos básicos: bobina, capacitor, diodo y un interruptor controlado; así las propiedades de cada topología dependen de la ubicación de estos cuatro elementos. [1]

En el siguiente trabajo de investigación se presenta el diseño, simulación e implementación de un rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos, analizando las variables de entrada, salida y control del mismo.

RESUMEN

Este proyecto de investigación consiste en el diseño, simulación e implementación de un rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos, analizando el comportamiento de las variables obtenidas.

En primera instancia se contempla la revisión bibliográfica de las topologías que permitan diseñar un sistema de conversión CA/CD para obtener una base fundamentada y proceder a realizar el diseño completo del sistema.

Continuando con el proceso se realiza la respectiva simulación en la herramienta SIMULINK de MATLAB, con el fin de facilitar el análisis del sistema, ya que proporciona un entorno gráfico y numérico de los valores y variables, a su vez se seleccionan las protecciones que se le incluirán y se diseña el algoritmo de control.

Posteriormente, para efectos de pruebas se procede a realizar el montaje en protoboard, comprobando su correcto funcionamiento y luego poder realizar la construcción completa de equipo. Finalmente se realizan las pruebas y análisis de variables obtenidas del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos. Cabe resaltar que la conversión es de corriente alterna trifásica a corriente directa.

ABSTRACT

This research project consists in the design, simulation and implementation of a controlled rectifier with CD-CD converter of reduced elements, analyzing the behavior of the obtained variables.

In the first instance, the bibliographic revision of the topologies that allow the design of a CA/CD conversion system to obtain a well-founded base and proceed to carry out the complete design of the system is contemplated.

Continuing with the process, the respective simulation is carried out in the SIMULINK tool of MATLAB, in order to facilitate the analysis of the system, since it provides a graphic and numerical environment of the values and variables, in turn the protections that are selected are selected the control algorithm will be included and designed.

Subsequently, for testing purposes, the protoboard assembly is carried out, checking its correct operation and then being able to carry out the complete construction of the equipment. Finally the tests and analysis of variables obtained from the controlled rectifier with CD-CD converter of reduced elements are carried out. It should be noted that the conversion is three-phase alternating current to direct current.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Diseñar e implementar un rectificador controlado con convertidor DC/DC de elementos reducidos.

Objetivos específicos

- Determinar la topología del rectificador trifásico y del convertidor CD-CD de elementos reducidos.
- Diseñar las etapas de potencia, acople y control del sistema del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos.
- Simular el sistema CA/CD de elementos reducidos.
- Implementar el sistema de rectificador controlado con convertidor DC/DC de elementos reducidos.
- Validar el funcionamiento del sistema.

JUSTIFICACIÓN

La generación de energía eléctrica se realiza a través de alternadores, esta energía puede ser transferida a cargas que requieren corriente directa mediante un convertidor CA/CD, lo que lo hace indispensable cuando se manejen dichas cargas o equipos. En el programa de ingeniería eléctrica de la universidad de Pamplona no existe un equipo de conversión controlado CA/CD, ni una fuente directa de alta corriente que permita hacer pruebas en las prácticas e investigaciones, lo que genera una necesidad para ampliar conocimientos, actualización tecnológica y avanzar en la mejora continua.

Debido a esto, este proyecto de investigación busca diseñar e implementar un equipo rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos; gracias a la implementación de este tipo de herramientas los estudiantes tendrán la capacidad mejorar las técnicas de estudio, es decir, además de la teoría poder hacer prácticas reales, realizar pruebas que anteriormente no se han podido realizar, utilizar el equipo para investigaciones, análisis y aplicaciones en todas las áreas del programa. Con este proyecto se beneficiará a los estudiantes del programa de ingeniería eléctrica, docentes y personas interesadas en el tema.

ACOTACIÓN

La potencia nominal y rangos de voltaje del equipo se definieron durante la realización del proyecto.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

Introducción

En el presente capítulo se plasmaron las revisiones bibliográficas de varias fuentes, tesis, artículos, libros, etc., donde se plantearon los conceptos necesarios para desarrollar y cumplir con los objetivos de este trabajo de investigación. Primeramente se describe todo lo relacionado a los convertidores CD-CD, los tipos, topologías y características que existen, además de las aplicaciones en donde éstos se encuentran; seguidamente el concepto de los rectificadores, los tipos que existen, las particularidades y aplicaciones.

1.1. CONVERTIDOR CD-CD

1.1.1. Definición

Los convertidores CD-CD son configuraciones de electrónica de potencia que permiten a partir de una fuente de CD constante, controlar el voltaje CD a la salida del convertidor. Este convertidor se puede considerar como el equivalente a un transformador de corriente alterna (CA) con una relación de vueltas que varía en forma continua. [2]

Estos se pueden dividir en tres bloques:

- **Comutación:** Se encarga de trocear la señal de entrada según la frecuencia y el ciclo de trabajo requerido. [2]
- **Acumulación de energía:** Depende estrictamente de la conmutación, ya que este determina cuándo se libera energía hacia la carga del sistema. [2]
- **Filtrado:** Se encarga de filtrar la señal conmutada. [2]

De manera general se tienen 2 métodos para controlar la potencia entregada por un convertidor:

- **Operación a frecuencia constante:** al mantenerse la frecuencia constante, se opta por variar el tiempo de encendido, de manera que se puede variar el ancho de pulso, también se le conoce como modulación por ancho de pulso (PWM). [3]
- **Operación a frecuencia variable:** en este caso el tiempo de encendido o el tiempo de apagado se mantiene constante, lo que varía es la frecuencia y es entonces cuando estamos modulando por frecuencia, sin embargo, su implementación produce armónicas a frecuencias impredecibles, lo cual dificultaría la implementación de un filtro. [3]

1.1.2. Aplicaciones

Los convertidores DC/DC son muy utilizados en la industria de amplio desarrollo tecnológico, gracias a sus numerosas ventajas en el área de conversión de potencia. Sus principales aplicaciones están orientadas a: [2]

- Fuentes de poder en computadoras
- Sistemas distribuidos de potencia
- Sistemas de potencia en vehículos eléctricos
- Tranvías eléctricos
- Sistemas de potencia fotovoltaicos
- Pilas de combustibles
- Grúas marinas
- Montacargas y elevadores de minas, etc. [2]

Estos describen una topología fácil de trabajar; sin embargo, su dinámica es muy compleja porque son sistemas de naturaleza no lineal, generalmente de fase no mínima, lo que dificulta el diseño de un control capaz de garantizar la estabilidad y las condiciones de operación consideradas durante el diseño frente a perturbaciones de carga o de línea. [2]

1.1.3. Tipos de convertidores CD – CD

Las configuraciones básicas son: Boost, Buck, Buck – Boost, Buck – Boost de componentes reducidas, Cuk y Cuk multinivel; estas configuraciones permiten elevar, reducir o elevar/reducir el voltaje de alimentación (V_s) en la salida (V_o).

Cada configuración a su vez contiene cuatro elementos básicos: bobina (L), capacitor (C), diodo y un interruptor controlado (Q); así las propiedades de cada topología dependen de la ubicación de estos cuatro elementos. [4]

Convertidor tipo Boost (Elevador)

El convertidor Boost, es un tipo de convertidor conmutado DC/DC también conocido por el nombre de convertidor elevador o chopper paralelo. La función de este convertidor es

mantener una tensión de salida regulada frente a variaciones de la tensión de entrada o de la carga. Su principal aplicación se halla en la fuente de alimentación conmutada (F.A.C.S.) y en el frenado regenerativo de los motores DC. [5]

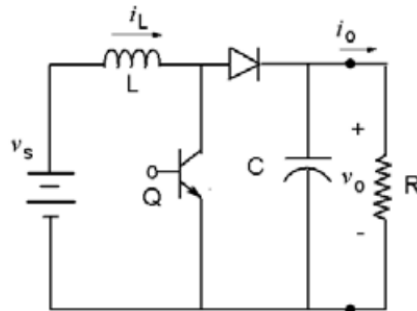


Figura 1. Esquema de convertidor CD-CD tipo Boost.

Funcionamiento de un convertidor Boost

En un regulador elevador, el voltaje promedio de salida V_o , es mayor que el voltaje de entrada V_s , de ahí su nombre. Se distingue dos modos de operación, según si la corriente por el inductor L se anula durante el periodo de operación T : MCC y MCD. [5]

En este convertidor, la energía que procede de la entrada V_s es conducida por el elemento de conmutación para ser almacenada en la bobina. Este almacenamiento de energía se efectúa durante el periodo de conducción del interruptor, no existiendo durante este intervalo ningún tipo de transferencia de energía a la carga. [5]

Cuando el conmutador se abre, la tensión que se produce en bornes de la bobina se suma a la tensión de la fuente obteniéndose una tensión de salida superior a esta última y con idéntica polaridad. Al mismo tiempo, la energía almacenada previamente por la bobina es transferida a la carga. [5]

Los modos de conducción son:

Modo de conducción continua (MCC)

El transistor conmuta periódicamente con una frecuencia de conmutación, por tanto, el circuito presentará dos topologías según el estado en que se encuentre el interruptor. [5]

En $t=0$ comienza a conducir el interruptor Q (“topología ON”), el circuito equivalente de esta topología está representado en la figura 2. [5]

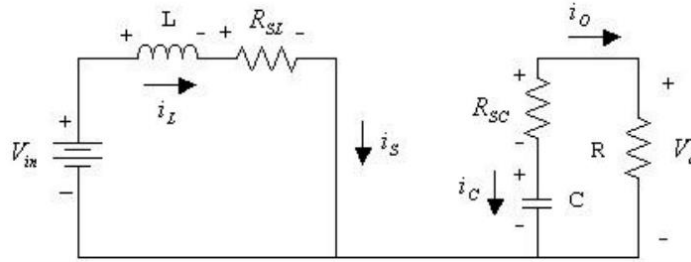


Figura 2. Convertidor Boost durante "topología ON"

Durante el "intervalo T_{ON} ", es decir $0 \leq t \leq T_{ON}$, en que el interruptor se halla en conducción ("ON"), por lo que solamente se establecerá flujo de corriente a través de la bobina, ya que el diodo se encuentra polarizado inversamente, por lo tanto, la corriente que pasará por él será prácticamente nula. [5]

A lo largo de este intervalo se producirá el almacenamiento de la energía en L. Por consiguiente, en bornes de la bobina resulta una diferencia de potencial constante de valor igual a la tensión de entrada V_{on} . [5]

Un tiempo T después el interruptor pasa a bloqueo ("topología OFF"). Se producirá una inversión de polaridad en la bobina, debido a la imposibilidad de variar bruscamente la intensidad que pasa por ella por lo que hace conducir al diodo D (diodo de marcha libre) manteniendo así la continuidad de la corriente por L. [5]

El nuevo circuito está representado en la figura 3.

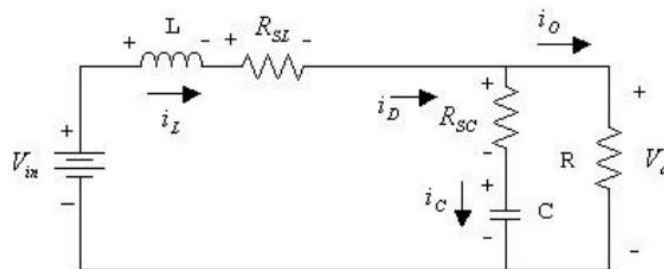


Figura 3. Convertidor Boost durante "topología OFF".

Ahora la bobina actúa como generador, sumándose su tensión a la tensión existente a la entrada del convertidor. El condensador se carga a través del diodo con una tensión de valor V_{on} menos la tensión inducida en la bobina. Por ello la corriente en la bobina es decreciente mientras el interruptor no entra nuevamente en estado de conducción. [5]

Gracias a dicha inversión de polaridad, la bobina actúa como receptor en el primer estado y como generador en el segundo. [5]

El filtro utilizado C, tiene como misión recibir la energía que previamente ha almacenado la bobina, manteniendo la tensión y corriente de salida durante todo el tiempo que la bobina no entrega energía a la salida. [5]

Modo de conducción discontinua (MCD)

El modo de conducción discontinua presenta tres topologías. Las dos primeras son iguales a las topologías presentadas para el modo de conducción continua, y la tercera se define cuando los dos elementos conmutadores diodo de marcha libre e interruptor, están bloqueados (OFF) a la vez. [5]

La tercera topología se debe a que la bobina tiene tiempo suficiente para descargar la energía almacenada. [5]

Se supone que la corriente se anula a partir de algún instante del intervalo $T_{ON} \leq t \leq T$, hasta $t=T$. En $t=0$ comienza a conducir el interruptor Q, el circuito resultante es el mismo que el representado en la figura 2. Un tiempo T después se desconecta el interruptor Q y conduce el diodo de marcha libre. El nuevo circuito es el representado en la figura 3. [5]

En el instante $t \leq T_{OFF}$ la corriente i_L se anula, el circuito resultante de esta nueva topología está representado en la figura 4. [5]

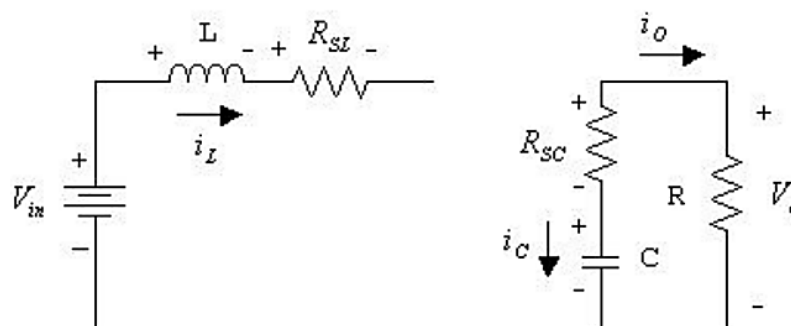


Figura 4. Convertidor Boost durante "topología $t \leq OFF$ "

Convertidor tipo Buck (Reductor)

El convertidor Buck, es un tipo de convertidor conmutado DC/DC también conocido por el nombre de convertidor reductor. La función de este convertidor es mantener una tensión de salida inferior a la de entrada regulada frente a variaciones de la tensión de entrada o de la carga. En la figura 5, se muestra el esquema del convertidor Buck, este circuito convertidor consiste en un interruptor controlado, un diodo, un inductor y un circuito de filtrado, es decir el condensador y la resistencia de carga. [5]

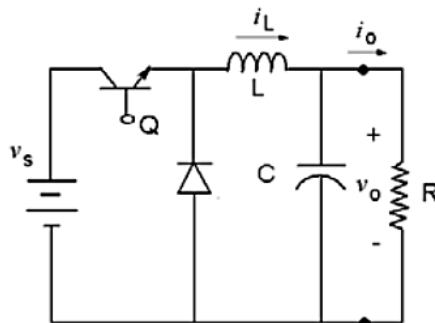


Figura 5. Esquema convertidor CD-CD tipo Buck

Este convertidor forma parte de la familia de los convertidores de segundo orden, ya que en él se encuentran dos elementos almacenadores de energía. [5]

1.1.3.2.1 Funcionamiento de un convertidor Buck

En un regulador reductor, el voltaje promedio de salida V_0 , es menor que el voltaje de entrada V_s , de ahí su nombre. [5]

El interruptor Q conmuta a una frecuencia de conmutación $f=1/T$. Se distingue dos modos de operación según si la corriente por el inductor L se anula durante el periodo de operación T o si por el contrario se mantiene a un valor de corriente $I_{L(MIN)}$. [5]

1.1.3.2.1.1 Modo de conducción continua (MCC)

En este modo de funcionamiento la intensidad que fluye por el inductor fluctúa entre unos valores máximo y mínimo, pero nunca llega a anularse. Esto, se debe a la relación entre el tiempo en el que el interruptor se encuentra cerrado, y el tiempo necesario para que la bobina descargue totalmente la energía almacenada previamente.

En $t=0$ comienza a conducir el interruptor Q (primera topología), el circuito equivalente de esta topología está representado en la figura 6. Como la tensión de salida V_o es menor que la tensión de entrada V_s , la corriente por inductor L será creciente durante este intervalo. La corriente que circula por el interruptor es igual a la de L. [5]

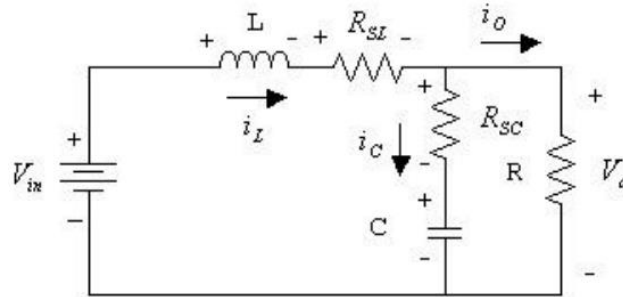


Figura 6. Convertidor Buck durante "topología ON"

Durante el intervalo de tiempo en que el interruptor se halla en conducción, es decir "ON", y el diodo se halla en corte, "OFF", se dice que el convertidor se encuentra en la "topología ON". [5]

Esta topología se cumplirá durante el intervalo $0 \leq t \leq T$, donde T es el ciclo de trabajo. De ahí que dicho intervalo sea conocido como el "intervalo T_{ON} ", es decir $0 \leq t \leq T_{ON}$.

Un tiempo T después se desconecta el interruptor Q (Segunda topología). Se genera entonces una sobretensión que hace conducir al diodo D (diodo de marcha libre) manteniendo así la continuidad de la corriente por L. [5]

El nuevo circuito está representado en la figura 7. La corriente por el inductor es ahora decreciente, por lo que se abate hasta que el siguiente ciclo el interruptor se vuelve a activar. [5]

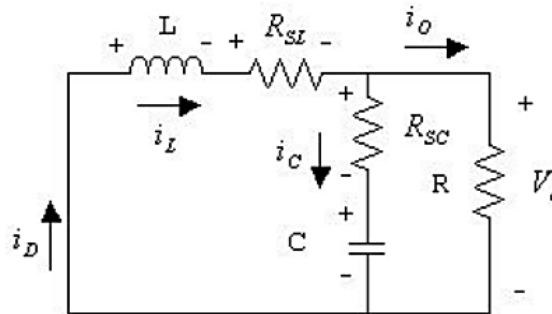


Figura 7. Convertidor Buck durante "topología OFF"

Durante el intervalo de tiempo en que el interruptor se halla desconectado, es decir “OFF”, y el diodo de marcha libre se halla en conducción, “ON”, se dice que el convertidor se encuentra en la “topología OFF”. [5]

1.1.3.2.1.2 Modo de conducción discontinua (MCD)

El modo de conducción discontinua presenta tres topologías. Las dos primeras son iguales a las topologías presentadas para el modo de conducción continua, y la tercera se define cuando los dos elementos conmutadores diodo de marcha libre e interruptor, están bloqueados (OFF) a la vez. [5]

La tercera topología se debe a que la bobina tiene tiempo suficiente para descargar la energía almacenada. [5]

Se supone que la corriente se anula a partir de algún instante del intervalo $T_{ON} \leq t \leq T$, hasta $t=T$. En $t=0$ comienza a conducir el interruptor Q, el circuito resultante es el mismo que el representado en la figura 6. Un tiempo T después se desconecta el interruptor Q y conduce el diodo de marcha libre. El nuevo circuito está representado en la figura 7. [5]

En el instante $t \leq T_{OFF}$ la corriente i_L se anula, el circuito resultante de esta nueva topología está representado en la figura 8. [5]

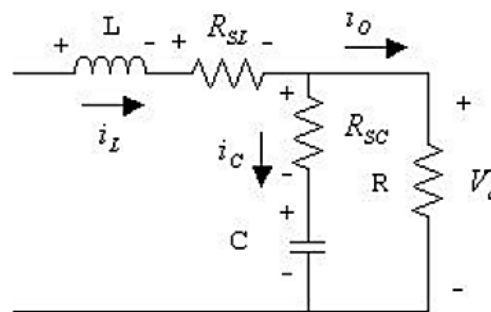


Figura 8. Convertidor Buck durante "topología $t \leq OFF$ "

1.1.3.2. Convertidor tipo Cuk

El convertidor Cuk, es un tipo de convertidor conmutado DC-DC perteneciente a la familia de convertidores de cuarto orden. Este convertidor suministra un voltaje de salida que puede ser menor o mayor que el voltaje de entrada, la polaridad del voltaje de salida es opuesta a la del voltaje de entrada. Este regulador también se conoce como regulador inversor. [5]

En este convertidor se pueden apreciar la existencia de dos condensadores (C_1 , C_2) y de dos inductores (L_1 , L_2). Los subíndices 1 hacen referencia a los elementos almacenadores de la entrada, y por lo contrario el subíndice 2 hace referencia a los de la salida. La función de este convertidor es mantener una tensión de salida regulada frente a variaciones de la tensión de entrada o de la carga. [5]

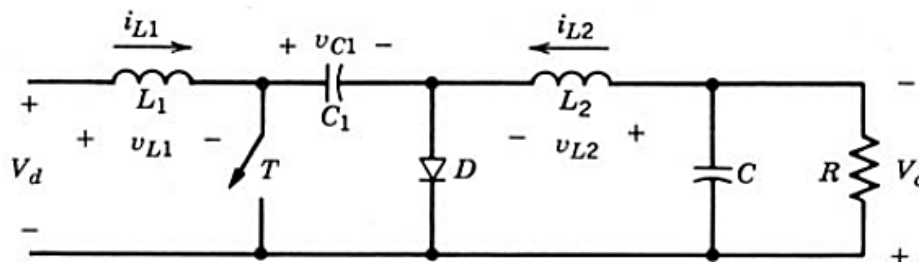


Figura 9. Esquema de un convertidor Cuk

1.1.3.3.1 Funcionamiento básico del convertidor cuk

Un convertidor Cúk suministra un voltaje de salida que puede ser menor o mayor que el voltaje de entrada, la polaridad del voltaje de salida es opuesta a la del voltaje de entrada. Este también se conoce como inversor. [5]

Cuando el interruptor S se cierra, la fuente de entrada V_{in} se conecta a la bobina L_1 , al mismo tiempo que el diodo D queda polarizado inversamente. Como consecuencia de esto, la intensidad que circula por la inductancia L_1 crece linealmente, almacenando energía. Transcurrido T_{ON} , el interruptor se abre, con lo que la energía almacenada previamente en la bobina L_1 junto con la de entrada se transfiere al condensador de entrada C_1 . Durante este intervalo, T_{OFF} del convertidor, la fuente no suministra ningún tipo de energía a la salida. Por el contrario esta situación hace que el inductor L_2 permita la circulación de corriente en el mismo sentido, hacia el condensador C_2 y la carga. [5]

Se distingue al igual que en los convertidores anteriores, dos modos de operación, según las corrientes por los inductores se anulen durante el periodo de operación T: MCC y MCD. [5]

1.1.3.3.1.1 Modo de conducción continua (MCC): Al igual que el regulador Buck-Boost (Reductor-elevador), el regulador Cúk proporciona un voltaje de salida que puede ser menor o mayor, siendo la polaridad del voltaje de salida opuesta a la polaridad del voltaje de entrada. [5]

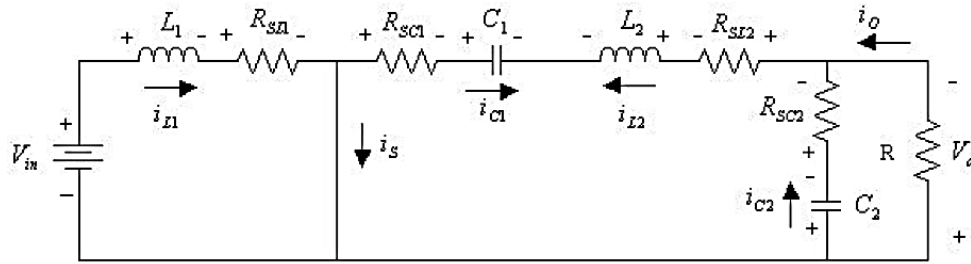


Figura 10. Convertidor Cuk durante "topología ON"

En $t=0$ comienza a conducir el interruptor S ("topología ON"), el circuito equivalente de esta topología está representado en la figura 14. [5]

Durante el "intervalo T_{ON} ", es decir $0 < t < T_{ON}$, en que el interruptor se halla en conducción ("ON") y el diodo D tiene polarización inversa, por lo que la corriente se eleva a través del inductor L_1 . [5]

Simultáneamente, el voltaje del capacitor C_1 pone en polarización inversa al diodo D y lo desactiva. El capacitor C_1 descarga su energía en el circuito formado por C_1 , C_2 , la carga y L_2 . [5]

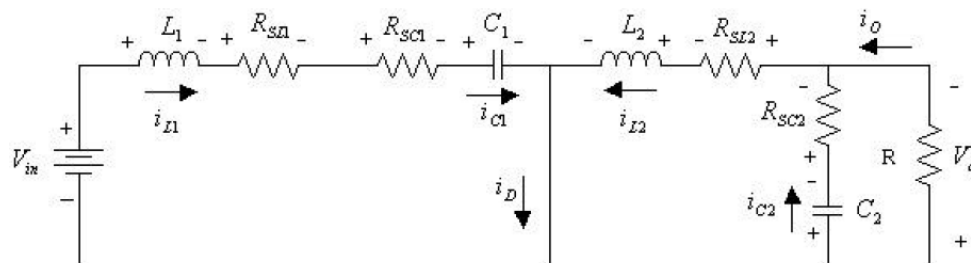


Figura 11. Convertidor Cuk durante "topología OFF"

La "topología OFF" empieza cuando se desconecta el interruptor, cuyo circuito se representa en la figura 16. Se carga el capacitor C_1 a partir del suministro de entrada y la energía almacena en el inductor L_2 se transfiere a la carga. [5]

El diodo D y el interruptor proporcionan una conmutación sincrónica. El capacitor C_1 es el medio para la transferencia de energía de la fuente a la carga. [5]

1.1.3.3.1.2. Modo de conducción discontinua (MCD)

El modo de conducción discontinua presenta tres topologías, igual que los convertidores anteriores. Las dos primeras son iguales a las topologías presentadas para el modo de

conducción continua, y la tercera se define cuando los dos elementos conmutadores diodo de marcha libre e interruptor, están bloqueados (OFF) a la vez. [5]

La tercera topología se debe a que las dos bobinas tienen tiempo suficiente para descargar la energía almacenada. Por lo tanto la condición para que esta tercera topología ocurra es cuando la suma de las corrientes de los inductores se hagan cero. [5]

Supondremos que la suma de las corrientes se anula a partir de algún instante del intervalo $T_{ON} < t < T$, hasta $t=T$. En $t=0$ comienza a conducir el interruptor S, el circuito resultante es el mismo representado en la figura 14. Un tiempo dt después se desconecta el interruptor S y conduce el diodo de marcha libre. El nuevo circuito es el representado en la figura 15. [5]

En el instante $t=t_{off}$ la suma de las corrientes $i_{L1} + i_{L2}$ se anula, por lo que el circuito resultante de esta nueva topología está representado en la figura 16. [5]

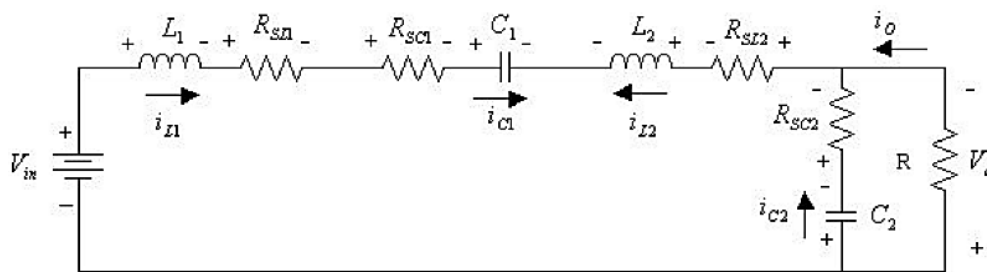


Figura 12. Convertidor Cúk durante "Topología OFF"

1.1.3.3. Convertidor tipo Buck-Boost de elementos reducidos

Este convertidor puede ser controlado con dos señales PWM, y puede ser usado como un convertidor reductor o elevador cuando sea requerido. De esta forma este convertidor da la posibilidad de controlar un amplio rango de tensión a la entrada para dar una tensión constante en la salida. [6]

1.1.3.4.1 Diagrama circuital

En la figura 1 se muestra el esquema del convertidor elevador reductor; en donde se observan los componentes, dos interruptores de potencia, controlados por dos PWM distintas, dos diodos de circulación y un solo condensador. [6]

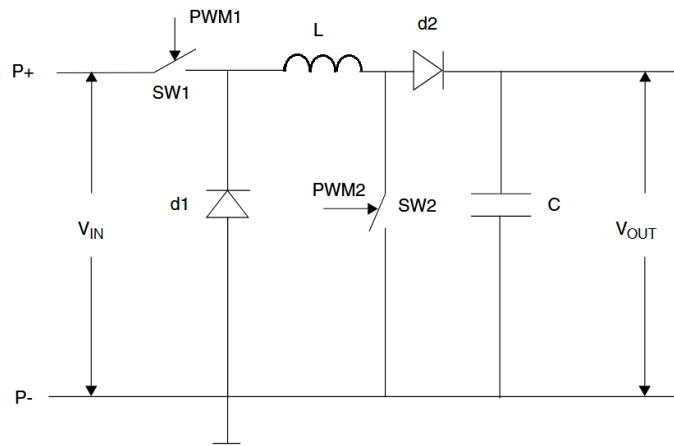


Figura 13. Esquema del convertidor elevador-reductor

1.1.3.4.2 Modos de operación

Este convertidor se puede usar como elevador reductor, como solo elevador o solo reductor seleccionando diferentes combinaciones de los switches SW1 y SW2, manejados a través de las señales PWM dadas por el control. El convertidor puede operar en los diferentes modos de acuerdo a los modos descritos por la tabla 1. [6]

Tabla 1. Descripción de los modos de operación del convertidor

Modo	SW1(PWM 1)	SW2(PWM 2)	Modos de operación
1	OFF	OFF	Reductor
2	OFF	ON	No
3	ON	OFF	reductor elevador
4	ON	ON	elevador

Si se observa la tabla 1, el modo 2, nunca ocurre ya que esta condición deshabilita el SW1, lo cual desconecta todo el convertidor y si SW2 está en on esto corto circuita el inductor. Así que esta condición nunca debe existir en el software que controla el convertidor. [6]

Si ambos switches están en off inicialmente, se debería usar la siguiente guía para manejar las señales PWM de los dos interruptores.

1. Las frecuencias de ambas PWM deben ser iguales.

2. El ciclo de trabajo D1 de la señal de control PWM1 debe ser más grande que el ciclo de trabajo de la señal PWM2, es decir D2.
3. PWM1 debería ser habilitada antes de PWM2.
4. PWM1 debería se deshabilitada después de PWM2.

Estas condiciones se muestran en la figura 2. En donde también se observan los diferentes modos de trabajo del convertidor.

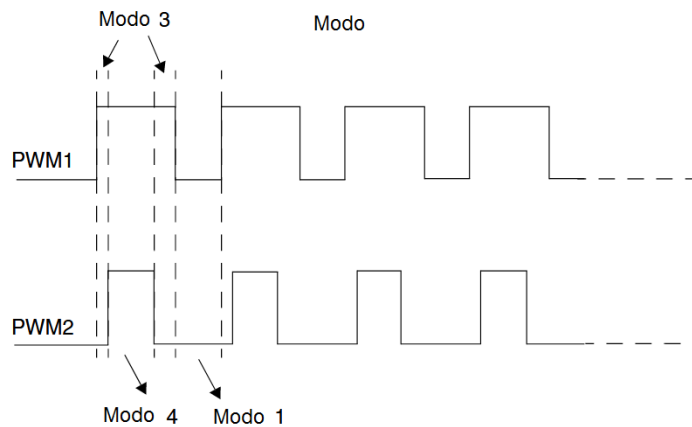


Figura 14. Modos de operación del convertidor elevador-reductor

La figura 2 muestra un ejemplo de cómo se deben manejar las dos señales PWM, con el fin de que el modo 2 nunca ocurra, para esto se sigue los cuatro pasos de la guía. [6]

Si el ciclo de trabajo de PWM1 es D1 y el ciclo de trabajo PWM2 es D2, si no se tiene en cuenta el voltaje de saturación de los interruptores, y si la caída de tensión en los diodos son respectivamente VD1 y VD2, el voltaje de salida del convertidor estará dado por la expresión 1:

$$V_{out} = \frac{V_{in} * D1 - VD1 * (1 - D1)}{1 - D2} - VD2 \quad (1)$$

Como se menciona en la referencia [2], teóricamente este convertidor puede operar de forma lineal sobre un rango de 0 a 200% del voltaje de entrada.

1.1.3.4.2 Modo de operación reductor

Si el interruptor SW2 siempre está apagado y el interruptor SW1 opera con una señal PWM1 proveniente del control, entonces el convertidor se comportará como un convertidor reductor. Excepto que se ha adicionado una caída de tensión V_{D2} a través del diodo D2. El esquema del circuito será el mostrado en la figura 15. [6]

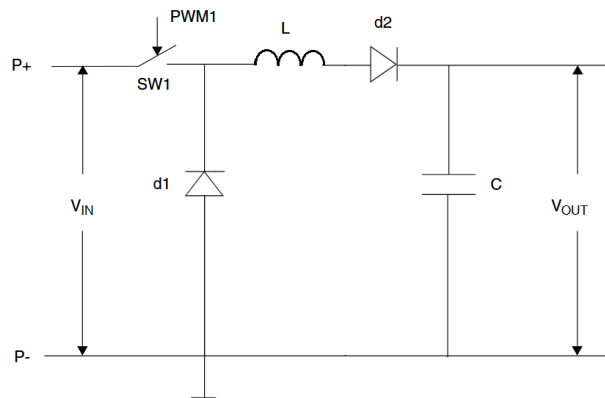


Figura 15. Modo de operación 1, del convertidor elevador-reductor

Si el ciclo de trabajo es $D1$, el voltaje de salida del convertidor se puede calcular según la expresión 2:

$$V_{out} = V_{in} * D1 - V_{D1} * (1 - D1) - V_{D2} \quad (2)$$

1.1.3.4.3 Modo de operación Elevador

Si el interruptor SW1 siempre está encendido y el interruptor SW2 opera con una señal PWM2, proveniente del control, entonces el convertidor se comportará como un convertidor elevador, exceptuando que se añade un diodo de libre circulación D1, que se puede ignorar. El esquema del circuito será el mostrado en la figura 4.

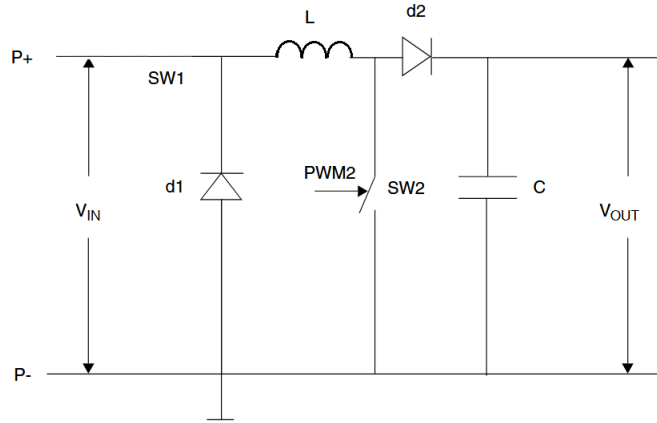


Figura 16. Modo de operación 3, del convertidor elevador-reductor

Si la entrada de voltaje en V_{in} , el ciclo de trabajo de la señal PWM2 que controla el interruptor 2 es $D2$ y el voltaje que se cae en el diodo 2 es V_{D2} , el voltaje de salida se expresa según la ecuación 3:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D2} - V_{D2} \quad (3)$$

1.1.3.4.4 Modo de operación 4

Si el interruptor SW1 se controla con la señal PWM1 y el interruptor SW2 opera con una señal PWM2, provenientes ambas señales del control, entonces el convertidor se comportará como un convertidor elevador reductor. El esquema del circuito es el mostrado en la figura 17.

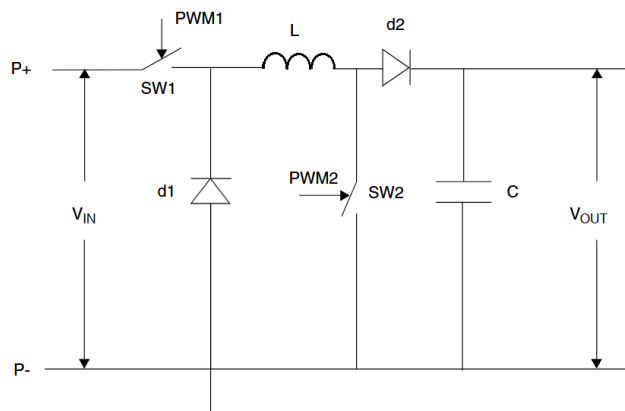


Figura 17. Esquema del convertidor elevador-reductor

Donde el voltaje de salida será el expresado en la ecuación 1. Este modo se utiliza en aplicaciones en donde la corriente ser mantenida constante, como en cargadores de baterías de Li-ion.

El convertidor reductor elevador trabaja en modo 4 para cargar la batería de forma tal que se mantenga la corriente constante, para esto mantiene el ciclo de trabajo de PWM2 constante y varía el ciclo de trabajo de PWM1. [6]

1.2. RECTIFICADORES CA/CD

En la mayoría de aplicaciones de electrónica, la entrada que está en forma de voltaje alterno obtenido del Sistema de distribución publica, deber ser convertida en voltaje continuo.

Para esto se emplean los rectificadores. Estos también son llamados convertidores CA/CD.

1.2.1. Definición

Un rectificador CA/CD convierte la tensión alterna en continua, deben tomarse en cuenta otros aspectos para poder seleccionar y utilizar correctamente estos circuitos, debido a que en la práctica la tensión de salida en un convertidor CA-CD no es totalmente continua. Los convertidores CA-CD presentan diferentes topologías en función de las características de las tensiones de entrada y salida. [7]

Si la tensión alterna de entrada tiene una frecuencia y valor eficaz constante, y se pretende conseguir una tensión continua de salida en todo momento, es conveniente utilizar rectificadores no controlados, sin embargo, si la salida debe ser ajustada a diferentes valores, el rectificador debe tener algún tipo de control, por lo tanto debe usarse un convertidor controlado. [7]

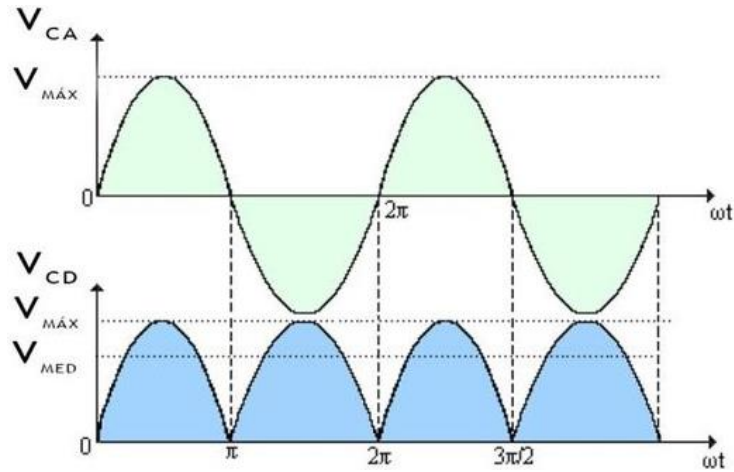


Figura 18. Rectificador de onda completa

1.2.2. Clasificación de los rectificadores CA/CD

Para la clasificación de estos dispositivos se utilizan diversos criterios: [8]

- En función del número de fases de la fuente alterna
- En función de la posibilidad de control
- En función de la estructura del convertidor

1.2.2.1. En función del número de fases de la fuente de alterna: [8]

a) Rectificador monofásico:

Como su nombre lo indica proviene de una fuente de una sola fase. En la figura 19 se puede observar la topología que presenta este tipo de rectificación.

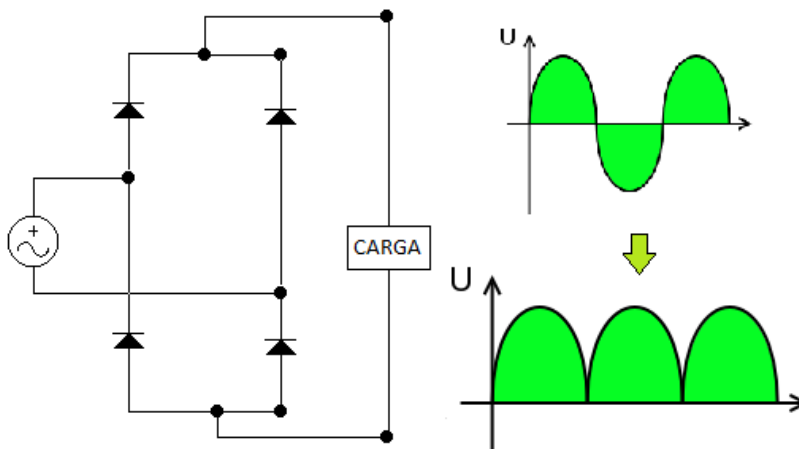


Figura 19. Rectificador monofásico de onda completa

b) Rectificador trifásico:

Este tipo de rectificación proviene de una fuente de tres fases o trifásica. En la figura 20 se puede observar la topología que tiene este tipo, el sistema se conforma de 6 diodos que se encargan de rectificar la señal trifásica.

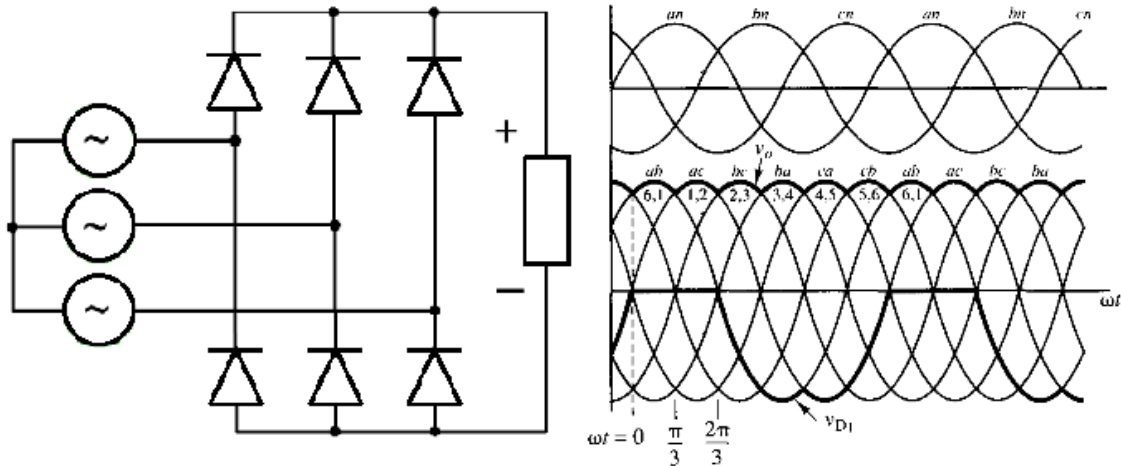


Figura 20. Rectificador trifásico de onda completa

c) Rectificador hexafásico

En la figura 21 se puede observar la topología de un rectificador de 6 fases o hexafásico.

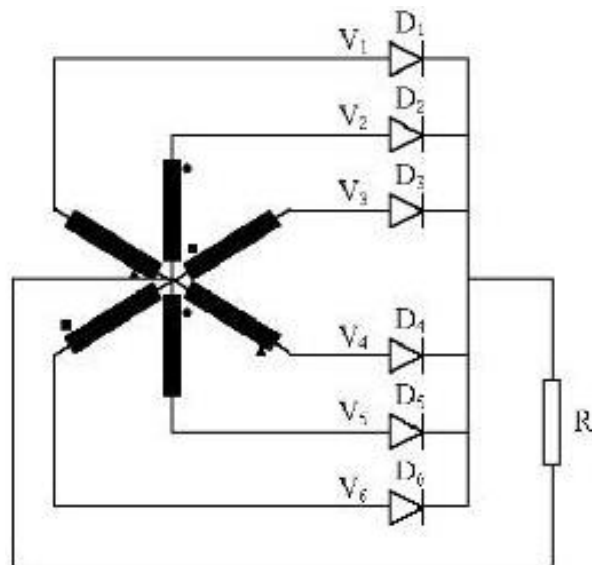


Figura 21. Rectificador hexafásico

1.2.2.2. En función de la posibilidad de control:

1.2.2.2.1. Rectificador trifásico no controlado:

No se puede controlar la magnitud de la tensión continua, que será siempre fija. Se construyen con diodos. [8]

Estos rectificadores de onda completa son circuitos utilizados para transformar una señal de entrada de voltaje alterno en una señal de salida de voltaje continuo pulsante. En este caso, la parte negativa de la señal se transforma en positiva o bien la parte positiva de la señal se transforma en negativa. [9]

Según la ley de Kirchhoff para la tensión aplicada, solamente conduce un diodo a la vez, es decir, los diodos D1, D3, y D5. Por tal razón en un tiempo t el diodo en estado de conducción tendrá su ánodo conectado a la fase de mayor magnitud. Así mismo en la mitad inferior, es decir, los diodos D2, D4 y D6 se muestra que solo puede conducir un diodo a la vez cuando su cátodo tenga conectada la fase de menor valor en ese instante. [10]

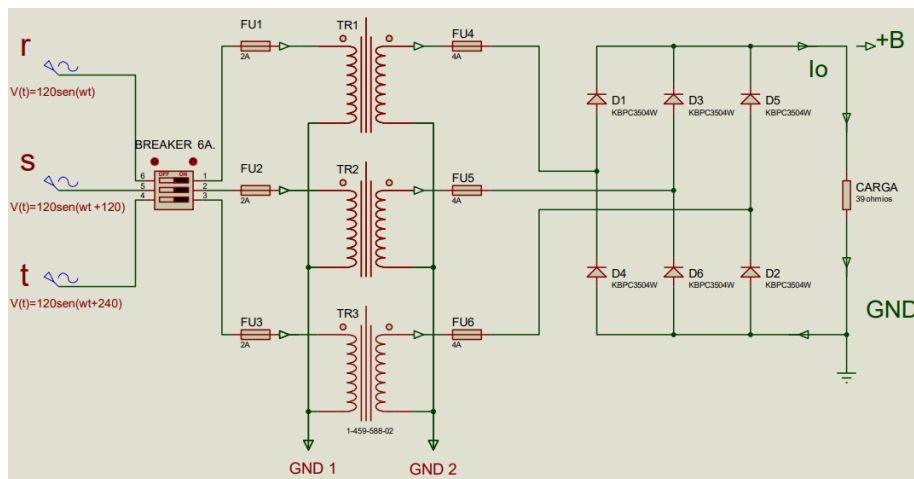


Figura 22. Rectificador trifásico de onda completa no controlado.

1.2.2.2.2. Rectificador trifásico controlado:

Se puede regular la magnitud de la tensión CC mediante el control de la zona de conducción de los semiconductores de cada fase. Tradicionalmente se construyen con tiristores de los que se controla el instante de comienzo de conducción (control por fase). La extinción se

produce de forma natural: cuando pasa la corriente por cero o cuando se dispara el tiristor de otra fase hacia el que se desvía la corriente continua. [8]

En estos rectificadores se permitirá la regulación del valor de la tensión en la carga. El cambio del diodo por el tiristor retrasa la entrada en conducción, lo cual sucede no sólo cuando el voltaje es positivo sino también cuando se inyecta un pulso a la puerta del tiristor. [10]

Como principio de funcionamiento se disparan los tiristores con cierto ángulo con relación al punto natural de conmutación o también llamado paso por cero de entrada, con esto se obtiene usar el voltaje de la fuente sobre la carga en un tiempo variable, que depende mucho de disparo, por tal razón se obtiene alterar los valores de la tensión en la carga.

El ángulo de disparo α , es el intervalo en el cual se polariza en directa el SCR y el momento de aplicación de la señal de puerta. Se debe mantener la excitación de puerta hasta que el tiristor alcance la conducción. En este evento es más recomendable utilizar un tren de impulsos. [9]

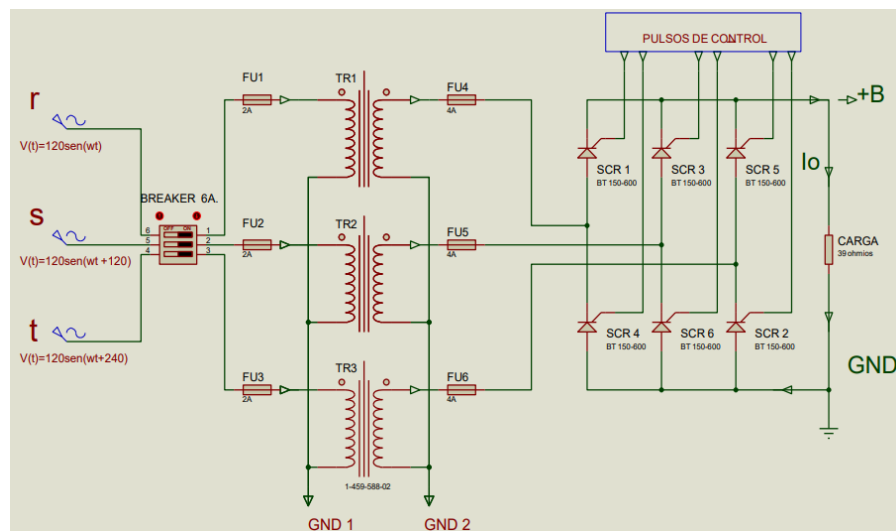


Figura 23. Rectificador trifásico de onda completa controlado

1.2.2.2.3. Rectificador trifásico semicontrolado

Se construyen de forma mixta con diodos y tiristores y pueden controlar la magnitud de la tensión continua de salida, aunque de manera menos flexible. [8]

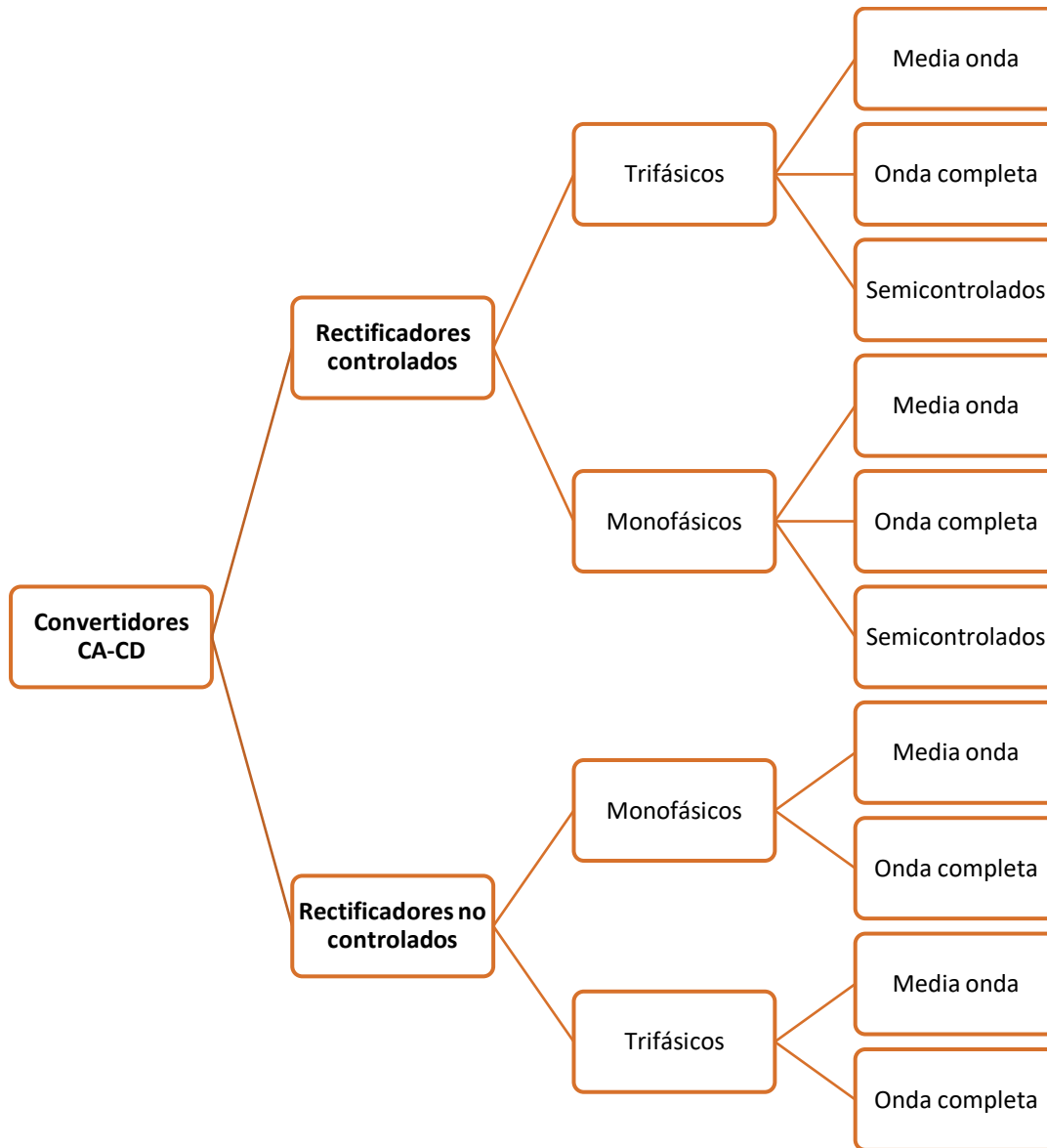


Figura 24. Clasificación de un rectificador trifásico [5]

1.2.2.3. En función de la estructura del convertidor:

- a) **En matriz de conversión:** Entre cada fase de entrada (alterna) y la salida (continua) existe sólo un único polo de potencia. [8]

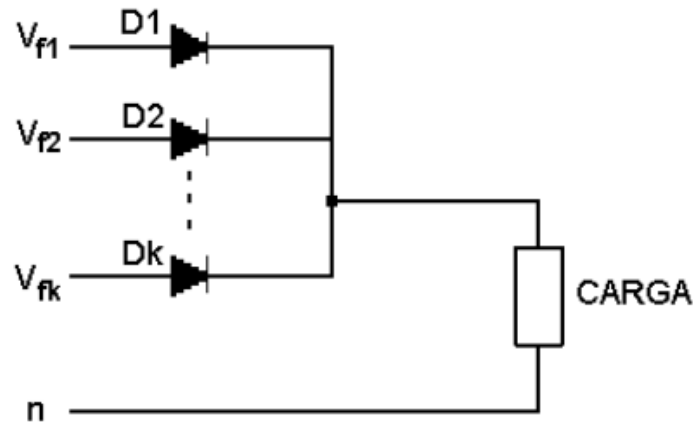


Figura 25. Rectificador en matriz de conversión.

b) **En puente:** La carga es alimentada por una matriz de conversión en cada extremo (una de ánodo común y otra de cátodo común). [8]

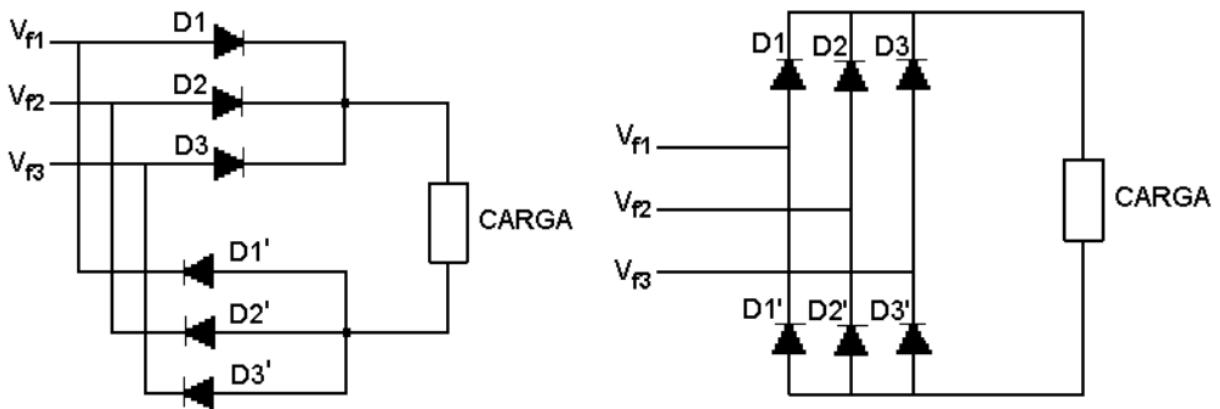


Figura 26. Rectificador trifásico en puente

La misión fundamental de un rectificador trifásico es proporcionar energía eléctrica en forma de corriente continua a partir de una fuente de corriente alterna. Principalmente, se requieren de tres características para un convertidor CA-CD de calidad: [7]

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

1.2.2.4. Aplicaciones de los rectificadores CA-CD

Una de las aplicaciones más importantes de los convertidores se encuentra en la variación de la velocidad de los motores de CD. Esto debido a que los motores de CD presentan varias ventajas respecto a los motores de CA. [7]

Por este motivo, es necesario regular el voltaje en CD, el cual puede ser controlado por medio de un convertidor CA-CD, para esto es necesaria la implementación de rectificadores controlados o semi-controlados. [7]

CAPÍTULO 2

TOPOLOGÍA DEL RECTIFICADOR TRIFÁSICO Y EL CONVERTIDOR CD-CD

Introducción

En esta sección se presenta la selección de las topologías a utilizar en el diseño del proyecto final, abarcando las razones por las cuales es viable su utilización. Este análisis es la base del proyecto, ya que a partir de ahí se tomarán los criterios a manejar, examinar, estudiar e implementar para el correcto funcionamiento. Como primera parte se escogerá el rectificador trifásico, teniendo en cuenta todos los componentes que este requiere y también sus diferentes configuraciones, luego se optará por el convertidor CD-CD, teniendo en cuenta que éste se encargará del control del todo el sistema, implicando así una mayor responsabilidad para su elección.

2.1. RECTIFICADOR TRIFÁSICO

La topología escogida para el diseño es un rectificador trifásico de onda completa y con estructura en puente no controlado como se muestra en la figura, este diseño es de uso común en aplicaciones de alta energía. Puede operar sin o con transformador y genera componentes ondulatorias de seis pulsos en el voltaje de salida. Los diodos están enumerados en orden de secuencia de conducción, cada uno de ellos conduce durante 120° . La secuencia de conducción de los diodos es 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6 y 6-1. [9]

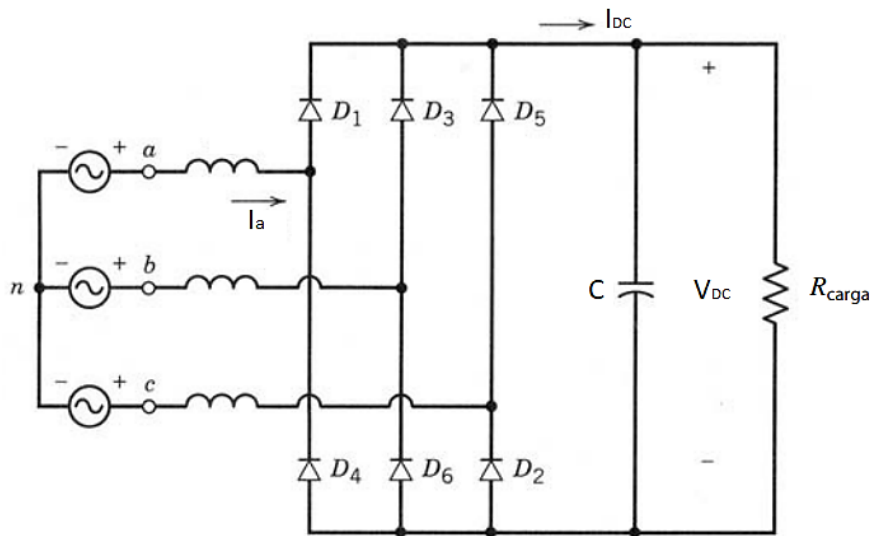


Figura 27. Diseño del rectificador trifásico

En aplicaciones industriales donde hay disponibilidad de voltajes de CA trifásicos, es preferible usar circuitos de rectificadores trifásicos en lugar de rectificadores monofásicos, por su menor contenido de ondulaciones en las formas de onda y una mayor capacidad de manejo de potencia. El rectificador trifásico de puente completo y seis impulsos que se muestra en la figura 1, es un arreglo de circuito de uso común. Un condensador de filtrado está conectado al lado de CC del rectificador. [10]

En la siguiente figura se puede observar las formas de onda y los tiempos de conducción de los diodos.

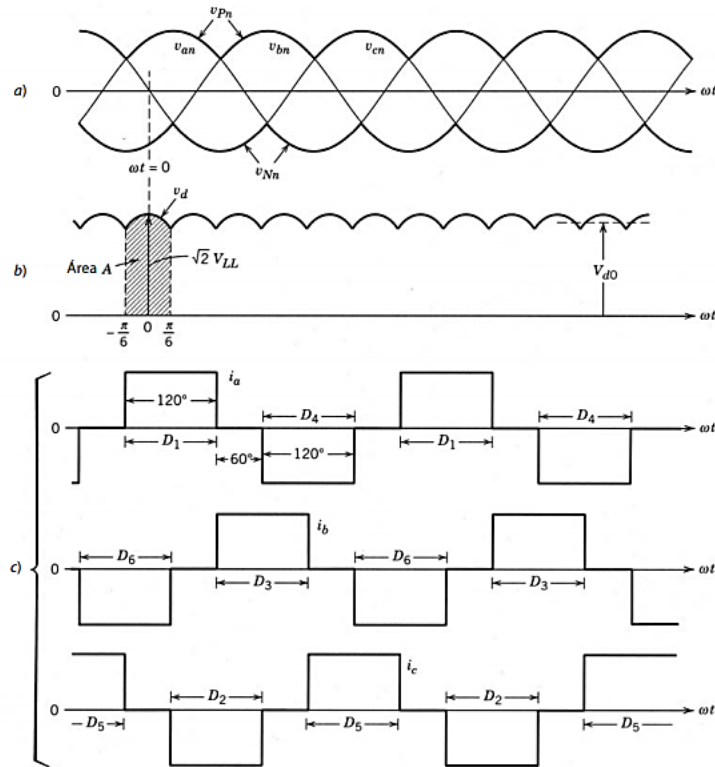


Figura 28. Diseño del rectificador trifásico

2.1.1. Componentes del rectificador trifásico

Entrada trifásica

La tensión de entrada es trifásica o de tres fases, es decir es formado por tres corrientes monofásicas de igual frecuencia y amplitud, solo que están desfasadas 120° eléctricos.

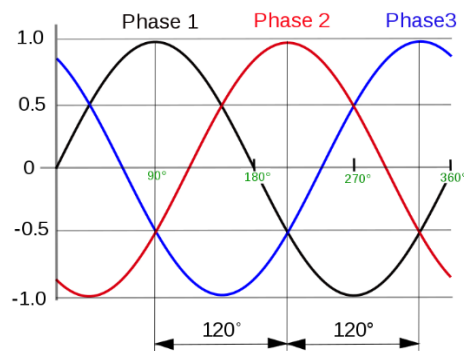


Figura 29. Sistema trifásico

Diodos rectificadores

Los diodos utilizados para el rectificador son los convencionales para rectificar rectificadores, solo que estos deben estar bajo las condiciones de voltaje y corriente que se requiera.

En este caso la rectificación será de onda completa, por lo tanto se aprovechan ambos semiciclos de corriente alterna y obtener corriente directa. Además como el sistema es trifásico se requieren de 6 diodos tal como se muestra en la figura 27.

Filtro capacitivo

El rectificador trifásico por el que se optó cuenta con un capacitor que funciona como un filtro para disminuirle el rizado a la señal de salida. Esta etapa es muy importante ya que la tensión obtenida después de este proceso es la de entrada del convertidor CD-CD, por lo que debe ser lo mejor filtrada posible para el buen funcionamiento del convertidor y por ende del control, así obteniéndose a la salida del sistema un voltaje en directa regulado y en las mejores condiciones, preservando los dispositivos que se conecten a este.

2.2 Convertidor CD-CD

La topología del convertidor CD-CD será elevador reductor no inversor, el cual requiere un solo inductor, este convertidor es el encargado del control del sistema mediante señales de modulación de ancho de pulso PWM. Este convertidor es básicamente la conexión en cascada de un convertidor reductor con un convertidor elevador, el cual requiere un solo inductor. [6]

Este convertidor puede ser usado como un convertidor reductor o elevador cuando sea requerido. De esta forma este convertidor da la posibilidad de controlar un amplio rango de tensión a la entrada para dar una tensión constante en la salida. [6]

2.1.1. Diagrama circuital

En la figura 23 se muestra el esquema del convertidor elevador reductor; en donde se observan los componentes, dos interruptores de potencia, controlados por dos PWM distintas, dos diodos de circulación y un solo condensador. [11]

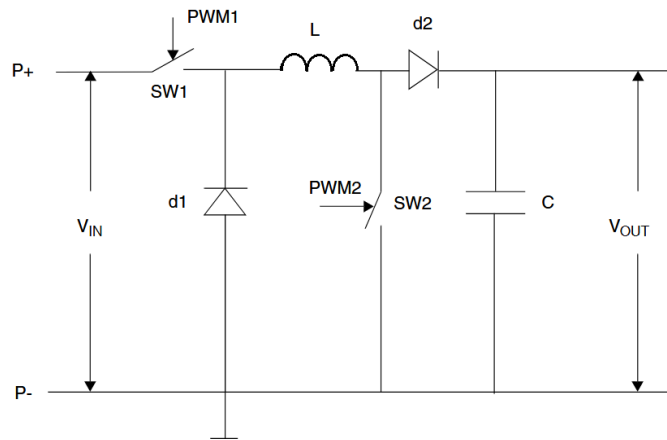


Figura 30. Diagrama circuital del convertidor CD-CD

Entrada en CD

El voltaje de entrada del convertidor CD-CD es el que resulta después de la rectificación trifásica ocurrida antes, éste voltaje debe ser lo más lineal posible, esto se logra gracias a un proceso de rizado.

SW1 y SW2

Los interruptores 1 y 2 son los encargados del control mediante señales PWM, los cuales tendrán como función conectar o desconectar el circuito según se requiera, es decir, si se necesita el sistema como elevador o como reductor.

En este caso los interruptores serán transistores tipo MOSFET, éstos poseen 3 terminales: Gate, Drain y source (compuerta, drenaje y fuente), es este caso se optará por el MOSFET de canal P.

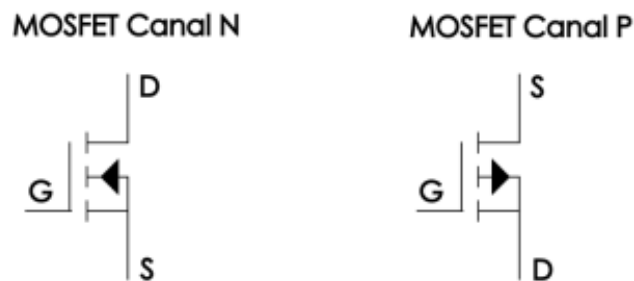


Figura 31. Tipos de MOSFET

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL SISTEMA

Introducción

En el siguiente capítulo se realiza el diseño completo del sistema. Como primer paso se realiza el diseño del rectificador, desde el esquemático, cálculos de los componentes que lo conforman, hasta el diseño del circuito impreso. Seguidamente el diseño del convertidor CD-CD, los cálculos de los elementos que lo conforman, la programación para el control y el circuito impreso.

Todo esto mediante en el software electrónico Proteus, donde se realizó la construcción del diseño esquemático y la construcción de la placa del circuito impreso; la programación se realiza en la plataforma Arduino, éste incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines hembra que permiten establecer conexiones entre éste y el convertidor CD-CD.

Diseño del prototipo

El diseño completo del sistema es el acople del rectificador trifásico con el convertidor CD-CD, incluyendo el control para la tensión a la salida con PWM y reguladores de tensión para alimentar los drivers necesarios.

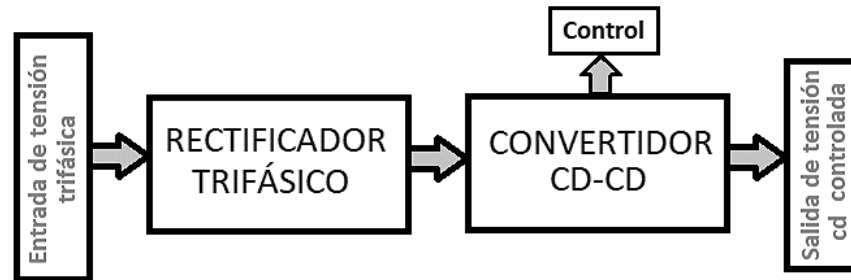


Figura 32. Diseño del sistema, Rectificador-convertidor

3.1. CONVERTIDOR CD-CD

3.1.1. Selección de componentes

La selección de componentes del convertidor se debe realizar teniendo en cuenta las siguientes especificaciones.

Selección del inductor

El mínimo valor para el inductor puede ser seleccionado, escogiendo el valor más grande de las ecuaciones 5 y 6:

$$L_{min} = T * \frac{[(V_{in} - V_{sat1}) * D1 - V_{sat2} * D2 - V_{out} * (D1 - D2)]}{2 * I_{out}} \quad (5)$$

$$L_{min} = T * \frac{[VD1 + V_{out}] * (1 - D1)}{2 * I_{out}} \quad (6)$$

Donde V_{sat1} y V_{sat2} son los voltajes de saturación de los interruptores SW1 y SW2 respectivamente. I_{out} y V_{out} son los valores máximos de salida de la corriente y el voltaje. $VD1$ y $VD2$ son las caídas de tensión a través de los diodos D1 y D2 respectivamente.

Selección del capacitor

El mínimo valor del capacitor puede ser seleccionado utilizando la expresión 7, para esto se asume que la variación de la tensión de salida debe ser igual o menor al 1%.

$$C_{min} = T * \frac{I_{out} * (1 - D1) * 100}{V_{out}} \quad (7)$$

En la práctica se deben tomar valores mayores a la capacitancia y la inductancia calculada con las anteriores ecuaciones.

3.1.2. Cálculos del convertidor CD-CD

Según se proyecta en la investigación, el prototipo convertidor CD-CD manejará un voltaje de 150 V, esto hace se deba manejar una potencia de salida de 7000 W como mínimo.

De esta forma la corriente máxima de salida del convertidor será de:

$$I_{out} = \frac{P_{out\ max}}{V_{out}}$$

Si se asume que el rendimiento total es de 90%, o que el margen de potencia de más que debe dar el convertidor CD-CD.

$$P_{out\ max} = \frac{6500W}{0.9} = 7222,22W$$

Por tanto,

$$I_{out} = \frac{7222,22W}{150}$$

$$I_{out} = 48,15\ A$$

Tomando un margen de seguridad

$$I_{out} = 50\ A$$

Seleccionando como Dispositivos semiconductores Mosfets clásicos como el IRF 640 de alta conmutación para las primeras pruebas de funcionamiento; para estos el voltaje de saturación es de 0.3 V y la caída de tensión típica es de 0.7V.

De igual forma se selecciona una frecuencia de conmutación de 31 kHz, una frecuencia relativamente baja, para que las pérdidas y estrés debido a la conmutación no sean tan alta.

Se seleccionan los ciclos de trabajo en 0,6 y 0,3 para D1 y D2 respectivamente con el ánimo de darle maniobrabilidad al convertidor y cumplir las reglas de activación que se mostraron anteriormente. Con el ánimo de calcular las inductancias y capacitores, se asume que la

tensión de entrada es la más alta posible, para que los valores tengan margen de seguridad. Con estos datos se puede calcular la inductancia y el capacitor:

$$L_{min} = T * \frac{[(V_{in} - V_{sat1}) * D1 - V_{sat2} * D2 - V_{out} * (D1 - D2)]}{2 * I_{out}} \quad (5)$$

$$L_{min} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}} * \frac{[(52V - 0.3V) * 0.6 - 0.3V * 0.3 - 48V * (0.6 - 0.3)]}{2 * 50A}$$

$$L_{min} = 11.02 * 10^{-6} \text{ H}$$

$$L_{min} = T * \frac{[VD1 + V_{out}] * (1 - D1)}{2 * I_{out}} \quad (6)$$

$$L_{min} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}} * \frac{[0.7 + 48V] * (1 - 0.6)}{2 * 50 \text{ A}}$$

$$L_{min} = 12.98 * 10^{-6} \text{ H} \quad \text{H}$$

Se selecciona el valor más alto de las dos inductancias, es decir 12.98 H, como el valor de la inductancia a construir

$$C_{min} = T * \frac{I_{out} * (1 - D1) * 100}{V_{out}} \quad (7)$$

$$C_{min} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}} * \frac{50 * (1 - 0.6) * 100}{48V}$$

$$C_{min} = \frac{1}{15000 \text{ Hz}} * \frac{50 * (1 - 0.6) * 100}{48V}$$

$$C_{min} = 2.777 * 10^{-3} \text{ F}$$

3.1.3. Diseño del convertidor CD-CD

Alimentación en cd

El convertidor CD-CD de elementos reducidos se alimenta de la señal obtenida en la rectificación, es decir la salida del rectificador trifásico es la entrada del convertidor.

Regulador de voltaje

El regulador de voltaje tiene como función mantener dos niveles de tensión fijos, alimentando el circuito de control del convertidor. El primero cuenta con una salida de 12 V que alimenta al Driver IR2110, para que así este haga las conmutaciones en la etapa de potencia.

El segundo tiene una salida de 5V para alimentar al microcontrolador y algunos de los circuitos integrados que forman parte del Driver para el MOSFET.

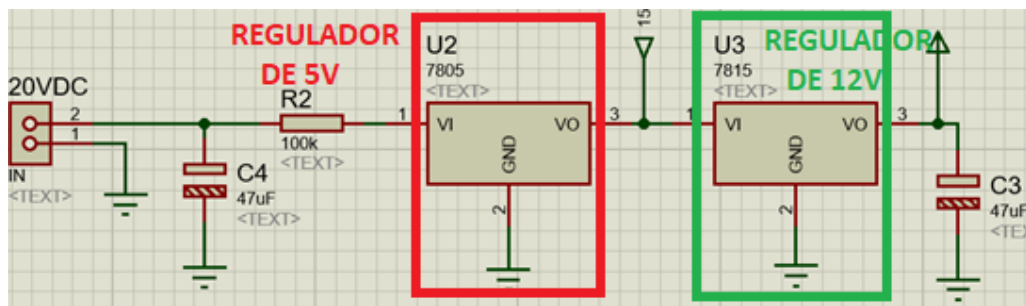


Figura 33. Regulador de voltaje

ETAPA DE CONTROL

Uno de los criterios más importantes en la implementación es la etapa de control, la cual tiene como función principal elevar y disminuir la tensión en el convertidor variando el ciclo de trabajo de la señal del MOSFET. Esta etapa la forman 2 optocopladores 6N137, la compuerta negadora SN74LS04N, dos DRIVERS IR2110, y un algoritmo programado en arduino UNO.

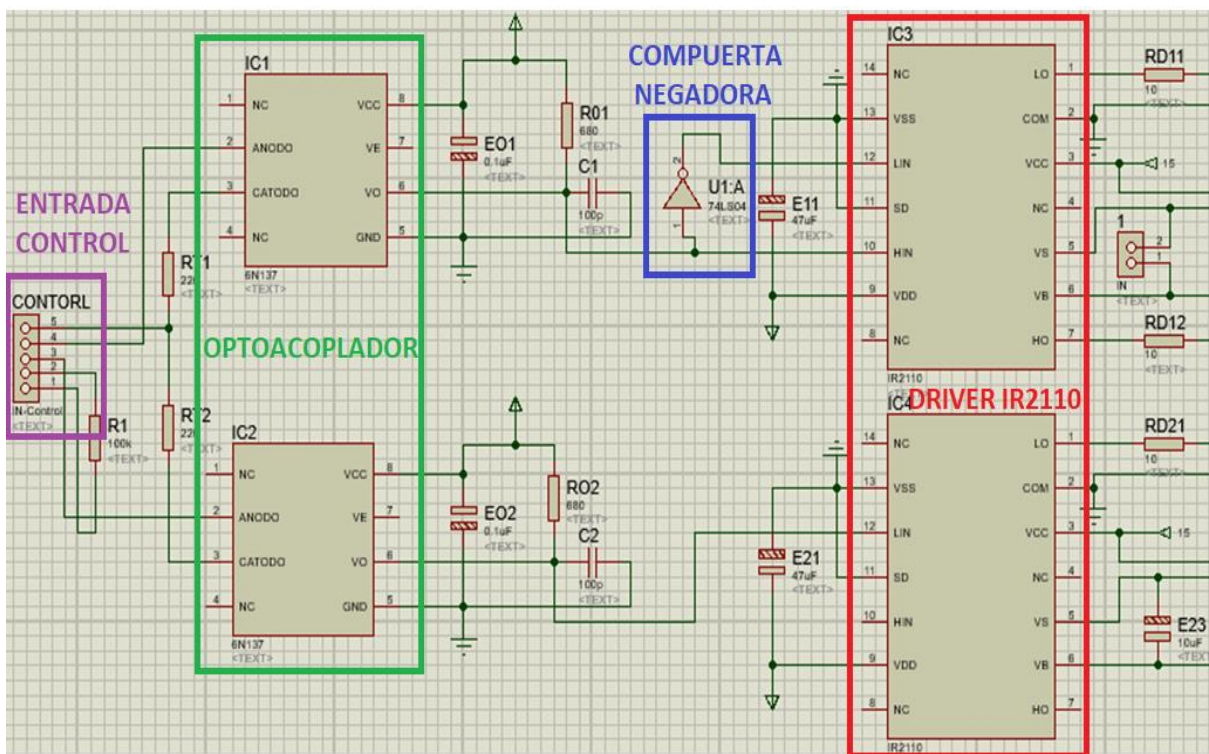


Figura 34. Etapa de control

Optoacoplador 6N137

La señal PMM pasa por el optoacoplador 6N137 antes de llegar al driver IR2110; con el fin de aislar la salida de control y evitar voltajes de mayor nivel que puedan afectar la salida digital ante posibles fallas. [12]

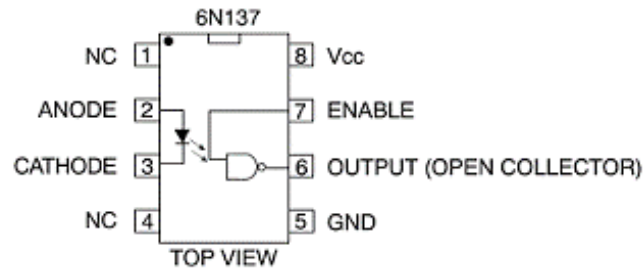


Figura 35. Optoacoplador 6N137

Compuerta negadora SN74LS04N

Puerta lógica que implementa la negación lógica. La tabla de verdad. Siempre que su entrada está en 0 (cero) o en BAJA, su salida está en 1 o en ALTA y viceversa.

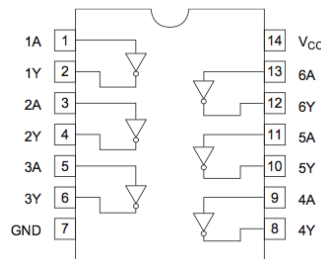


Figura 36. Compuerta negadora SN74LS04N

Driver IR2110

El driver IR2110 es un controlador de potencia de alta tensión y velocidad, contiene canales de salida independientes con señal de lado alto y bajo, en este caso permite ampliar la señal de control con una magnitud mayor a 10V, para que el MOSFET FDL100N50F se puede accionar rápidamente y con la tensión que necesita. [13]

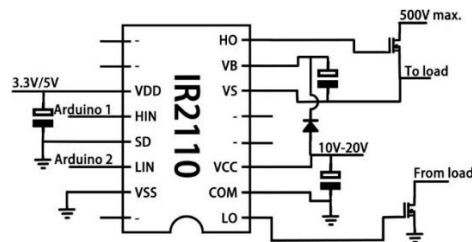


Figura 37. Driver IR2110

Arduino UNO

En la plataforma electrónica de Arduino UNO, se desarrolla el algoritmo programado para la etapa de control, utilizando las señales digitales y análogas de éste. Las funciones que cumple son:

- General una frecuencia PWM por su respuesta extrarápida, mediante las entradas digitales.
- Realizar el control del convertidor para que funcione como elevador o reductor, esto acoplado un reóstato para variar manualmente el ciclo de trabajo generado.

El arduino UNO es una placa con un microcontrolador y con toda la circuitería de soporte, que incluye, reguladores de tensión, un puesto USB, conectado a un módulo adaptador USB serie que permite programar cualquier algoritmo desde un pc. [14]

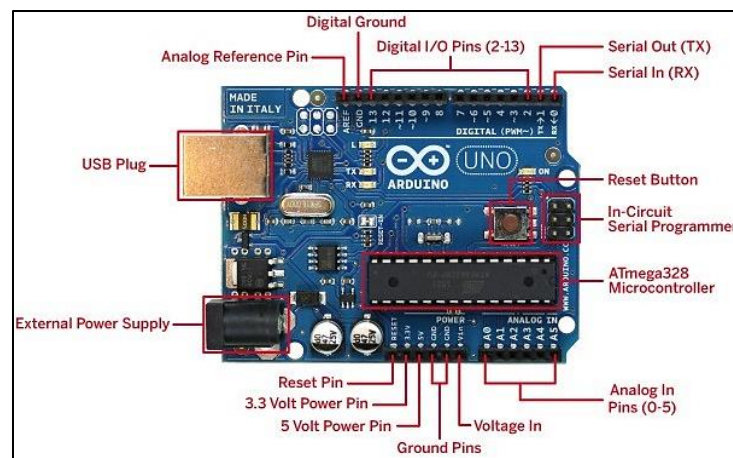


Figura 38. Arduino UNO

Programa en arduino UNO

Frecuencia PWM

En las primeras líneas de código se genera una frecuencia PWM de 31372.55 Hz, ésta se utilizó ya que es múltiplo de 15000 Hz que es la frecuencia para la cual fue diseñado, éstas van a los pines 9 y 10 de las entradas digitales (pwm) del arduino UNO.

Código

```
const int pwm = 9; // Usamos salida PWM en pin 9
int y = 0;
int var = 0;
int pot = 0 ;
```

Asignación de variables

```
void setup() {
  TCCR1B = TCCR1B & B11111000 | B00000001;
  // for PWM frequency of 31372.55 Hz
  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(10,OUTPUT);
```

Se realiza el programa para generar la frecuencia de 31KHz y se asignan los pines 9 y 10 como salidas

Figura 39. Generación de frecuencia PWM

Modulación del ancho del pulso PWM

La modulación de ancho de pulsos PWM (Pulse Width Modulation) es un método usado para generar una señal analógica de una digital. Consta de dos componentes principales que definen su comportamiento: El ciclo de trabajo y la frecuencia.

En este caso la frecuencia deseada ya fue generada en el punto anterior, y es la encargada de determinar qué tan rápido la modulación por ancho de pulsos completa un ciclo.

Y en cuanto al ciclo de trabajo es el que describe la cantidad de tiempo en que la señal está en un estado alto como un porcentaje de tiempo total que lleva completar un ciclo. [15]

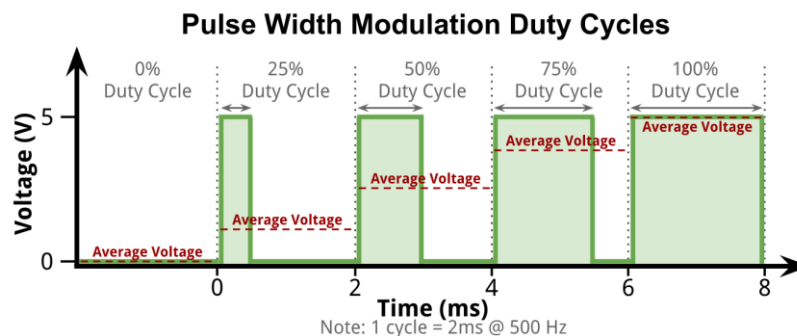


Figura 40. PWM (Pulse Width Modulation)

En el caso de Arduino, los pines para el uso del PWM son los denominados digital output 3, 5, 6, 9, 10 y 11. Ahora bien, a través de la función **analogWrite**, se puede realizar la modulación por ancho de pulsos. El programa se encargará de leer el nivel en el cursor de un potenciómetro, mediante el el pin A1. [15]

Ésta lectura estará en el rango de 0 a 1023 y el PWM solo acepta valores entre 0 y 255, por eso es necesario cambiar la escala de la lectura para alcanzar el rango ideal del control. Primero serán valores de 0 a 900 para el reductor y de 900 a 1023 para el elevador.

El programa completo se observa en la figura 41.

Código

```
void loop() {  
  pot = analogRead (1); delay(200);  
  Serial.println("Potenciómetro");  
  Serial.println(pot);
```

Se ajusta el valor del potenciómetro en la entrada analoga 1

```
if (pot<(900));  
{  
  analogWrite(10,255);  
  y = map(pot, 0, 900, 255, 0);  
  Serial.println("Reductor");  
  Serial.println(y);  
  analogWrite(9,y);  
}
```

En el primer condicional, se ajusta la escala de 0-900 a 0-255. Esto para el reductor

```
if (pot>=(900))  
{  
  analogWrite(9,0);  
  y = map(pot, 900, 1023,255, 120);  
  Serial.println("Elevador");  
  Serial.println(y);  
  analogWrite(10,y);  
}
```

En el segundo condicional, se ajusta la escala de 900-1023 a 120 - 25e, para el elevador

Figura 41. Programa en arduino UNO

ALGORITMO DE CONTROL

En esta sección se describe por medio de un diagrama de flujo el algoritmo de control, se pueden observar diferentes rutinas y subrutinas presentes para que la etapa de control se pueda ejecutar correctamente.

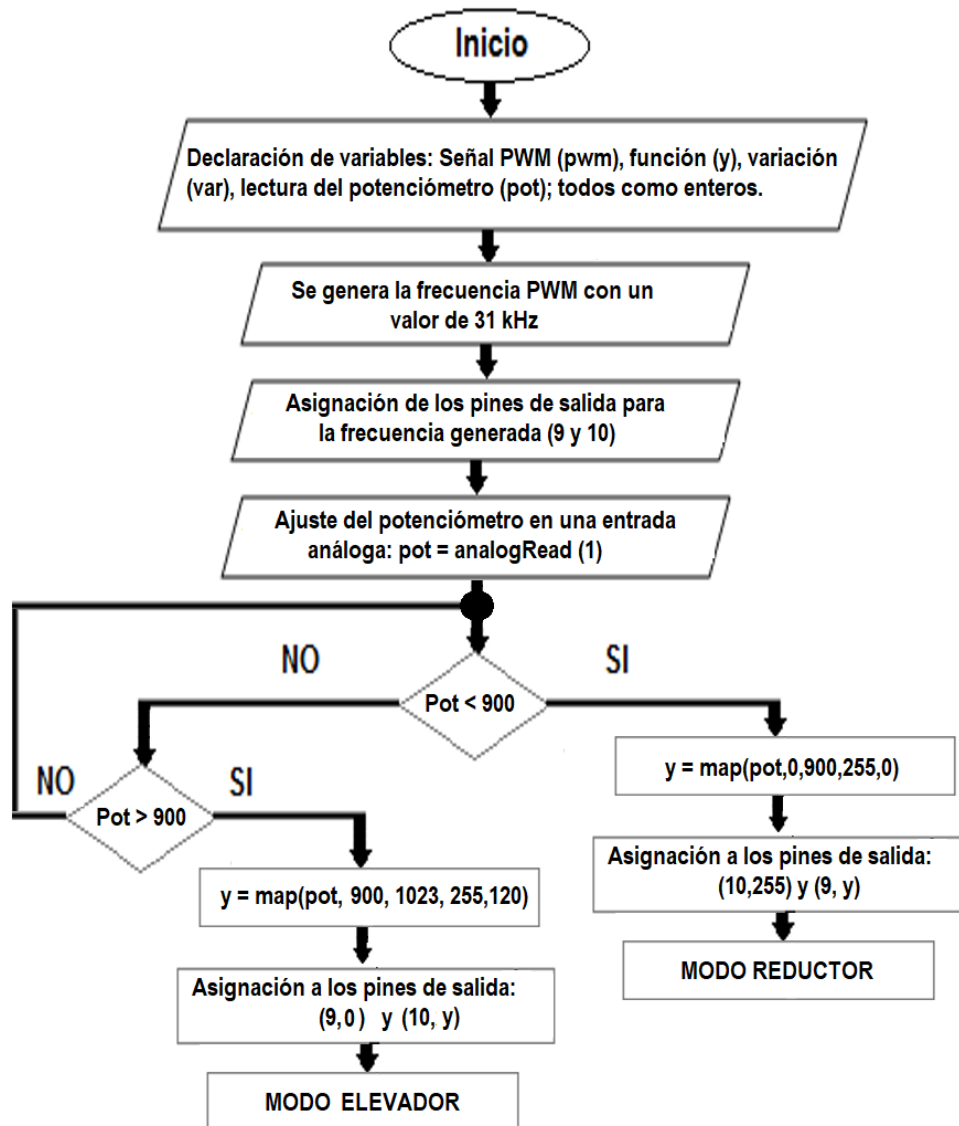


Figura 42. Algoritmo de control del sistema

ETAPA DE POTENCIA

En la etapa de potencia se observa el convertidor CD-CD elevador – reductor, y como su nombre lo indica reduce o eleva la tensión de salida dependiendo de la señal de control que se le suministre, respecto de la entrada. Con este convertidor se pueden obtener voltajes y corrientes con muy poco rizado, siendo así más eficaz, además de su bajo costo por ser de elementos reducidos.

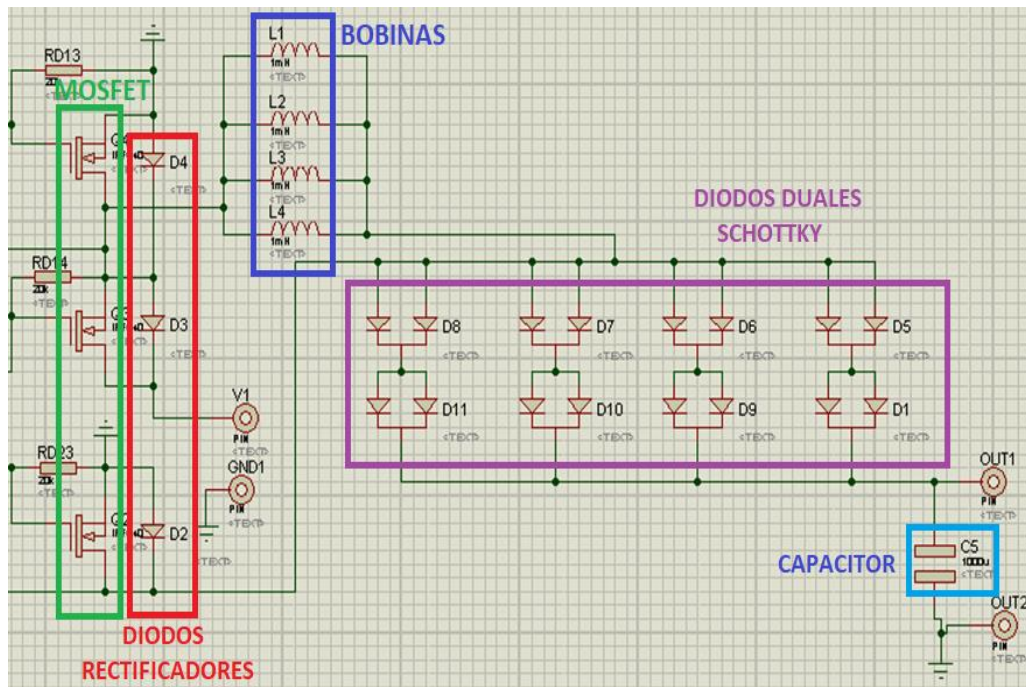


Figura 43. Etapa de potencia

MOSFET FDL100N50F

El MOSFET utilizado para el convertidor es el FDL100N50F ya que el voltaje y la corriente que soporta está por encima del nivel de voltaje que se va a utilizar, por ende logrará que el funcionamiento como elevador y reductor procesa sin ningún peligro. Los valores son de 500 V y 100 A.



Figura 44. MOSFET FDL100N50F

Estos transistores utilizan tecnología DMOS, ésta se ha diseñado especialmente para minimizar la resistencia en el estado ON, proporcionar un rendimiento de conmutación rápida y soportar pulsos de alta energía en el modo de avalancha y conmutación. Estos dispositivos son adecuados para fuentes de alimentación de modo conmutado de alta eficiencia y corrección de factor de potencia activa.

Diodos rectificadores

Los diodos rectificadores son los encargados de suprimir la parte negativa de cualquier señal que se dirija hacia la etapa de potencia, con el fin de proteger los MOSFET. En este caso se utilizará la referencia de P600J, el cual soporta 6A y 600V.



Figura 45. Diodos rectificadores en la etapa de potencia para el convertidor

Diodos duales schottky

Los diodos duales schottky son aquellos que contienen dos diodos en paralelo y un punto en común, estos son de alta conmutación y en este caso ayudarán a dar paso la señal en un solo sentido, directo al capacitor, para que luego éste se encargue de alimentar a la carga.

En la figura 46 se observa el diodo que se utilizará en el diseño. Este soporta 20 A y 100V, estando en muy buenas condiciones para la tensión y corriente que se tendrá.

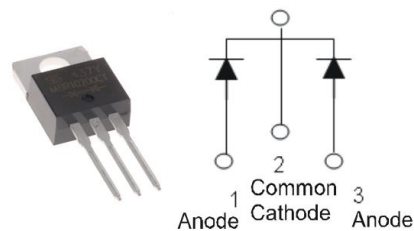


Figura 46. Diodo dual schottky

Capacitor

El capacitor como ya se había explicado, es el encargado de almacenar energía y alimentar la carga. Éste debe soportar la el voltaje que se utiliza, en este caso se contará con un capacitor de 400VDC y 3300uF, tal como se muestra en la figura 47.



Figura 47. Capacitor para el convertidor CD-CD

Bobina con núcleo de hierro

Por esquema de seguridad se tomará dos veces el voltaje nominal del convertidor CD-CD. el diseño de una bobina con núcleo de hierro con una inductancia de 12.93 μH , teniendo una corriente de 100 amperios, en un sistema de 50V y frecuencia de conmutación de 15kHz.

Para la construcción se contará con 4 bobinas en paralelo divididas cada una para 25 A, y 51,72 μH .

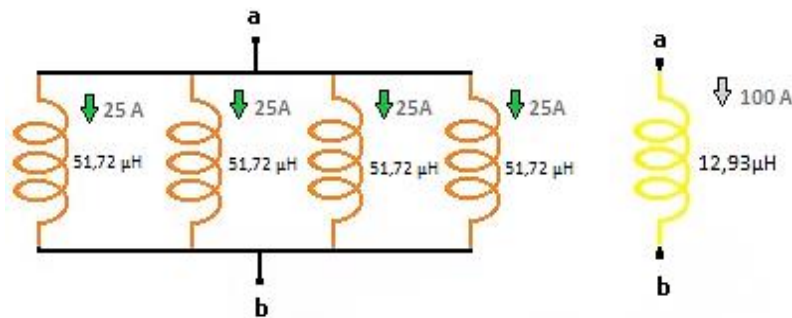


Figura 48. Inductancias en paralelo

$$\frac{1}{LT} = \frac{1}{L1} + \frac{1}{L2} + \frac{1}{L3} + \frac{1}{L4}$$

Construcción y dimensiones

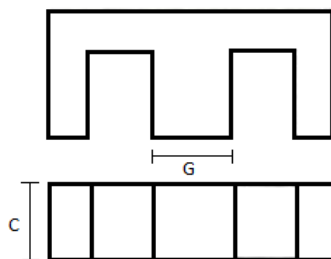


Figura 49. Parámetros constructivos del núcleo ferromagnético

La sección del núcleo tendrá las siguientes dimensiones:

$$G = 20 \text{ mm}$$

$$C = 20 \text{ mm}$$

Realizando el cálculo se halla la sección transversal o área del núcleo:

$$A = G * C = 400\text{mm}^2 = 4 * 10^{-4}\text{m}^2$$

Calibre requerido

Primero se tiene la tabla de densidades para así encontrar la sección transversal:

$$S = \frac{I}{D_{max}}$$

Donde:

D_{max} -> Densidad máxima

I -> Corriente circulante

Tabla 1. Cálculo de densidades máximas

CORRIENTE TRANSFORMADOR (A)	DENSIDAD MÁXIMA (A/mm²)
Hasta 50	4
50 – 100	3,5
100 – 200	3
200 – 400	2,5

$$S = \frac{25A}{3,5 \frac{A}{mm^2}}$$

$$S = 7,143 \text{ mm}^2$$

Ahora teniendo la sección transversal se utiliza la tabla correspondiente por norma para encontrar el calibre requerido para su construcción, el cual es un:

AWG #9

Teniendo esto se procede a encontrar el número de vueltas con:

$$L = \frac{N^2}{R}$$

$$N^2 = L * R$$

$$N^2 = \frac{L * l}{\mu_0 * A}$$

Donde:

L -> Inductancia en H (henrios)

l -> Longitud del entrehierro, medida en metros.

μ_0 -> permeabilidad del vacío, medida en H/m (henrio/metro).

A -> Área de la sección transversal (sección del núcleo magnético), en metros cuadrados.

$$N^2 = \frac{(51,72 \mu\text{H}) * (1 * 10^{-3}\text{m})}{(4\pi * 10^{-7}\text{H/m}) * (4 * 10^{-4}\text{m}^2)}$$

$$N^2 = 102,89$$

$$\mathbf{N = 10,14 Vueltas}$$

Cálculos térmicos

El modelo de temperaturas se construye con las temperaturas de juntura máxima especificadas por el fabricante, la resistencia térmica del disipador y la temperatura ambiente.

En la figura 50 se muestra el modelo para el disipador de cada puente, en él la fuente corresponde a la potencia disipada de un MOSFET.

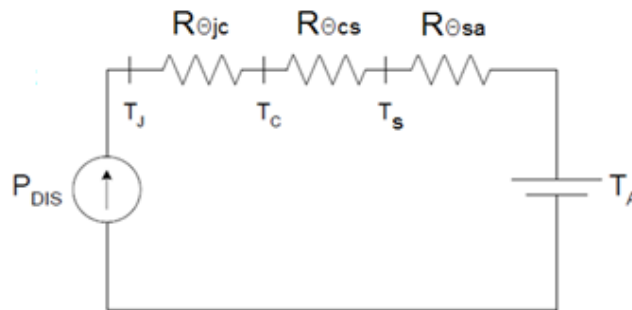


Figura 50. Modelo térmico del disipador de un puente

En donde:

$R_{\theta_{jc}}$: Resistencia térmica entre la juntura y la caja del chip.

$R_{\theta_{cs}}$: Resistencia entre la caja y el disipador.

$R_{\theta_{sa}}$: Resistencia térmica entre el disipador y el ambiente.

La resistencia térmica entre el disipador y le ambiente es el parámetro de diseño, esta resistencia está dada por la expresión:

$$R_{\theta sa} = \frac{T_j - T_a}{P_d} - (R_{\theta jc} + R_{\theta cs})$$

Donde,

T_j: Es la temperatura de juntura máxima del dispositivo.

T_a: Temperatura ambiente.

P_d: Potencia disipada.

Para calcular la potencia disipada por los mosfets se deben tener en cuenta las siguientes perdidas:

Pérdidas por conmutación

Energía de encendido

$$E_{on} = \frac{V_s * I_d * T_{on}}{2} + V_s * Q_{rr} + V_s * T_{rr} * I_d$$

Energía de apagado

$$E_{off} = \frac{V_s * I_d * T_{off}}{2}$$

Potencia disipada por conmutación

$$P_{dconmutacion} = (E_{on} + E_{off}) * f$$

Pérdidas por conducción

Las pérdidas por conducción se pueden calcular mediante la siguiente ecuación:

$$P_{dconduccion} = V_{ds} * I_d * \text{Ciclo de trabajo}$$

Pérdidas totales

$$P_d = P_{dconduccion} + P_{dconmutacion}$$

Seguindo este procedimiento de cálculo y asumiendo que los dispositivos semiconductores trabajaran a máxima carga en una temperatura ambiente de 40°C, además que los dispositivos van a operar a máxima corriente, es decir el mosfet dará un corriente de 50 A y a una tensión de 150V. Se obtienen los siguientes disipadores para cada puente.

Cálculo térmico Puente de baja conmutación

Tomando los datos apropiados de las hojas de características y los datos máximos de corriente para los MOSFETS se obtiene:

$$E_{on} = \frac{V_s * I_d * T_{on}}{2} + V_s * Q_{rr} + V_s * T_{rr} * I_d$$

$$E_{on} = \frac{150V * 50A * 63nS}{2} + 150V * 1,5nC + 150V * 186nS * 50A = 1,631 * 10^{-3}J$$

$$E_{off} = \frac{V_s * I_d * T_{off}}{2}$$

$$E_{off} = \frac{150V * 50A * 202nS}{2} = 7,575 * 10^{-4}J$$

$$Pd_{conmutacion} = (E_{on} + E_{off}) * f$$

La frecuencia hace referencia al número de conmutaciones por segundo, en este caso se diseña con una frecuencia relativamente baja, de 31kHz.

$$Pd_{conmutacion} = (1,631 * 10^{-3}J + 7,575 * 10^{-4}J) * 31kHz = 74,04 W$$

El ciclo de trabajo se asumirá como 0.5 ya que los MOSFETS, al tener conmutaciones equitativas entre ellos, la mitad del tiempo estará encendidos y la otra mitad apagados.

$$Pd_{conducción} = V_{ds} * I_d * Ciclo\ de\ trabajo$$

$$Pd_{conducción} = 1,5V * 50A * 0,5 = 37,5W$$

$$Pd = Pd_{conducción} + Pd_{conmutación}$$

$$Pd = 74,04 W + 37,5W = 111,54 W$$

Esta potencia se disipara en el peor de los casos cuando el puente este trabajando a plena carga. Para el cálculo de la resistencia térmica del disipador se tiene:

$$R_{\theta sa} = \frac{T_j - T_a}{P_d} - (R_{\theta jc} + R_{\theta cs})$$

$$R_{\theta sa} = \frac{150^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C}}{111,54\text{W}} - \left(0,05 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0,1 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right) = 0,925 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

El disipador deberá tener esta resistencia térmica.

3.2.RECTIFICADOR CA-CD

3.2.1. Cálculos del rectificador trifásico

- Para obtener el valor medio del voltaje CD de salida es suficiente tomar en cuenta sólo uno de los seis segmentos y obtener su promedio a lo largo de un intervalo de 60° o $\pi/3$ rad. El voltaje promedio de salida se encuentra a partir de: [Rashid]

$$V_{cd} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{6}} \sqrt{2} V_{LL} \cos wt d(wt)$$

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL}$$

Dónde V_{LL} es el voltaje línea a línea.

$$V_{cd} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} (220\text{V})$$

$$V_{cd} = 297,1 \text{ V}$$

- El voltaje pico es:

$$V_{Pico} = \sqrt{2} V_{LL}$$

$$V_{Pico} = \sqrt{2} (220\text{V})$$

$$V_{Pico} = 311,126 \text{ V}$$

- La corriente nominal se encuentra a partir de:

$$I_{nom} = \frac{P_{nom}}{V_{CD}}$$

$$I_{nom} = \frac{3750 \text{ W}}{297,1 \text{ V}}$$

$$I_{nom} = 12,62 \text{ A}$$

Selección del capacitor

El capacitor se encarga de filtrar o aplanar el rizado de la señal a la salida del rectificador, esto deja completamente una onda en CD.

- El capacitor se halla a partir de:

$$C = \frac{I_{nom}}{12\sqrt{2} * \left(1 - \frac{3}{\pi}\right) * f * V_{CD}}$$

$$C = \frac{(12,62A)}{12\sqrt{2} * \left(1 - \frac{3}{\pi}\right) * (60 \text{ Hz}) * (297,1V)}$$

$$C = 925,59 \mu F$$

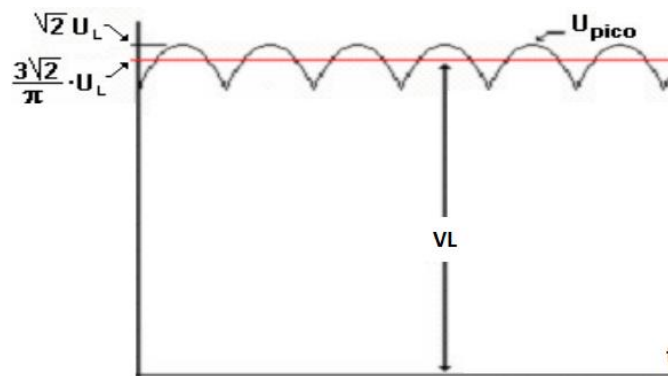


Figura 51. Onda resultante en cd

3.2.2. Diseño del rectificador trifásico

Alimentación

El voltaje de alimentación para el rectificador es trifásico como ya se había mostrado anteriormente.

Diodos rectificadores

Los diodos que se utilizarán para el sistema de rectificación son diodos rectificadores convencionales, obviamente que soporte el voltaje y corriente dado por el sistema de alimentación trifásica.

Capacitor

El capacitor ubicado después de la rectificación va a funcionar como un filtro, que disminuirá en forma significativa la señal.

CAPÍTULO 4

SIMULACIÓN DEL SISTEMA

Introducción

En esta sección se presenta la simulación completa del sistema, las gráficas y análisis de cada una; primero se realizó la simulación del rectificador trifásico, el voltaje de entrada y de salida, además de la corriente presente en cada etapa de los diodos; luego el convertidor CD-CD, el voltaje de entrada y salida después del control, es decir en forma de reductor y reductor; por último el acople final del sistema. Todo esto realizado en el software SIMULINK de MATLAB.

4.1. RECTIFICADOR TRIFÁSICO

Se alimenta de una fuente trifásica en Y con tensión de línea de 220V, cada una desfasada 120°, seis diodos rectificadores, una resistencia de carga y el filtro capacitivo, para obtener la señal en cd con un mínimo rizado.

Es decir:

$$VA = 179.73 < 0^\circ$$

$$VB = 179.73 < 120^\circ$$

$$VC = 179.73 < 240^\circ$$

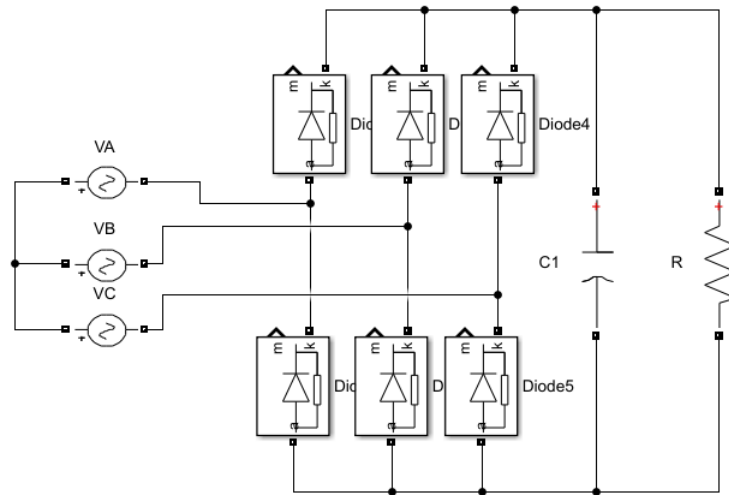


Figura 52. Simulación del rectificador trifásico

4.2. CONVERTIDOR CD-CD

El voltaje de alimentación del convertidor CD-CD es el de salida del rectificador, contiene tres MOSFET encargados del control para elevar o reducir la tensión con señales PWM, dos diodos de alta conmutación, la bobina y un capacitor. Todo esto se simula con los valores ya calculados de capacitancia e inductancia y con la frecuencia de 15kHz.

$$C_{min} = 2.777 * 10^{-3} F$$

$$L_{min} = 12.98 * 10^{-6} H$$

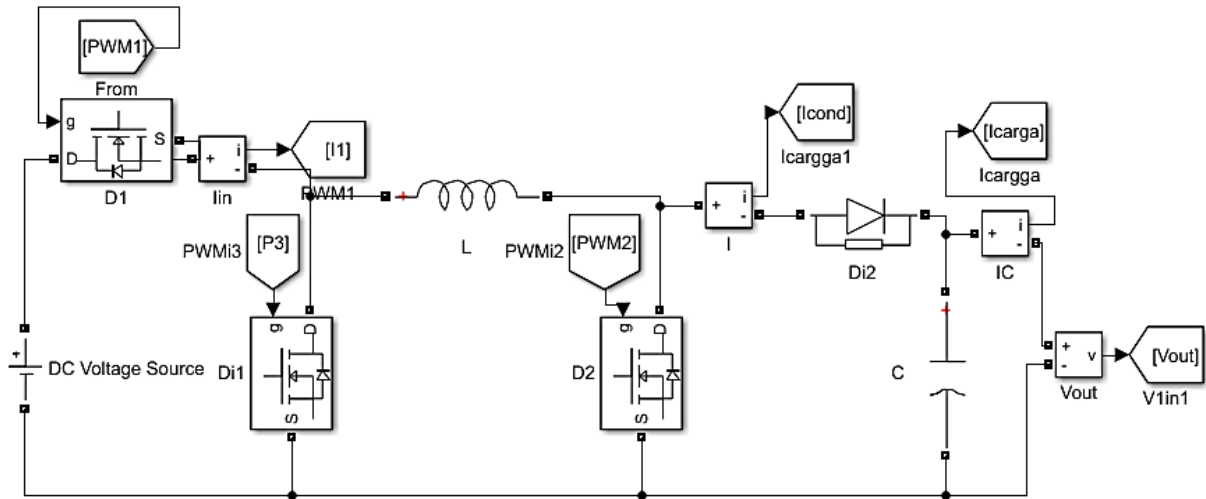


Figura 53. Simulación del convertidor CD-CD

4.3. Acople final del sistema

En la figura se puede observar las señales de entrada a los PWM para el respectivo control, así como la función necesaria para el correcto funcionamiento. En la figura se observa el acople del rectificador trifásico y el convertidor CD-CD, ésta contiene los diferentes medidores, osciloscopios y pantallas para observar el comportamiento y curvas de señal cuando se ponga en marcha la simulación.

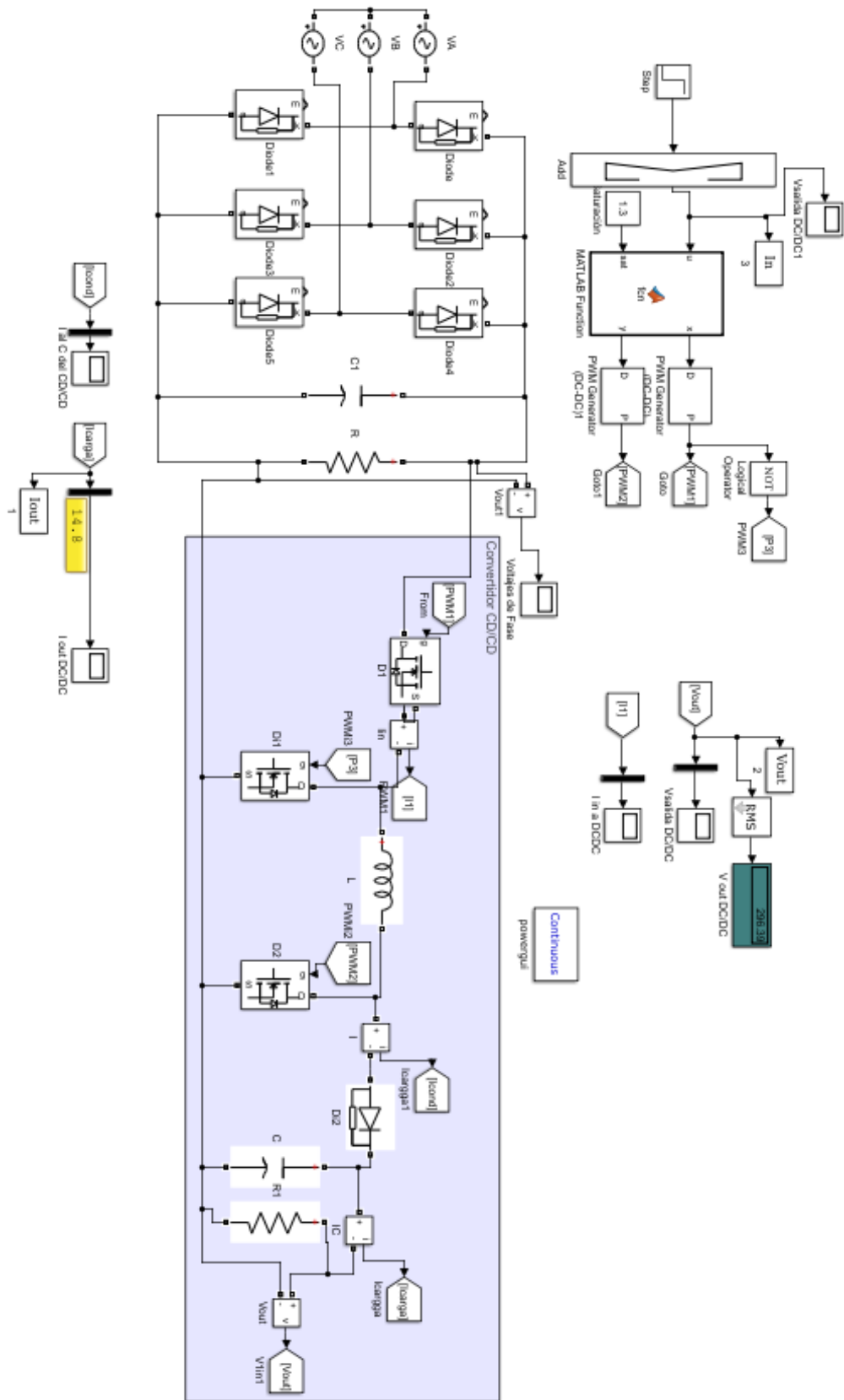


Figura 54. Acople final del sistema, simulación

4.4. Simulación sistema

4.4.1. Entrada trifásica

En la figura 54 se puede observar la señal de entrada al sistema, siendo esta trifásica.

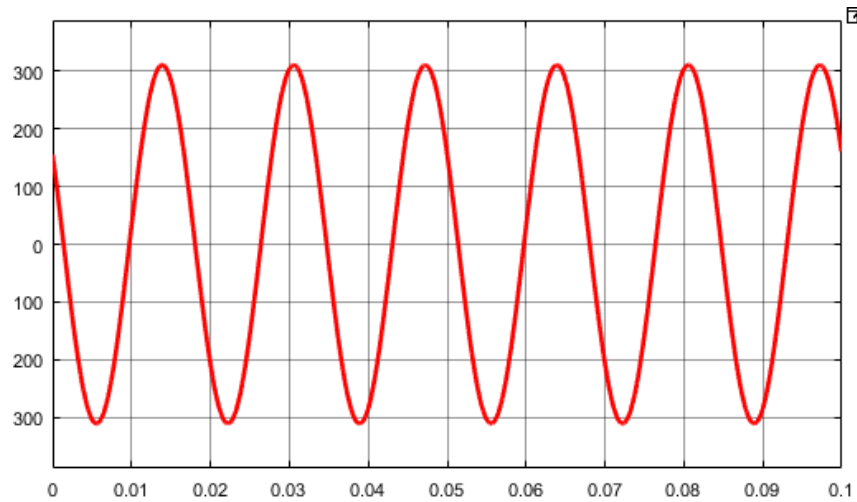


Figura 55. Señal trifásica entregada al sistema

4.4.2. Voltaje después de la rectificación sin filtro capacitivo

En la figura 55 se puede observar la curva del voltaje después de la rectificación, pero sin un filtro capacitivo que disminuya el rizado de la señal, versus un tiempo de 0,1 segundos. Se puede ver que es una rectificación de onda completa.

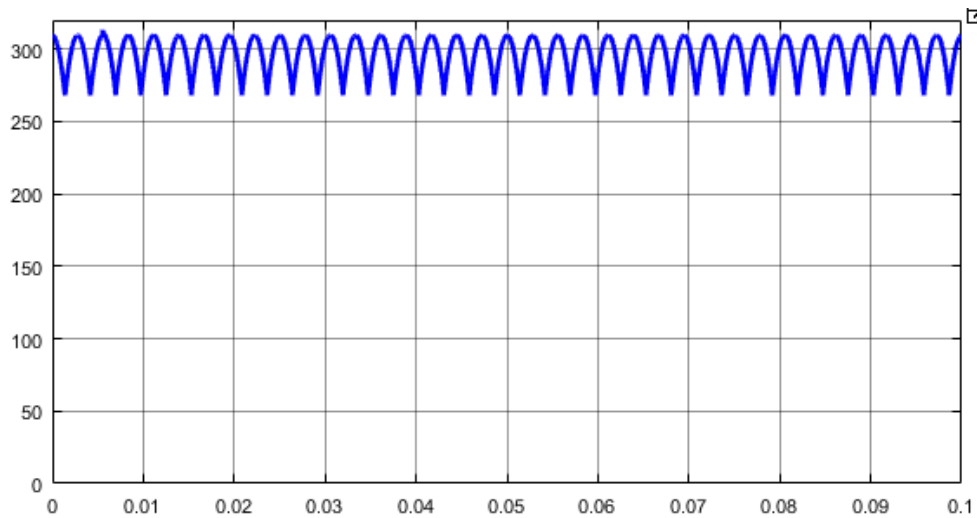


Figura 56. Voltaje después de la rectificación sin filtro capacitivo

4.4.3. Voltaje después de la rectificación con filtro capacitivo

En la figura 56 se puede observar la curva del voltaje después de la rectificación, con un filtro capacitivo que disminuye el rizado de la señal, versus un tiempo de 0,1 segundos.

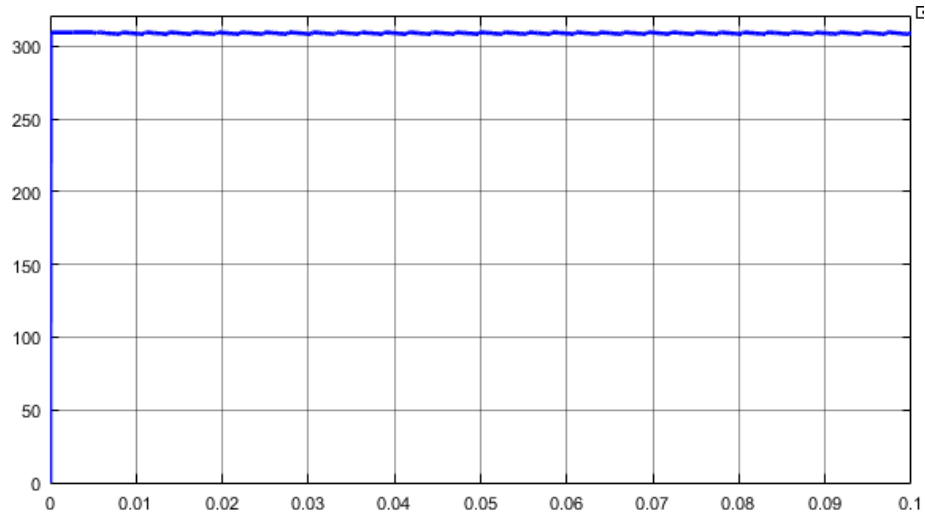


Figura 57. Voltaje después de la rectificación con filtro capacitivo

4.5. Simulación diodos rectificadores

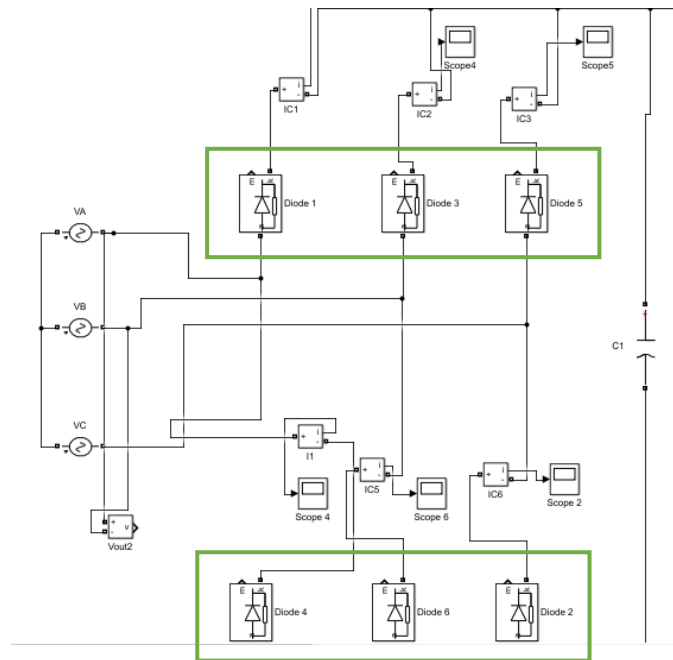


Figura 58. Simulación diodos

4.5.1. Diodo 1

En la figura 58 se puede observar la corriente vs el tiempo del diodo de rectificación 1, se puede evidenciar que es escalonada y llega aproximadamente a los 45 V máximo.

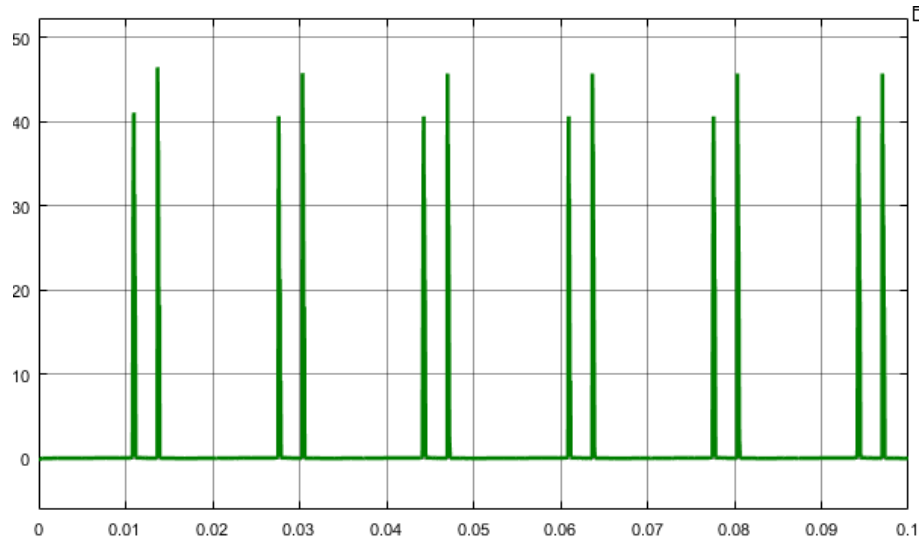


Figura 59. Corriente en el diodo 1 de rectificación

4.5.2. Diodo 2

En la figura 59 se puede observar la corriente vs el tiempo del diodo de rectificación 2, se puede evidenciar que es escalonada y llega aproximadamente a los 43 V máximo.

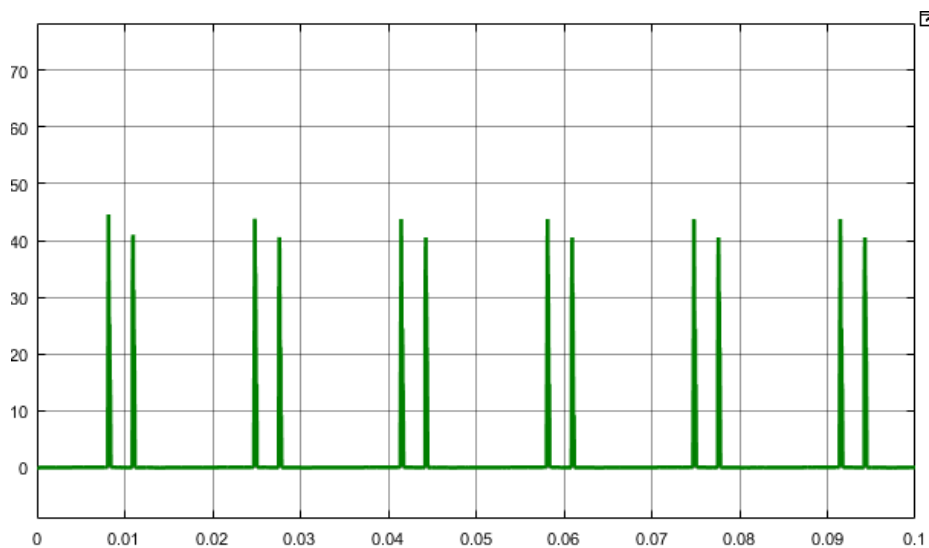


Figura 60. Corriente en el diodo 2 de rectificación

4.5.3. Diodo 3

En la figura 60 se puede observar la corriente vs el tiempo del diodo de rectificación 3, se puede evidenciar que es escalonada y llega aproximadamente a los 45 V máximo, aunque en el primer instante tenga una subida hasta 74 V.

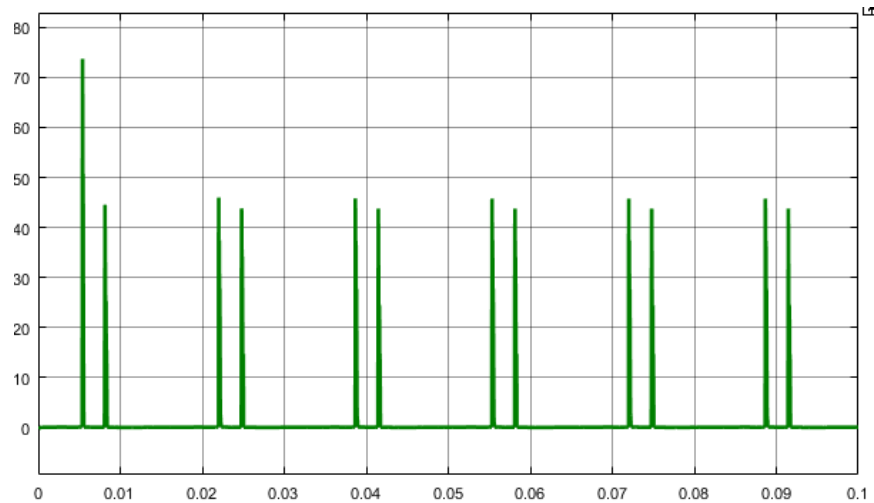


Figura 61. Corriente en el diodo 3 de rectificación

4.5.4. Diodo 4

En la figura 61 se puede observar la corriente vs el tiempo del diodo de rectificación 4, se puede evidenciar que es escalonada en el cuadrante negativo y llega aproximadamente a los 45 V máximo, aunque en el primer instante llegue hasta los 74V.

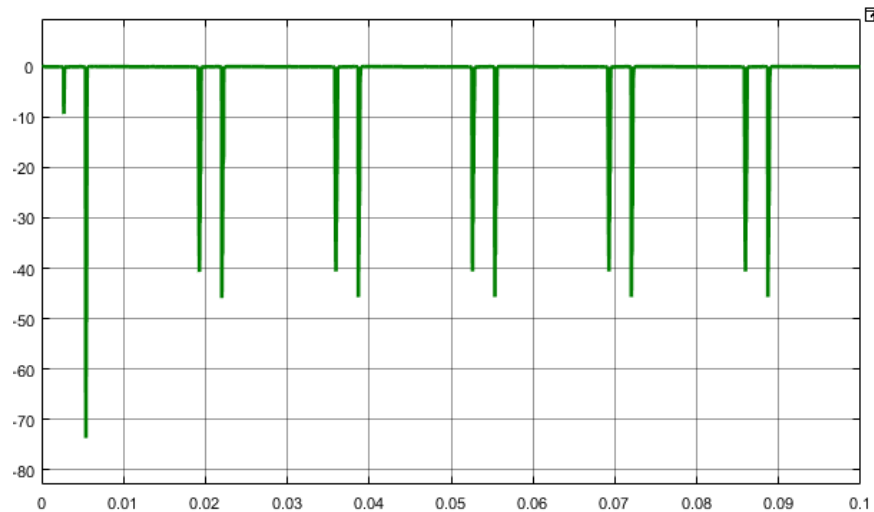


Figura 62. Corriente en el diodo 4 de rectificación

4.5.5. Diodo 5

En la figura 62 se puede observar la corriente vs el tiempo del diodo de rectificación 1, se puede evidenciar que es escalonada y llega aproximadamente a los 45 V máximo.

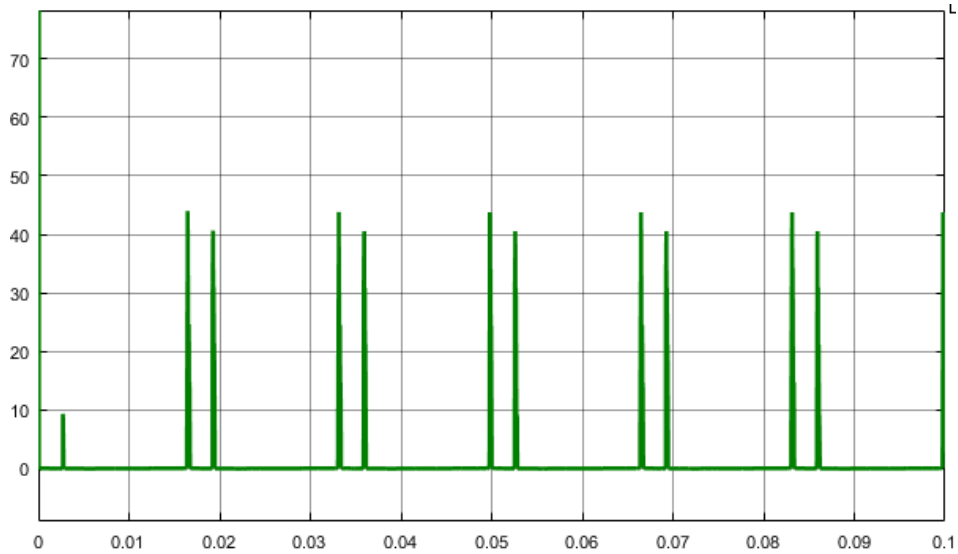


Figura 63. Corriente en el diodo 5 de rectificación

4.5.6. Diodo 6

En la figura 63 se puede observar la corriente vs el tiempo del diodo de rectificación 6, se puede evidenciar que es escalonada y llega aproximadamente a los 47 V máximo.

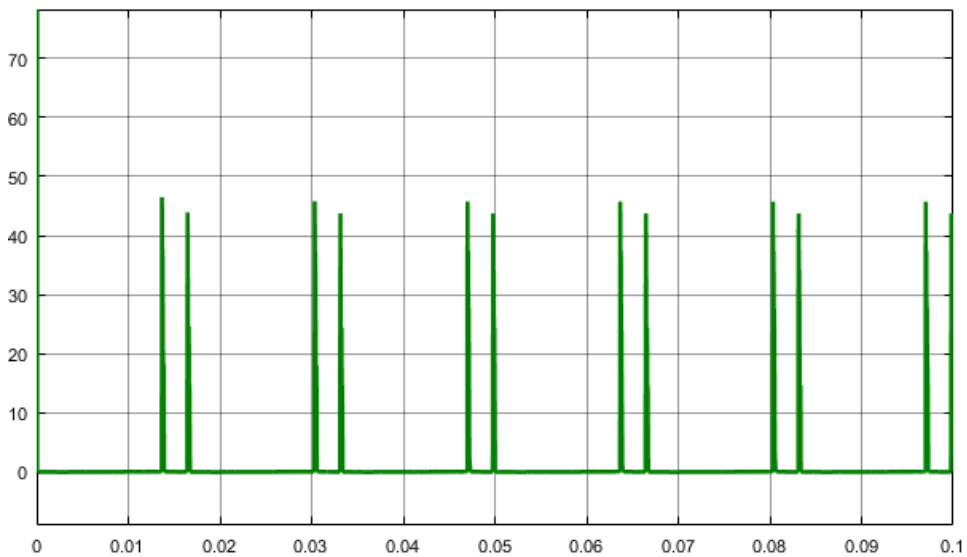


Figura 64. Corriente en el diodo 6 de rectificación

4.6. Simulación como reductor

4.6.1. Step

En la figura 64 se puede observar un step de 0.05 es decir el 5% del duty para que el convertidor CD-CD se comporte como reductor.

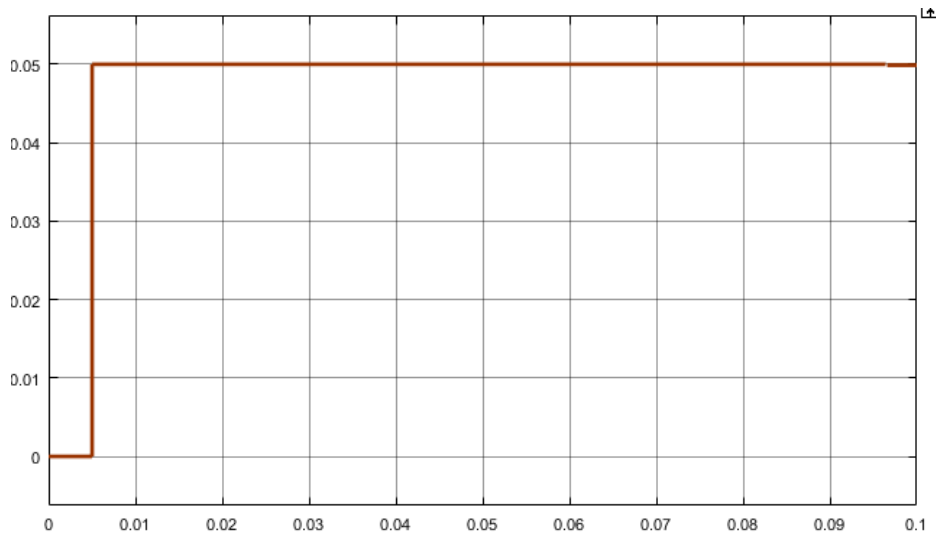


Figura 65. Señal de step al convertidor funcionando como reductor

4.6.2. Señales de control

En la figura 65 se pueden observar las señales de control entregadas al sistema para que funcione como reductor.

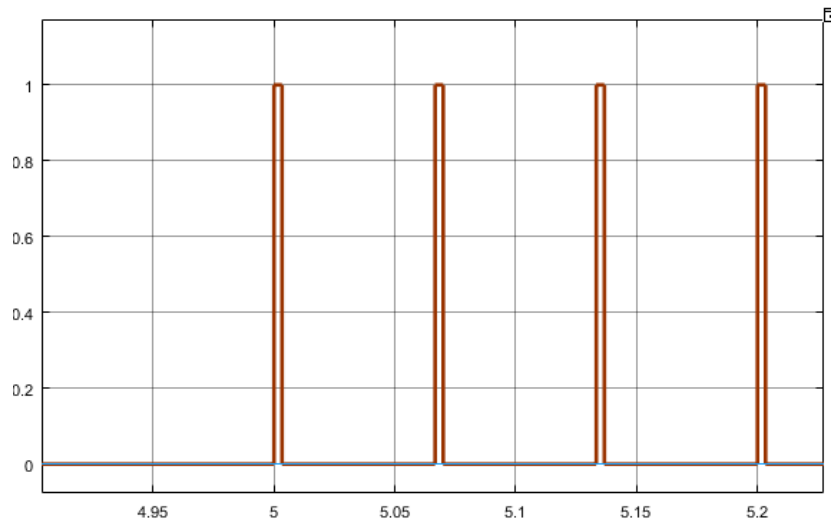


Figura 66. Señales de control entregadas al convertidor funcionando como reductor

4.6.3. Voltaje de salida funcionando como reductor

En la figura 66 se puede observar la curva de voltaje versus tiempo, éste es el voltaje de salida del sistema cuando el convertidor se comporta como reductor, en un tiempo de 0.1 segundos, donde es aproximadamente 50 V.

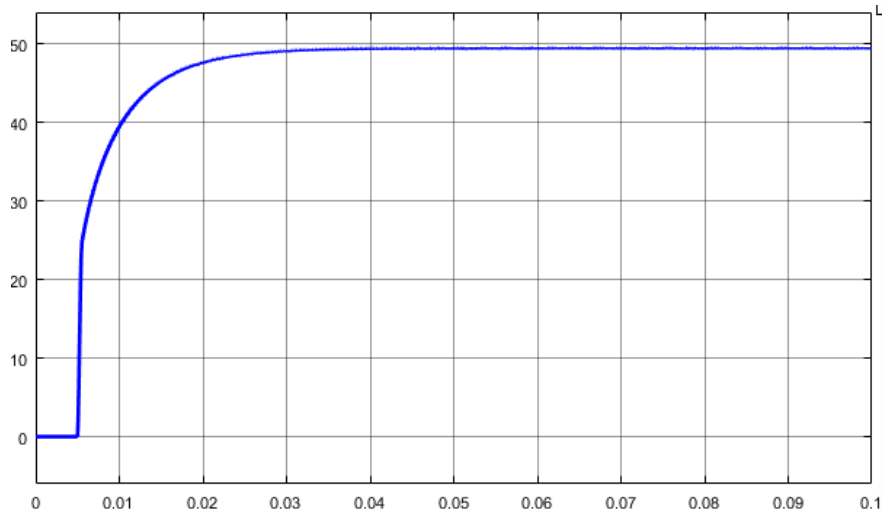


Figura 67. Voltaje de salida del convertidor funcionando como reductor

En la figura 67 se observa el voltaje de entrada y el de salida del convertidor, viéndose que éste disminuye significativamente.

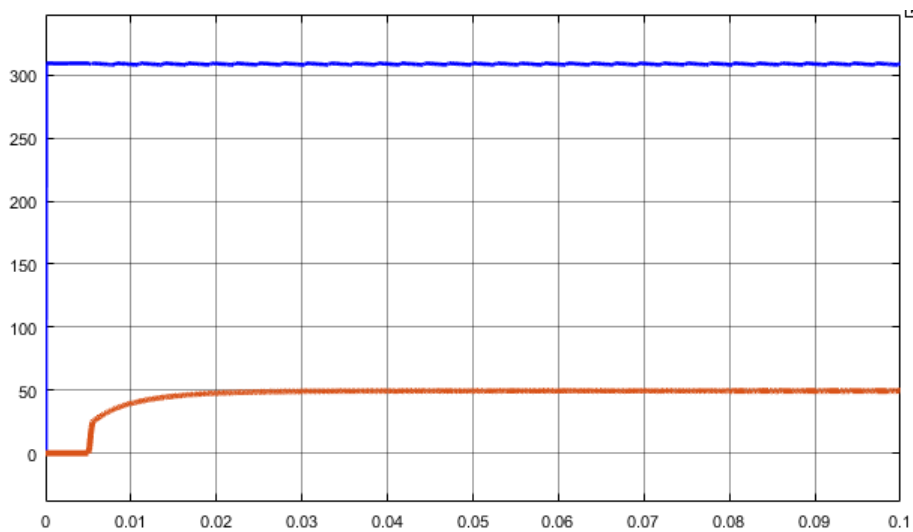


Figura 68. Voltaje de entrada vs salida del convertidor funcionando como reductor

4.6.4. Corriente de salida funcionando como reductor

En la figura 68 se puede observar la curva de corriente versus tiempo, ésta es corriente de salida del sistema cuando el convertidor se comporta como reductor, en un tiempo de 0.1 segundos, donde es aproximadamente 10 A.

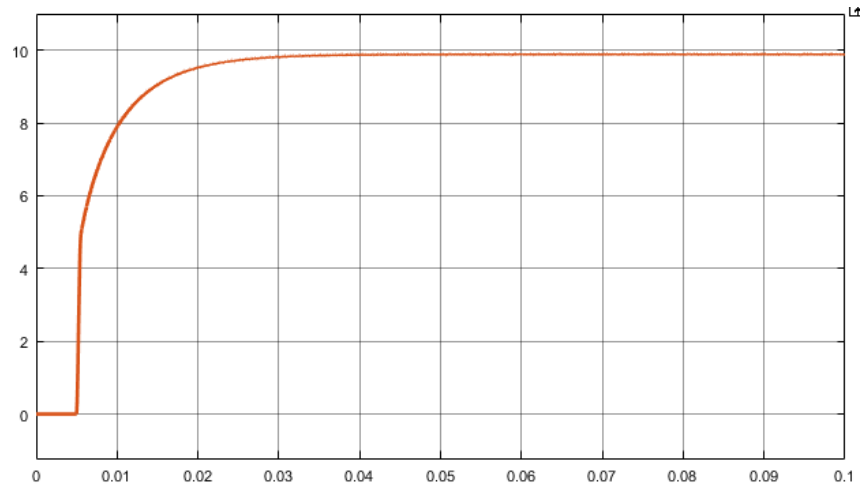


Figura 69. Corriente de salida del convertidor funcionando como reductor

4.7. Simulación como elevador

4.7.1. Step

En la figura 69 se puede observar un step de 1,1 es decir el 110% del duty para que el convertidor CD-CD se comporte como elevador.

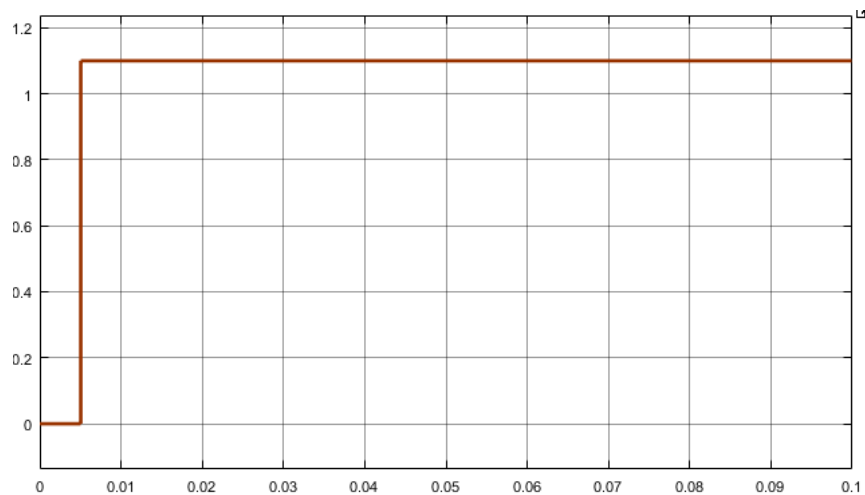


Figura 70. Señal de step al convertidor funcionando como elevador

4.7.2. Señales de control

En la figura 70 se pueden observar las señales de control entregadas al sistema para que funcione como elevador.

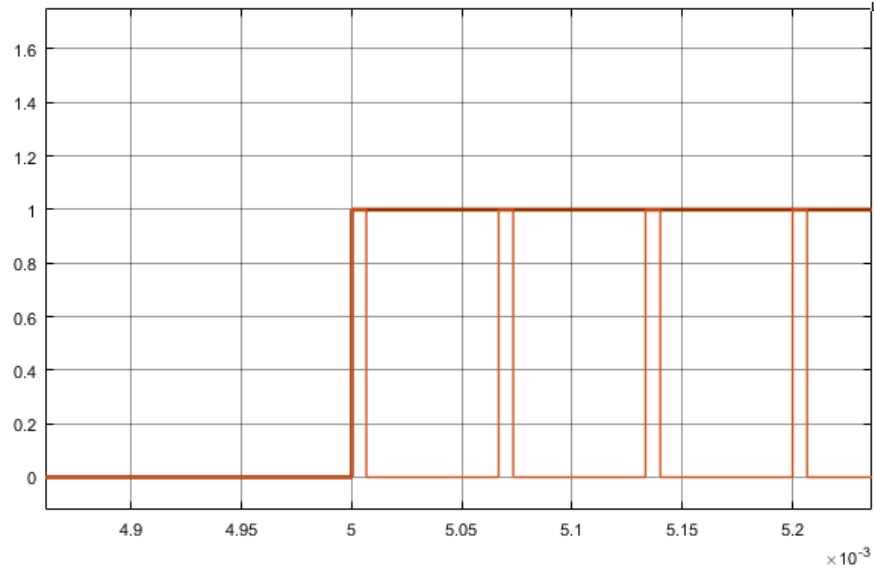


Figura 71. Señales de control entregadas al convertidor funcionando como elevador

4.7.3. Voltaje de salida funcionando como elevador

En la figura 71 se puede observar la curva de voltaje versus tiempo, éste es el voltaje de salida del sistema cuando el convertidor se comporta como elevador, en un tiempo de 0.1 segundos, donde es aproximadamente 400 V.

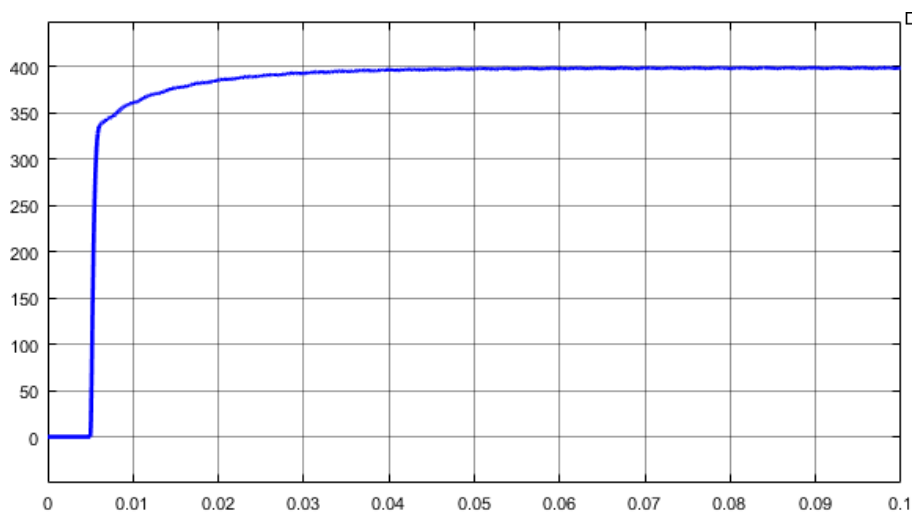


Figura 72. Voltaje de salida del convertidor funcionando como reductor

En la figura 72 se observa el voltaje de entrada y el de salida del convertidor, viéndose que éste aumenta significativamente.

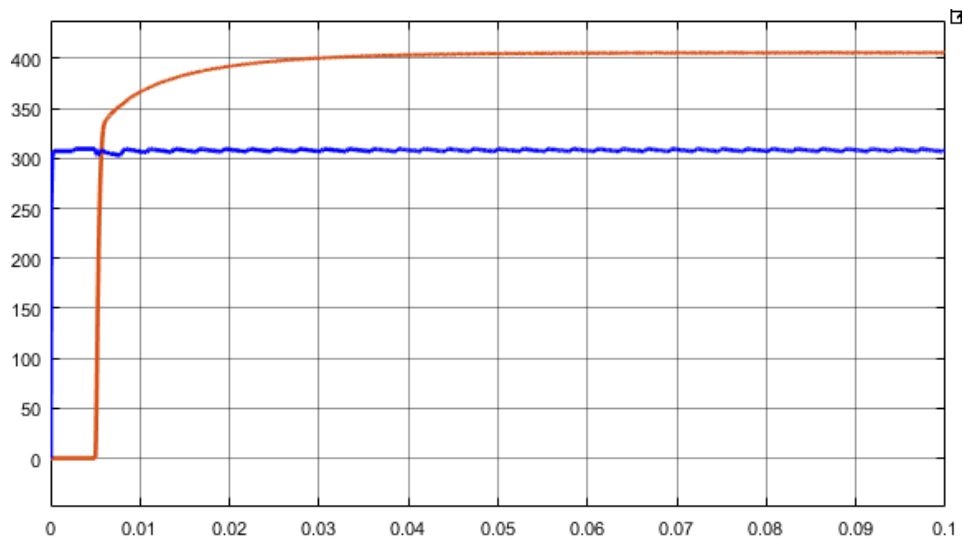


Figura 73. Voltaje de entrada vs salida del convertidor funcionando como reductor

4.7.4. Corriente de salida funcionando como elevador

En la figura 73 se puede observar la curva de corriente versus tiempo, ésta es corriente de salida del sistema cuando el convertidor se comporta como elevador, en un tiempo de 0.1 segundos, donde es aproximadamente 20 A.

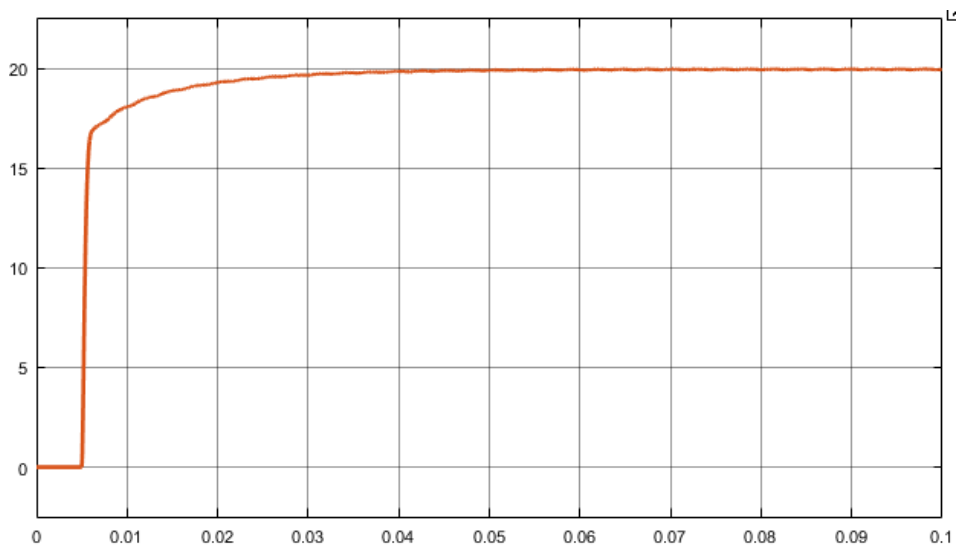


Figura 74. Corriente de salida del convertidor funcionando como reductor

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

Introducción

En el siguiente capítulo se realizará la implementación final; primero se observa los prototipos iniciales o esperados y luego la implementación real, tanto del convertidor CD-CD como del rectificador. También se observan los elementos que conforman todo el sistema, como el arduino para el control, el potenciómetro para la variación de la señal de control, los elementos de ventilación y los conductores necesarios para el buen funcionamiento de todo el sistema.

5.1. Implementación del rectificador trifásico

5.1.1. Prototipo final

El rectificador trifásico se alimenta a una tensión AC trifásica, éste constará de 18 diodos rectificadores 6A10, en grupos de 3 en paralelo para tolerar la corriente que circulará. El circuito es mostrado en la figura 74. Cada diodo soporta 800 V y 6 A.

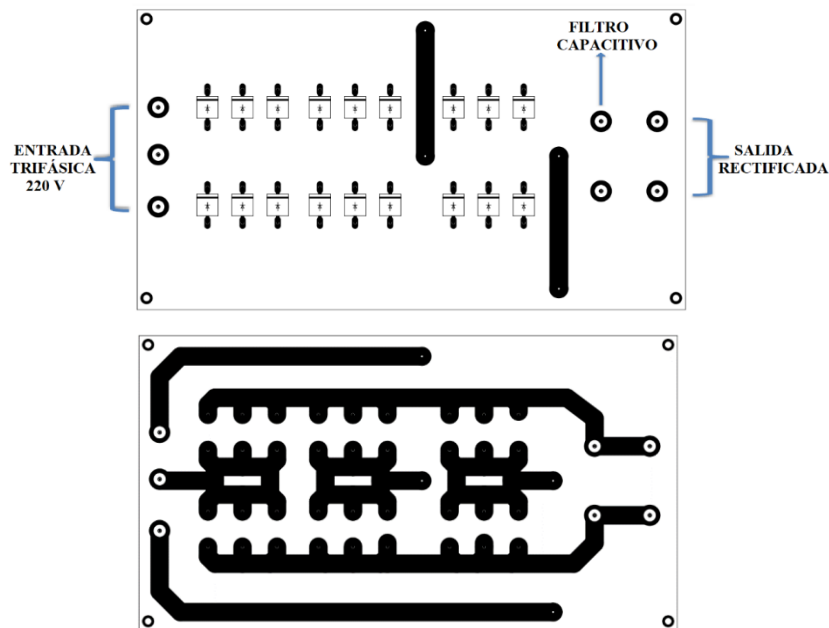


Figura 75. Prototipo de implementación para el rectificador trifásico

Las pistas para el circuito impreso fueron calculadas debidamente de acuerdo a la corriente que circulará.

5.1.2. Filtro

El filtrado se realizará con un condensador de 3300 μF a la salida del rectificador trifásico, esto para mejorar el rizado de la señal en cd, como se muestra en la figura 74.

5.1.3. Implementación real

En la figura 75 se puede observar la implementación final y real del sistema de rectificación trifásica, donde se puede evidenciar lo diseñado y calculado anteriormente.

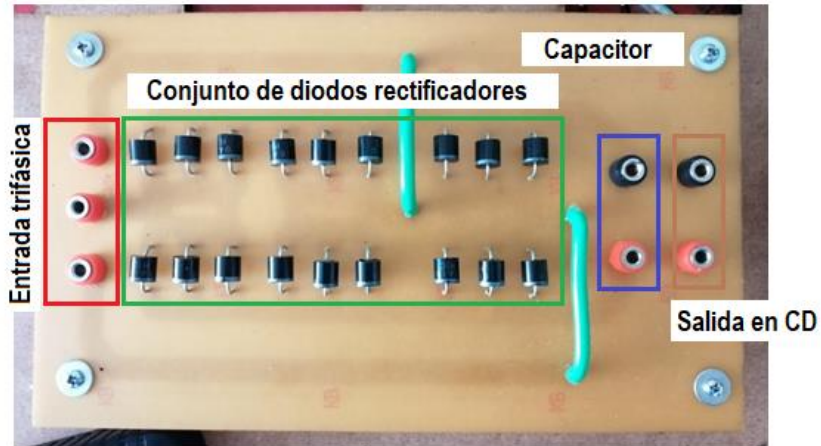


Figura 76. Implementación real del rectificador trifásico

En la figura 76 se observa la implementación real del rectificador trifásico ya diseñado y calculado; se puede observar la entrada trifásica, los diodos rectificadores, la salida para la conexión del filtro capacitivo y para la entrada del convertidor CD-CD.



Figura 77. Filtro capacitivo para el rectificador trifásico

La figura 77 muestra el filtro capacitivo utilizado en el proceso de rectificación, en este caso se maneja un capacitor de 3300 uF, y 400 VCD.

5.2. Implementación del convertidor CD-CD

5.2.1. Alimentación

El convertidor CD-CD de elementos reducidos es alimentado por el voltaje de salida del rectificador trifásico.

5.2.1. Prototipo final

En la figura 77 se puede observar el prototipo final del convertidor CD-CD de elementos reducidos, el cual contiene todas las etapas y componentes explicados y hallados anteriormente.

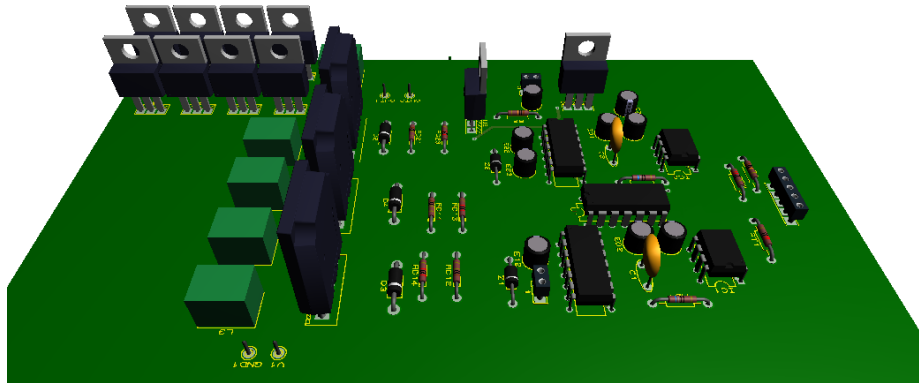


Figura 78. Prototipo final del convertidor CD-CD

5.2.2. Implementación real del convertidor

Bobinas

Las bobinas fueron implementadas tal cual se propuso y se diseñó en el proyecto, son 4 las cuales cada una tiene un valor de 51 uH, estas se pueden observar en la figura 79.



Figura 79. Bobinas implementadas para el convertidor CD-CD

Convertidor CD-CD

En la figura 80 se observa la implementación real del convertidor CD-CD, con todas las etapas y procesos vistos en el prototipo final de diseño.

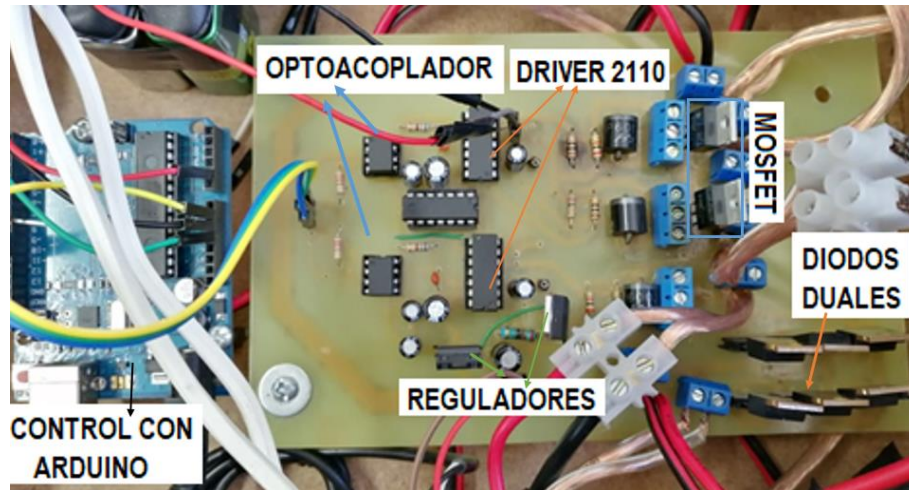


Figura 80. Implementación final del convertidor CD-CD

Filtro

En la figura 81 se muestra el capacitor utilizado para el convertidor CD-CD, el cual para el rectificador es uno de igual valor.



Figura 81. Capacitor utilizado como filtro para el sistema

IMPLEMENTACIÓN FINAL DEL SISTEMA

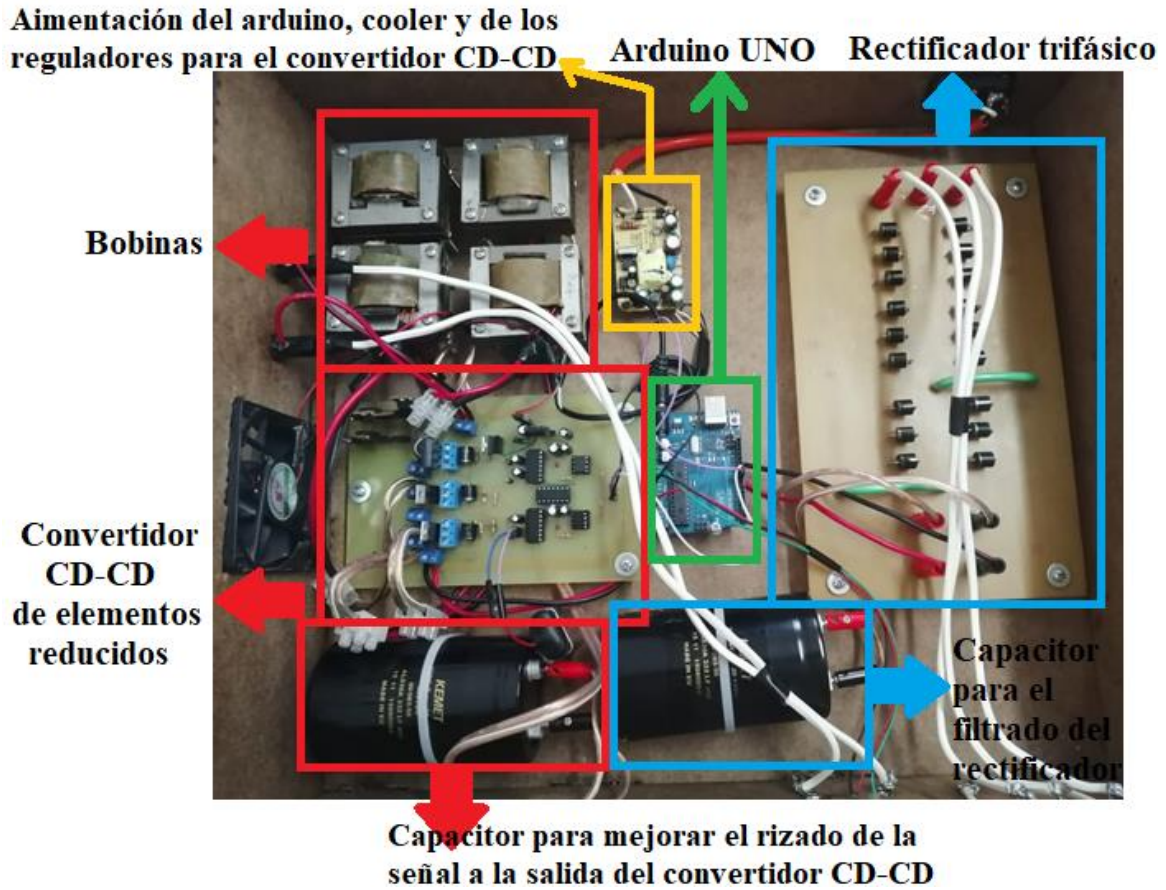


Figura 82. Implementación final del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos

En la figura 82 se puede observar la implementación final del sistema, con todas sus etapas, elementos y dispositivos que lo conforman.

CAPÍTULO 6

PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Introducción

En la siguiente sección se comprobará o validará el funcionamiento del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos, el cual fue diseñado e implementado anteriormente, los valores tomados van desde la señal de entrada, hasta la señal de salida elevando o reduciendo según se requiera.

6.1. PRUEBAS PARA LA VALIDACIÓN DEL SISTEMA

Después de haber realizado las pruebas de funcionamiento, se obtuvieron datos de voltaje y corriente a la entrada y a la salida del sistema del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos, que demuestra que el voltaje a la salida se reduce y se eleva por medio del control. Las pruebas de funcionamiento fueron 3 etapas, las cuales son:

- I. Señales de control a la entrada
- II. Pruebas de funcionamiento como reductor
- III. Pruebas de funcionamiento como elevador

En la figura 83 se pueden observar las conexiones necesarias para validar el sistema, es decir realizar las pruebas de funcionamiento, comprobando así que éste funciona.

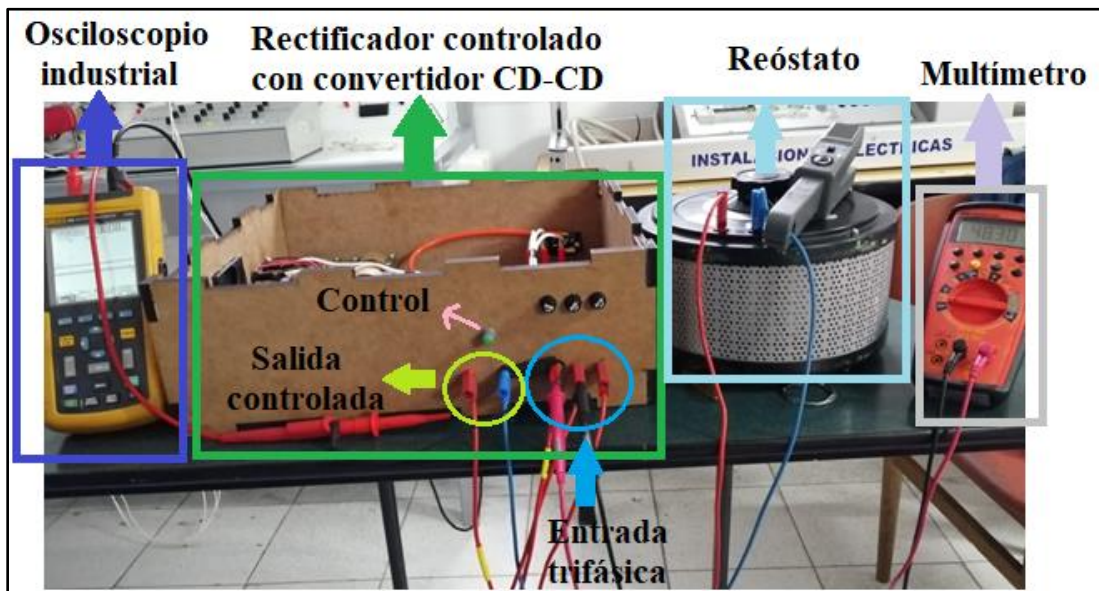


Figura 83. Pruebas para la validación del sistema

Los elementos para las conexiones de las pruebas se conforman así: El sistema del rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos, un osciloscopio industrial para observar las formas de onda de las señales de control, voltaje de entrada y salida, un reóstato que en este caso funciona como una carga y tres multímetros para obtener medidas de tensión en diferentes puntos del sistema y corriente en la carga.

Estos instrumentos de medición deben estar calibrados y en buen estado para que los datos sean verídicos y confiables.

6.1.1. Tensión de entrada

En la figura 84 se puede observar el valor y la onda de tensión trifásica a la entrada del rectificador.

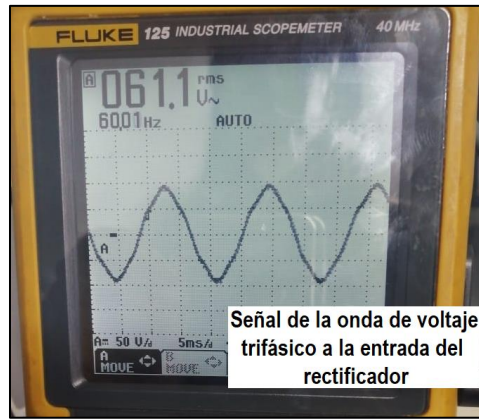


Figura 84. Forma de onda de la tensión de entrada trifásica

En esta primera imagen se observa la forma de onda de la tensión de entrada trifásica, la cual se tomó de 60 V AC, la onda es perfectamente sinusoidal y la frecuencia del sistema es de 60 HZ.

6.1.2. Tensión de salida del rectificador

En la figura 85 se puede observar el valor y la forma de onda a la salida del rectificador, sin el filtro capacitivo y con el filtro, comprobándose así el correcto funcionamiento del filtrado.



Figura 85. Forma de onda y valor de la tensión a la salida del rectificador trifásico

Nótese que la rectificación es de onda completa, tal como se diseñó, para luego ser filtrada por el capacitor, ésta última señal es la entrada al convertidor CD-CD para que se encargue del control de todo el sistema, debe reducir y elevar esta señal de tensión.

6.1.3. Señales de control en el convertidor CD-CD

En la figura 86 se observan la forma de onda de las señales PWM, tanto como cuando está en (a) modo elevador, como en (b) modo reductor. La frecuencia es tal cual la que es estipulada en el diseño y en el control, 31 KHz.

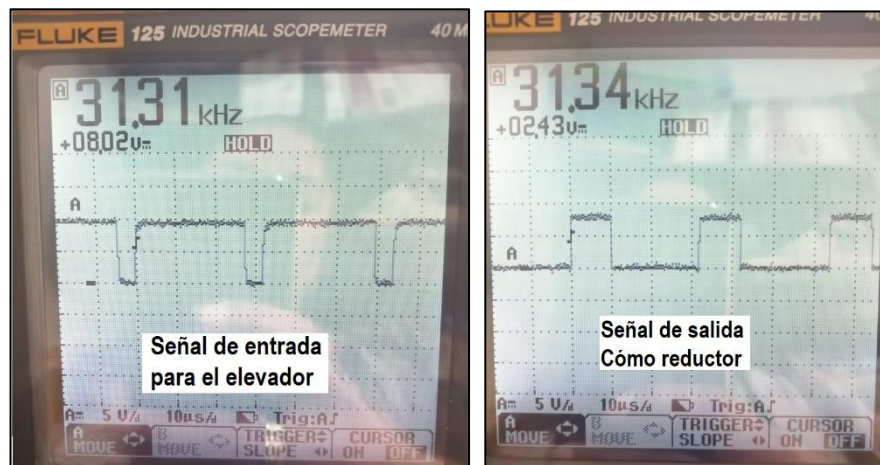


Figura 86. Formas de onda de las señales de control tanto en modo elevador como en modo reductor

Estas señales de control son generadas por el arduino UNO, donde se programó el algoritmo de control para que aumente o disminuya el ciclo de trabajo según la tensión deseada. Este control es maniobrado por un potenciómetro que está conectado a una señal análoga del arduino UNO.

6.1.4. Convertidor CD-CD funcionando como reductor

En la figura 87 se observa el valor de voltaje y corriente obtenido a la salida del convertidor, éste funcionando como reductor, cabe resaltar que en la entrada del rectificador hay 42,3 voltios en alterna, en la entrada del convertidor hay 60,5 voltios en directa y 0,2 amperios en la carga. Se puede constatar que se está logrando reducir el voltaje a 19,49 voltios, validando lo diseñado e implementado.



Figura 87. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD-CD, comportándose como reductor

En la figura 88 se cambia el voltaje de entrada para probar otro ejemplo, en este caso es de 56,2 voltios en alterna, la entrada del convertidor es de 81,28 voltios en directa.



Figura 88. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD-CD, comportándose como reductor, 2da prueba

Se puede observar que el voltaje se reduce a 15,14 VDC con ayuda del potenciómetro, además de ser regulada,

Valor de la carga utilizada

En la figura 89 se puede observar mediante el multímetro el valor de la carga que se utilizó para la prueba, en este caso se utilizó un reóstato, con una resistencia de 43,8 ohm, en ésta se toma el valor de corriente y de voltaje.



Figura 89. Valor de la carga utilizada para la prueba como reductor

Convertidor CD-CD funcionando como elevador

En la figura 90 se observa el valor de voltaje y corriente obtenido a la entrada y salida del convertidor, éste funcionando como elevador, cabe resaltar que en la entrada del rectificador hay 26,66 vac, en el bus de CD hay 29,56 vcd y una corriente de 6,62 A. Se puede constatar que se está logrando elevar el voltaje, obteniéndose a la salida 52,2 vdc; no obstante se debe tener en cuenta la capacidad de corriente y voltaje de los componentes que conforman el sistema, para no ocasionar daños.



Figura 90. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD-CD comportándose como elevador

En la figura 91 se cambia el voltaje de entrada para probar otro ejemplo, en este caso es de 9,69 VAC, el bus de CD contiene 12,29 VDC y 2,021 A.



Figura 91. Formas de onda y valores de tensión y corriente a la salida del convertidor CD-CD comportándose como elevador

Se puede evidenciar que se está logrando elevar el voltaje, obteniéndose a la salida 35,12 vdc;

Valor de la carga utilizada

En la figura 92 se puede observar mediante el multímetro el valor de la carga que se utilizó para la prueba, en este caso se utilizó un reóstato, con una resistencia de 100,8 ohm, en ésta se toma el valor de corriente y de voltaje.



Figura 92. Valor de la carga utilizada para la validación del Sistema

Forma de onda de la corriente en el bus de CD

En la figura 93 se puede observar mediante el osciloscopio la forma de onda de la corriente en el bus de CD.

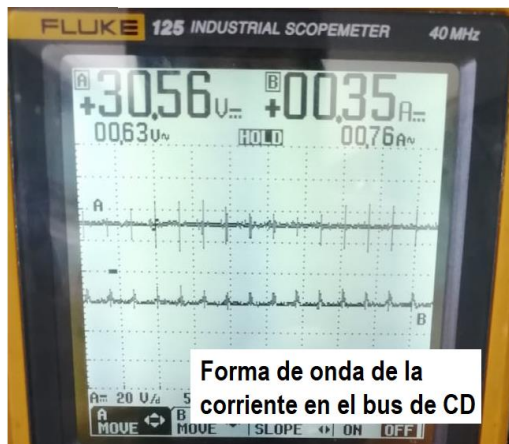


Figura 93. Forma de onda de la corriente en el bus de CD

Forma de onda del voltaje en el bus de CD

En la figura 94 se puede observar mediante el osciloscopio la forma de onda de la corriente en el bus de CD.

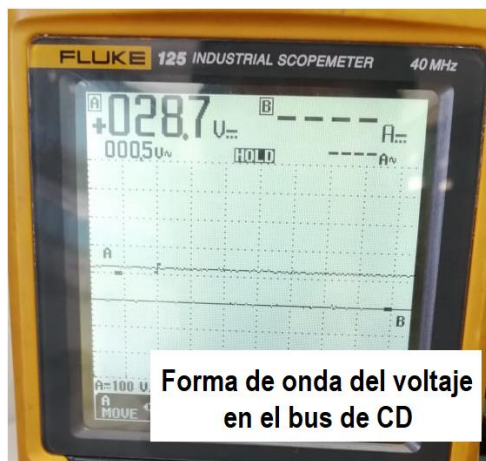


Figura 94. Forma de onda del voltaje en el bus de CD

CONCLUSIONES

Realizando un estudio teórico fue posible seleccionar las topologías tanto para el rectificador trifásico como para el convertidor CD-CD, se debe tener como criterio de selección el tipo de control que se desea aplicar. En cuanto al rectificador trifásico se seleccionó de onda completa y con estructura en puente no controlado ya que esta topología presenta un proceso de rectificación más efectiva y sencilla a su vez, dando como resultado una onda completamente lisa gracias al filtro capacitivo a la salida de éste, no es controlado porque este proceso lo realiza el convertidor acoplado. El convertidor CD-CD se seleccionó buck - boost no inversor de elementos reducidos, el cual requiere un solo inductor, este convertidor es el encargado del control del sistema mediante señales de modulación de ancho de pulso PWM; al ser de elementos reducidos es de menor costo y diseño sencillo, su estructura es básicamente la conexión en cascada de un convertidor reductor con un convertidor elevador.

El control del sistema se desarrolla utilizando la plataforma arduino, el cual contiene un microcontrolador que maneja una exactitud aceptable en el PWM y la técnica de control empleada. Una de las ventajas de éste fue el uso del lenguaje C, por lo que permitió realizar el código de una forma sencilla y eficiente. Además, debido a su gran rendimiento, permitió recibir la señal de tensión a controlar, procesarla y enviarla a la salida por medio de una señal modulada en ancho de pulso.

El sistema implementado permite elevar o reducir la tensión de salida en corriente directa, teniendo una entrada trifásica en corriente alterna, para esto se cuenta con el control que se le realiza y diferentes etapas en el proceso, este control se maneja desde una resistencia variable conectada a una señal análoga del ARDUINO donde lo convierte a señales digitales PWM para controlar los interruptores que en este caso son MOSFET, los cuales se activan o desactivan dependiendo del estado que se les asigne, es decir ya sea elevador o reductor.

El algoritmo de control se basa en la función de mapeo donde se permite hacer equivalencias entre diferentes rangos; el primer paso fue generar la frecuencia PWM para la que fue diseñado, luego se realizó el ajuste de la resistencia variable a la entrada análoga, para conectarse a un condicional donde se pregunta si el rango de ésta es menor a 900, entonces se realice el mapeo, es decir se pase de 0,900 a 0,255 para poder hacer la equivalencia, ya que la señal PWM solo maneja valores de 0 a 255; ahora bien, si esto no se cumple es porque

la resistencia variable es mayor a 900, realizándose otro mapeo donde se pasa del valor de 900, 1023 a 120, 255, para después asignar las salidas siendo la primera modo reductor y la segunda modo elevador.

Los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento concuerdan en su totalidad con los simulados, donde se pueden observar las señales en entrada y las de salida, tanto de voltaje como de corriente, realizándose la comparación entre éstas, logrando cumplir con los objetivos del proyecto.

El sistema de rectificador controlado con convertidor CD-CD de elementos reducidos propuesto se acopla al programa de ingeniería eléctrica y al laboratorio de electrónica de potencia de la universidad de Pamplona tanto en sus entradas como en su funcionamiento con los equipos existentes sin ningún requerimiento adicional, lo que permite su uso para investigaciones y prácticas donde se requiera obtener una tensión regulada y alta corriente en CD.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Campos Delgado, «Experimentos en teoría de control: Convertidores CD-CD,» *Facultad de ciencias (UASLP)*, 2017.
- [2] M. González Valencia y A. Alzate Gómez, «Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional,» *con-ciencias*, p. 7, 2009.
- [3] C. A. Villarreal Hernández, «Modelado y control de un convertidor CD-CD boost intercalado,» *Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey*, p. 12, 2017.
- [4] D. Campos-Delgado , «Experimentos en Teoría de Control: Convertidores CD-CD.,» *Facultad de Ciencias (UASLP)*, 2017.
- [5] V. Galera Ortega, «Simulador Convertidores DC -DC,» *URV*, pp. 23 - 36, 2002.
- [6] L. D. Pabón Fernandez, J. L. Díaz Rodriguez y A. Pardo García, «Simulación del convertidor CD-CD Buck-Boost de elementos reducidos,» *Bistua*, 2018.
- [7] D. A. Acosta García y V. A. Espinosa Valladolid, «Simulación en PSIM de convertidores CA-CD controlados,» *Pistas educativas*, 2015.
- [8] A. Mendoza, «Electrónica de potencia,» 2016. [En línea]. Available: <http://fotovoltaico.galeon.com/tema2A.pdf>. [Último acceso: 16 05 2019].
- [9] M. Rashid, *Electónica de potencia : Circuitos, dispositivos y aplicaciones*, México, 1993.
- [10] N. Mohan, T. M. Undeland y W. P. Robbins, *ELECTRÓNICA DE POTENCIA: Convertidores, aplicaciones y diseño*, México, 2009.
- [11] STMicroelectronics, «Application note AN2389: An MCU-based low cost non-inverting buck-boost converter for battery chargers,» pp. 1-18, 2007.
- [12] C. Ramírez Gómez, A. Saavedra Montes y C. Ramos Paja, *Diseño de un convertidor CD-CD y su control para un sistema de generación eólico conectado a una carga aislada*, Medellín, 2013.
- [13] D. Ramírez y C. Daza, «DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA MÓVIL SEGUIDOR DE LÍNEA Y DETECTOR DE OBSTÁCULOS,» *Ingeniería, Matemáticas y ciencias de la información*, 2018.
- [14] D. Ballesteros, «MODULACIÓN PWM EN FPGA BASADO EN MÁQUINAS DE ESTADO FINITO,» *Scientia et Technica*, 2018.

- [15] J. J. J. Marulanda Durango, J. J. Ordoñez y L. F. Mosquera Machado, «Diseño y construcción de un convertidor dc/dc tipo Boost con PWM ajustable,» *Scientia et Technica Año XXII*, vol. 22, p. 9, 2017.