



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

## **ELEMENTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

**Héctor Augusto Mendoza Dardón**

Asesorado por el Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

Guatemala, agosto de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

## **ELEMENTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**HÉCTOR AUGUSTO MENDOZA DARDÓN**

ASESORADO POR EL INGENIERO GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO ELECTRICISTA**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



### **NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

### **TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

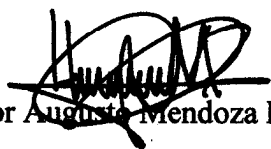
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Otto Andrino González
EXAMINADOR	Ing. Armando Gálvez Castillo
EXAMINADOR	Ing. Saúl Cabezas Durán
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **ELEMENTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica con fecha 9 de febrero de 2005.

  
Héctor Augusto Mendoza Dardón

## **AGRADECIMIENTO A:**

### **MIS PADRES**

Elías Mendoza y Elizabeth de Mendoza, por darme incondicionalmente todo su apoyo, en todas las etapas de mi vida. Sin su ayuda nunca habría alcanzado esta meta.

### **ASESOR**

Ingeniero Gustavo Orozco, por su ayuda y orientación durante el desarrollo de este trabajo de graduación.

### **PADRINOS DE GRADUACIÓN**

Ingenieros Luis Arturo Méndez y Erick Bolaños, por su ejemplo como profesionales y hombres empeñados siempre en dar su mejor esfuerzo.

### **COMPAÑEROS Y AMIGOS**

Quienes me brindaron su ayuda y amistad durante estos años, dentro y fuera de las aulas. Y en especial al ingeniero Luigi Vanfretti, quien además de brindarme su amistad, me animó y ayudó a iniciar este trabajo

“Aquello que se considera secreto en la naturaleza, voy a probarlo de modo racional, con osadía, y lo que ella antes organizaba por su cuenta, ahora lo voy a hacer cristalizar...

Fijaos en la naturaleza de las cosas: mientras a lo natural ni siquiera parece bastarle el mundo, lo artificial sólo requiere un reducido espacio.”

Johann Wolfgang Von Goethe, *Fausto*

Guatemala, 20 de febrero de 2006

Ingeniero  
Jose Guillermo Bedoya  
Coordinador del Area de Potencia  
Escuela Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingenieria  
USAC

Estimado Ingeniero Bedoya:

De acuerdo con la designación hecha por la Dirección de Escuela, me permito informarle que he tenido a bien asesorar el Trabajo de Graduación titulado: ELEMENTOS DE ELECTRONICA DE POTENCIA, desarrollado por el estudiante HECTOR AUGUSTO MENDOZA DARDON, carné 2000-10443 y, encontrándolo satisfactorio en su contenido y resultados, me permito dar aprobación al mismo remitiéndole a esa Coordinación para el trámite pertinente, en el entendido que el Autor y este Asesor somos responsables del contenido y conclusiones del Trabajo.

Sin otro particular, me es grato suscribirme.

Atentamente,



Ing. Gustavo Benigno Orozco Godinez.  
ASESOR



Guatemala, 17 de agosto 2006.

FACULTAD DE INGENIERIA

Señor Director  
Ing. Mario Renato Escobedo Martinez  
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:  
**ELEMENTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA**, desarrollado  
por el estudiante; Héctor Augusto Mendoza Dardón, por considerar que  
cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. José Guillermo Bedoya Barrios  
Coordinador Área de Potencia

JGBB/sro







FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Area, al trabajo de Graduación del estudiante; Héctor Augusto Mendoza Dardón titulado: **ELEMENTOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Mario Renato Escobedo Martínez

DIRECTOR



GUATEMALA, 18 DE AGOSTO 2006.

Universidad de San Carlos  
de Guatemala



Facultad de Ingeniería  
Decanato

Ref. DTG. 299-2006.

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **ELEMENTOS DE ELÉCTRONICA DE POTENCIA** presentado por el estudiante universitario **Héctor Augusto Mendoza Dardón**, procede a la autorización para la impresión del mismo.

IMPRIMASE.

  
Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, Agosto 28 de 2006

/demf

*Fidei pro a. Evangelista Alfo*  
Dr. Carlos Martínez Durán  
2006: Centenario de su Nacimiento

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XI</b>
<b>GLOSARIO.....</b>	<b>XIII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>XV</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>XVII</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 CONCEPTOS PRELIMINARES.....</b>	<b>1</b>
1.1 Definición de electrónica de potencia.....	1
1.1.1 Esquema de un sistema con electrónica de potencia.....	2
1.2 Corriente directa.....	4
1.2.1 Modelo de un circuito de corriente directa .....	5
1.3 Corriente alterna.....	6
1.3.1 Modelo de un circuito de corriente alterna .....	7
1.3.2 Corriente alterna monofásica .....	9
1.3.2.1 Modelo de un circuito de corriente alterna monofásica .....	11
1.3.3 Corriente alterna trifásica.....	13
1.3.3.1 Modelo de un circuito de corriente alterna trifásica.....	16
1.4 Diodos de potencia.....	18
1.4.1 Diodo en polarización directa .....	19
1.4.2 Diodo en polarización inversa.....	20
1.4.3 Modelo de un diodo en un circuito de corriente alterna .....	21

1.5	Tiristor.....	24
1.5.1	Tiristor en polarización directa .....	25
1.5.2	Tiristor en polarización inversa.....	25
1.5.3	Modelo de un tiristor en un circuito de corriente alterna .....	26
1.6	Transistor bipolar de compuerta aislada IGBT .....	27
1.6.1	Transistor IGBT en saturación .....	29
1.6.2	Transistor IGBT en corte.....	30
1.6.3	Modelo de un transistor bipolar de compuerta aislada IGBT .....	31
<b>2</b>	<b>CONVERSORES DE CORRIENTE ALTERNA A CORRIENTE DIRECTA..</b>	<b>33</b>
2.1	Rectificadores no controlados .....	34
2.1.1	Rectificador no controlado monofásico .....	34
2.1.1.1	Modelo de un rectificador no controlado monofásico .....	35
2.1.2	Rectificador no controlado trifásico.....	39
2.1.2.1	Modelo de un rectificador no controlado trifásico .....	39
2.2	Rectificadores controlados .....	44
2.2.1	Rectificador controlado monofásico .....	44
2.2.1.1	Modelo de un rectificador controlado monofásico .....	45
2.2.2	Rectificador controlado trifásico.....	51
2.2.2.1	Modelo de un rectificador controlado trifásico .....	51
<b>3</b>	<b>CONVERSORES DE CORRIENTE DIRECTA A CORRIENTE ALTERNA..</b>	<b>57</b>
3.1	Inversor monofásico en configuración tipo puente .....	58
3.1.1	Modelo de un inversor monofásico en configuración tipo puente .....	60
3.2	Inversor trifásico en configuración tipo puente.....	68
3.2.1	Modelo de un inversor trifásico. ....	69

<b>4</b>	<b>CONVERSORES DE CORRIENTE DIRECTA A CORRIENTE DIRECTA ..</b>	<b>81</b>
4.1	Convertor reductor de corriente directa a corriente directa.....	82
4.1.1	Modelo de un convertor reductor de corriente directa a corriente directa....	85
4.2	Convertor elevador de corriente directa a corriente directa.....	90
4.2.1	Modelo de un convertor elevador de corriente directa a corriente directa ...	94
<b>5</b>	<b>CONVERSORES DE CORRIENTE ALTERNA A CORRIENTE</b>	
	<b>ALTERNA.....</b>	<b>99</b>
5.1	Controladores de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase .....	100
5.1.1	Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase .....	104
5.2	Controladores de voltaje de corriente alterna por encendido y apagado .....	107
5.2.1	Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por encendido y apagado .....	109
<b>6</b>	<b>APLICACIONES.....</b>	<b>113</b>
6.1	Convertores para el control de máquinas.....	113
6.1.1	Convertor para el control de máquinas de corriente directa .....	114
6.1.2	Convertor para el control de máquinas de corriente alterna .....	115
6.2	Generación eólica.....	118
6.2.1	Sistemas eólicos con un nivel parcial de electrónica de potencia.....	119
6.2.2	Sistemas eólicos completamente basados en electrónica de potencia .....	121
6.3	Celdas de combustible.....	122
6.4	Sistemas fotovoltaicos.....	124
6.5	Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna .....	127
6.5.1	Compensadores en derivación .....	129
6.5.2	Compensadores en serie.....	131
6.5.3	Controlador unificado de flujo de potencia.....	132

**CONCLUSIONES**.....135  
**RECOMENDACIONES**.....137  
**BIBLIOGRAFÍA**.....139  
**APÉNDICES**.....141

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Esquema de un sistema de electrónica de potencia.....	2
2	Modelo de un circuito de corriente directa .....	5
3	Gráfica de corriente directa contra tiempo.....	5
4	Modelo de un circuito de corriente alterna .....	8
5	Gráfica de corriente alterna contra tiempo.....	8
6	Modelo de un circuito de corriente alterna monofásica .....	11
7	Gráficas de corriente, voltaje y potencia contra tiempo en un sistema monofásico ..	12
8	Gráficas de corriente, voltaje y potencia contra tiempo con carga resistiva e inductiva.....	13
9	Carga trifásica balanceada conectada en Y.....	14
10	Modelo trifásico con carga balanceada.....	17
11	Gráficas de voltaje, corriente y potencia trifásica contra tiempo.....	18
12	Símbolo de un diodo .....	19
13	Modelo de corriente alterna con un diodo.....	22
14	Gráficas de voltaje y corriente contra tiempo del modelo de la figura 13 .....	23
15	Símbolo de un tiristor.....	24
16	Modelo de un circuito de corriente alterna con tiristor .....	26
17	Gráficas de voltaje en la fuente, generador de pulsos, corriente y voltaje en la carga .....	27
18	Símbolo de un transistor de compuerta aislada IGBT .....	28
19	Modelo de un transistor IGBT .....	31
20	Corriente y voltaje entre colector y emisor, voltaje en la carga, voltaje en la compuerta.....	32

21	Símbolo de un rectificador .....	33
22	Rectificador conectado en puente .....	34
23	Modelo de un rectificador monofásico con diodos conectados en configuración puente .....	35
24	Diferentes tipos de puentes .....	36
25	Curvas de corriente y voltaje en la carga de la figura 23 .....	37
26	Esquema equivalente del puente universal.....	40
27	Modelo de un rectificador trifásico con bloque puente universal .....	40
28	Curvas de corriente y voltaje en la carga y voltaje en la fuente.....	42
29	Modelo de un rectificador monofásico controlado .....	46
30	Gráficas de voltaje en la fuente, voltaje y corriente en la carga y voltaje en los generadores de pulsos.....	47
31	Curva de porcentaje del voltaje promedio contra ángulo de disparo .....	49
32	Curva de porcentaje de voltaje eficaz contra ángulo de disparo .....	50
33	Modelo de un rectificador trifásico controlado .....	52
34	Vista interna del bloque Trigger.....	53
35	Gráficas de corriente en la carga, voltaje en la fuente, pulsos de sistema de control	54
36	Curva de porcentaje del voltaje promedio contra ángulo de disparo .....	56
37	Curva de porcentaje del voltaje eficaz contra ángulo de disparo .....	56
38	Símbolo de un inversor .....	57
39	Inversor monofásico en configuración tipo puente .....	59
40	Modelo de un inversor monofásico en configuración tipo puente .....	61
41	Vista interna del subsistema Sub 1 .....	62
42	Voltaje y corriente en la carga, señal de salida en los generadores de pulsos PG1 y PG2.....	63
43	Gráfica de la función 3.3 .....	65
44	Esquema de un inversor trifásico .....	69
45	Puente universal de transistores con compuerta aislada.....	70



46	Bloque de control con 6 generadores de pulsos .....	71
47	Modelo de un inversor trifásico .....	71
48	Gráficas de voltaje de línea a línea de las tres fases de la figura 47 .....	72
49	Gráfica de la función 3.8.....	75
50	Gráficas de voltaje de línea a neutro de las tres fases de la figura 47.....	76
51	Gráfica de la función 3.13.....	78
52	Símbolo de un convertor de corriente directa a corriente directa.....	81
53	Circuito de un convertor reductor.....	82
54	Creación de la señal de disparo en un convertor reductor .....	83
55	Modelo de un convertor reductor de corriente directa a corriente directa.....	86
56	Subsistema Control 1 .....	86
57	Gráfica de voltaje contra tiempo sin filtro en la salida .....	88
58	Gráfica de voltaje contra tiempo con filtro en la salida .....	88
59	Sección ampliada de la figura 57 .....	90
60	Circuito de un convertor elevador .....	91
61	Función de transferencia de ecuación 4.14 .....	94
62	Modelo de un convertor elevador de corriente directa a corriente directa .....	95
63	Elementos del subsistema Control 1 .....	96
64	Señal de salida del subsistema Control 1 .....	96
65	Voltaje aplicado a la carga del modelo de la figura 62.....	97
66	Sección ampliada de la figura 65 .....	98
67	Símbolo de un convertor de corriente alterna a corriente alterna.....	100
68	Circuito de un controlador de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase .....	101
69	Voltaje aplicado a la carga, pulsos de disparo en el tiristor 1, pulsos de disparo en el tiristor 2.....	102
70	Gráfica normalizada de la ecuación 5.2 .....	104
71	Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase .....	105

72	Voltaje aplicado a la carga, pulsos de disparo en tiristor 1 y pulsos de disparo en tiristor 2.....	106
73	Ciclos completos que son permitidos (n) y anulados (m) por el interruptor.....	108
74	Porcentaje del voltaje máximo contra el ciclo de trabajo.....	110
75	Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por encendido y apagado.....	111
76	Voltaje entregado por la fuente de corriente alterna, voltaje aplicado a la carga, pulsos de disparo para el tiristor 1 y el tiristor 2.....	112
77	Esquema de un convertor trifásico con tiristores para el control de una máquina de corriente directa. ....	114
78	Rectificador e inversor para el control de un motor de inducción .....	116
79	Señal senoidal de referencia y señal portadora para modulación por ancho de pulso.....	117
80	Turbina eólica con generador de inducción con rotor devanado .....	119
81	Turbina eólica con generador de inducción con rotor devanado y convertor conectado al rotor .....	120
82	Generador síncrono con caja de velocidad.....	121
83	Generador síncrono sin caja de velocidad.....	122
84	Celda de combustible con un convertor de corriente directa a corriente directa y un inversor.....	123
85	Celda de combustible con un inversor y un convertor de corriente alterna a corriente alterna .....	124
86	Sistema fotovoltaico integrado.....	125
87	Estructura básica de un sistema fotovoltaico .....	127
88	Línea de transmisión sin pérdidas .....	128
89	Reactor controlado por tiristores .....	129
90	Capacitor controlado por tiristores.....	130
91	Capacitores en serie controlados por tiristores.....	131

92	Controlador unificado de flujo de potencia.....	132
93	Diagrama vectorial de la suma de voltajes.....	133

## **TABLAS**

I	Resultados del análisis de Transformada de Fourier para un inversor monofásico .....	67
II	Resultados del análisis de Transformada de Fourier para un inversor trifásico.....	73
III	Resultados del análisis de Transformada de Fourier para voltaje de línea a neutro.....	80

*(Esta página se dejó en blanco intencionalmente)*

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>VA</b>	Voltamperio
<b>MVA</b>	Metgavoltamperio
<b>W</b>	Vatio
<b>MW</b>	Megavatio
$\omega$	Velocidad angular
$t$	Tiempo
<b>Hz</b>	Hertzios
$v(t)$	Voltaje en función del tiempo
$i(t)$	Corriente en función del tiempo
$v_{m\acute{a}x}$	Voltaje máximo
$i_{m\acute{a}x}$	Corriente máxima
$p$	Potencia instantánea
$\phi$	Ángulo de desfase
<b>IGBT</b>	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor bipolar con compuerta aislada)
<b>BJT</b>	<i>Bipolar Junction Transistor</i> (Transistor de unión bipolar)
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i> (Valor cuadrático medio)
$V_m$	Voltaje promedio
$I_m$	Corriente promedio
$V_{RMS}$	Voltaje eficaz
$I_{RMS}$	Corriente eficaz
$V_s$	Voltaje de la fuente
<b>FF</b>	Factor de forma
<b>RF</b>	Factor de rizo

<b>D</b>	Diodo
<b>T</b>	Período
<b>F</b>	Frecuencia
<b><math>\alpha</math></b>	Ángulo de disparo
<b>AC</b>	Corriente alterna
<b>DC</b>	Corriente directa
<b>Q</b>	Transistor
<b>R</b>	Resistencia
<b><math>a_n</math></b>	Valor máximo de las componentes pares en una serie de Fourier
<b><math>b_n</math></b>	Valor máximo de las componentes impares en una serie de Fourier
<b><math>a_0</math></b>	Valor promedio que debe sumarse a la serie de Fourier
<b>THD</b>	<i>Total Harmonic Distortion</i> (Distorsión armónica total)
<b><math>\Delta</math></b>	Cambio

## GLOSARIO

<b>Ciclo de trabajo</b>	Se obtiene al dividir el tiempo en que una señal periódica permanece con un valor alto dentro del período de la misma señal
<b>Convertor</b>	Conjunto de dispositivos que es capaz de entregar energía en su salida, pero con diferentes características a la energía de entrada
<b>Factor de potencia</b>	Resultado de dividir la potencia real dentro de la potencia aparente
<b>Inversor</b>	Convertor que recibe corriente directa y entrega corriente alterna
<b>Polarización</b>	Establecimiento de una diferencia de potencial entre dos conductores o semiconductores.
<b>Rectificador</b>	Convertor que recibe corriente alterna y entrega corriente directa
<b>Serie de Fourier</b>	Representación de una función periódica por medio de la sumatoria infinita de términos seno y coseno

*(Esta página se dejó en blanco intencionalmente)*



## RESUMEN

Dentro de un curso a nivel universitario de electrónica de potencia, es muy importante estar familiarizado con la forma de operación de los dispositivos actuales. Es por esta razón que en el contenido del primer capítulo de este trabajo se muestran las características del transistor de compuerta aislada, diodo de potencia y tiristores. Desde el primer capítulo se incluyen modelos elaborados en *Simulink 6.1*, una librería de *Matlab 7.0*, con estos modelos y su simulación se pueden obtener resultados muy importantes para ser estudiados.

Después de conocer los dispositivos individualmente, se continúa con la forma de operación y los dispositivos necesarios para construir un convertor de corriente alterna a corriente directa. Debido a que este es uno de los convertidores más difundidos el segundo capítulo presenta los convertidores no controlados y los convertidores controlados, dentro de cada uno se incluye un convertidor monofásico y un trifásico.

En los convertidores de corriente directa a corriente alterna, descritos en el tercer capítulo, su alimentación es presentada como una fuente de corriente directa, aunque en la realidad estos dispositivos muchas veces son alimentados por un rectificador. Pero lo más importante, en este caso, es su forma de operación, el control de su frecuencia y su distorsión armónica total.

Los conversores de corriente directa a corriente directa son el equivalente de los transformadores en corriente alterna, por su capacidad de reducir o elevar el voltaje. Este tipo de conversores es presentado en el capítulo 4, aquí se muestran los parámetros que controlan el voltaje de salida y sus limitaciones.

Aunque el transformador es una máquina altamente eficiente para la conversión de energía, modificando el nivel de voltaje, no resulta la mejor opción para modificar el voltaje en rangos continuos. En estos casos se usan los conversores de corriente alterna a corriente alterna, el capítulo 5 está dedicado a estos conversores, estudiando sus limitaciones y su forma de controlar el voltaje utilizando elementos semiconductores.

Como se mencionó al principio, en cada capítulo se incluye una gran variedad de modelos y los resultados de sus simulaciones, logrando la unión de los conocimientos teóricos con el uso de programas computacionales.

# OBJETIVOS

- **General**

Conocer la forma de operación de los cuatro tipos de convertidores de energía estáticos, partiendo desde los elementos de electrónica de potencia que lo conforman hasta llegar a la simulación de los dispositivos y los convertidores.

- **Específicos**

1. Mostrar la importancia de los principales componentes, tanto pasivos como activos, en los convertidores basados en electrónica de potencia.
2. Conocer la forma de presentación de los resultados obtenidos en las simulaciones para su posterior análisis.
3. Que este documento sea de utilidad como material de apoyo para un curso de electrónica de potencia.

*(Esta página se dejó en blanco intencionalmente)*

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el crecimiento de la electrónica y dispositivos de estado sólido ha sido imparable y acelerado. Hace, aproximadamente, unos veinte años era impensable encontrar en el mercado diodos o transistores capaces de manejar altas potencias a precios razonables, pero en los días actuales esta tecnología, aunque aún se encuentra en desarrollo, ya tiene mayor presencia en las industrias y el mercado.

Debido a que durante el transcurso de la carrera como ingeniero electricista no se tiene la oportunidad de tomar un curso de electrónica de potencia, debido a la inexistencia del mismo, se elaboró el trabajo de graduación, enfocado en esta área. Además, se investigó en Matlab su enorme potencial, no solo en el área de ingeniería eléctrica, sino en cualquier ciencia. Se aprovechó la elaboración de este trabajo para aprender a utilizar este programa e incluirlo como una herramienta de aprendizaje de la electrónica de potencia.

La electrónica de potencia es una rama bastante amplia pero se fundamenta en los dispositivos semiconductores ya conocidos en la electrónica de pequeñas señales. Con estos dispositivos se pueden formar convertidores, por medio de los cuales es posible manipular la forma de la energía de acuerdo a las exigencias de las cargas. Cada convertidor puede ser utilizado sólo o en combinación con otro convertidor de diferente funcionamiento.

El equipamiento de un laboratorio para electrónica de potencia, o cualquier disciplina enfocada en potencia, es demasiado costoso para muchas universidades, incluyendo a la Universidad de San Carlos. Pero, actualmente, las computadoras son una herramienta más y no sólo en las empresas, pues muchas personas cuentan con una computadora personal en sus hogares. Con los programas computacionales adecuados y el conocimiento de cualquier ciencia exacta se pueden lograr grandes avances al hacer converger ambas cosas en la simulación por computadora de modelos matemáticos.

En el desarrollo de este trabajo ha sido de gran utilidad el programa *Matlab 7.0* y la librería *SimPowerSystems* –parte de una librería aún mayor llamada *Simulink 6.1*– dedicada a dispositivos empleados en sistemas de potencia. En ella se pueden encontrar desde una resistencia hasta una pequeña red para simulación de estudios de flujos de potencia, pasando por una gran variedad de elementos pasivos y activos. Si los modelos incluidos en esta librería no satisfacen las necesidades del usuario, el programa le deja en libertad de crear sus propios modelos, donde se pueden incluir todas las variables y condiciones iniciales que se deseen.

Todos los modelos que se encuentran en este trabajo han sido elaborados y simulados por el autor en una computadora personal. Las gráficas presentadas corresponden también a los resultados obtenidos por el autor, como consecuencia de dichas simulaciones. De la experiencia vivida en el proceso de autoaprendizaje de electrónica de potencia y utilización de Matlab / Simulink, se afirma que esta es una gran herramienta, la cual en un futuro no muy lejano, debe ser incluida en el pensum de estudios, no sólo de ingeniería eléctrica o electrónica, sino de cualquier ingeniería u otra ciencia.

# 1 CONCEPTOS PRELIMINARES

## 1.1 Definición de electrónica de potencia

La electrónica de potencia es todo lo referente a la conversión y el control de la energía eléctrica, al ser transformada de una forma hacia otra, por medio del uso de dispositivos activos (semiconductores de estado sólido) y dispositivos pasivos (transformadores, inductores, capacitores, etc.). Ambos grupos tienen como principal característica la capacidad de manejar altas corrientes y altos voltajes, lo que puede ser traducido en altos niveles de potencia. Estos pueden ir desde algunos VA, hasta cientos de MVA.

A diferencia de la electrónica de bajas corrientes, donde lo más importante es la ganancia y la alta fidelidad, en la electrónica de potencia las características principales son el rendimiento y la confiabilidad en el manejo de cantidades considerables de energía.

La principal forma de operación para los elementos activos es en conmutación, es decir en estados alternados de bloqueo y conducción. Por esta razón se desea que cuando el semiconductor esté bloqueado y soportando una alta tensión, la corriente de fuga sea despreciable, mientras que cuando el semiconductor esté conduciendo la caída de tensión sea mínima y soporte adecuadamente la circulación de corriente. Una analogía para esta forma de operación es el funcionamiento de un interruptor mecánico.

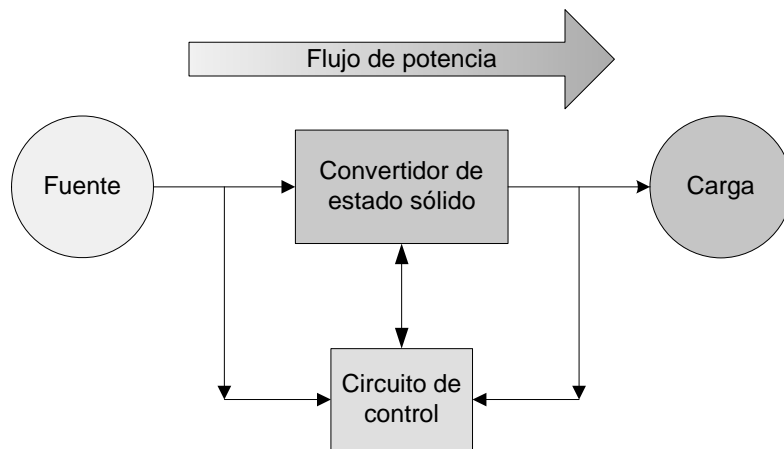
Gracias a las nuevas técnicas desarrolladas para la fabricación de dispositivos basados en el silicio, la tecnología de electrónica de potencia ha visto en la actualidad, una reducción del volumen físico en tres o cuatro veces el tamaño original de sus primeros dispositivos. Aunque siempre existirá una dependencia del nivel de potencia que se maneje.

Los tiempos de encendido y apagado también han sido reducidos de la escala de los milisegundos, a la escala de los microsegundos en los niveles más altos de potencia. Además para niveles de potencia más bajos se han alcanzado tiempos de conmutación en nanosegundos.

### 1.1.1 Esquema de un sistema con electrónica de potencia

En la figura 1 se muestra un diagrama de bloques para describir de forma general un sistema basado en electrónica de potencia y la interrelación de cada elemento.

**Figura 1. Esquema de un sistema de electrónica de potencia**





A continuación se da una breve descripción de los elementos que dan forma a cada uno de los bloques mostrados en la figura 1. La fuente se refiere a la fuente de energía que alimenta a todo el sistema, pudiendo ser de corriente alterna monofásica o corriente alterna trifásica.

Esta fuente de energía generalmente puede describir la red eléctrica o un generador aislado, por ejemplo, un generador eólico, un generador fotovoltaico, una pequeña hidroeléctrica, una turbina de gas o vapor, un motor de combustión interna, etc. Otra forma de fuente de energía es la que proporciona corriente directa, tal es el caso de baterías, celdas de combustible, paneles solares, etc.

El convertidor de estado sólido es el bloque que encierra los semiconductores de potencia (diodos, transistores, tiristores, etc.) y los elementos pasivos (transformadores, inductores, capacitores, etc.). Asimismo sirve como enlace entre la fuente de alimentación y la carga.

La carga es quien dicta los parámetros de la forma de energía eléctrica que requiere para su correcto funcionamiento, algunas de estas características son, potencia activa, potencia reactiva, frecuencia, niveles de voltaje, número de fases, etc.

El circuito de control puede tomar información antes del convertidor, después de él o en ambos puntos, para generar las señales de excitación requeridas por los semiconductores controlados (transistores, tiristores, etc.) tomando en cuenta los requerimientos de la carga. Actualmente los circuitos de control pueden utilizar microprocesadores para realizar todas las operaciones necesarias, y contar con memorias para el almacenaje de la información relevante.

## 1.2 Corriente directa

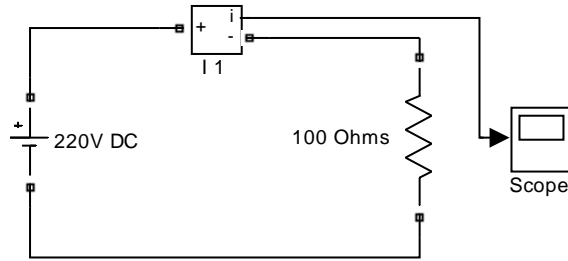
La corriente directa es aquella en la que los electrones libres que forman la corriente eléctrica, pueden moverse en el mismo sentido a través de un conductor. La principal ventaja de este tipo de corriente es que al transmitirse potencia eléctrica, no es necesario transmitir potencia reactiva. Esto da como resultado que la potencia eléctrica total transmitida sea potencia activa o real. Aprovechando de mejor manera la capacidad de los conductores utilizados para llevar a cabo la transmisión de energía eléctrica.

A pesar de ser un sistema muy eficiente en el uso de los medios de transmisión de potencia, posee una gran desventaja. Es muy difícil el cambio del nivel de tensión para una corriente directa, con esta restricción, su uso para fines de transmisión de potencia se ha visto truncado. Esto se debe a que los sistemas de transmisión de potencia están contruidos sobre la base del cambio de nivel de tensión y corriente. En la generación, transmisión, distribución y uso final de la energía se utilizan diferentes valores de tensión y corriente, con el objetivo de aprovechar la mayor cantidad de potencia eléctrica, atenuando las pérdidas en los conductores al transmitir y distribuir la potencia con altos niveles de voltaje y bajos niveles de corriente.

Las características propias de la corriente directa le han permitido ser de gran utilidad en otras aplicaciones. Tal es el caso de la electrónica industrial, comercial y doméstica. En este tipo de aplicaciones, el nivel de voltaje es muy importante, pues generalmente los usuarios tienen contacto directo con el equipo, por ello, es necesario trabajar con niveles de tensión y corriente bajos. Sumado a esto, la corriente directa resulta muy fácil de manejar en sistemas digitales, los cuales se encuentran presentes en todas las nuevas tecnologías.

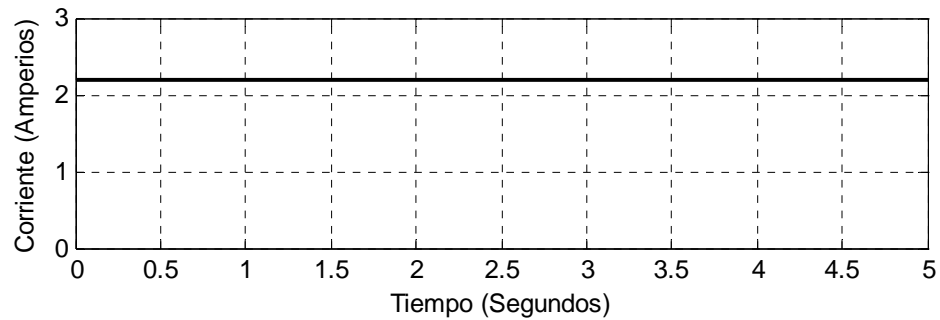
### 1.2.1 Modelo de un circuito de corriente directa

Figura 2. Modelo de un circuito de corriente directa



En la figura 2 se muestra un circuito con una fuente de 220 voltios de corriente directa, una carga de 100 ohmios, un medidor de corriente (I1) y un bloque para visualizar la corriente. Este circuito fue construido utilizando el programa computacional *MATLAB 7.0 / Simulink 6.0* y la librería de elementos *SimPowerSystems*

Figura 3. Gráfica de corriente directa contra tiempo



En la figura 3 se encuentra la gráfica de la corriente contra tiempo obtenida luego de simular por 5 segundos el circuito de corriente directa de la figura 2. La gráfica describe a la corriente como una línea recta a través del tiempo mostrando el comportamiento invariante de la corriente directa.

### **1.3 Corriente alterna**

La corriente alterna es aquella en la que los electrones libres que forman la corriente eléctrica, pueden moverse de un lado hacia otro y en ambos sentidos realizan el mismo recorrido a través de un conductor. Esta clase de corriente tiene una forma de onda del tipo senoidal y es ampliamente utilizada en la generación y transporte de energía eléctrica, además se utiliza para alimentar directamente equipos que funciona con corriente alterna. Dentro de este tipo de equipos se encuentran los motores, generalmente estos dispositivos son utilizados por los usuarios finales, para la conversión de la energía eléctrica a energía mecánica.

Para la generación y el uso de corriente alterna existe un parámetro muy importante, conocido como frecuencia. La frecuencia es la cantidad de ciclos completos que realiza la corriente durante un período de tiempo establecido, y su unidad de medida es el Hertzio (ciclos completos por segundo). Actualmente los sistemas eléctricos pueden ser de sesenta o cincuenta Hertzios, en nuestro país el sistema eléctrico funciona con una frecuencia de 60 Hertzios.

Debido a que la corriente alterna presenta un cambio respecto al tiempo, todo circuito o sistema que utiliza corriente alterna debe enfrentarse a la reactancia. Por reactancia se conoce a la oposición que cualquier elemento pueda presentar al cambio de una corriente. Existen dos tipos de reactancia, una es producida por el efecto capacitivo, y la otra se genera por el efecto inductivo.

Reactancia capacitiva:

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad (1.1)$$

Donde:

$j$ : es el número imaginario  $j^2 = -1$

$\omega$ : es  $2*\pi*frecuencia$

$C$ : es la capacitancia

Reactancia inductiva:

$$X_l = j\omega L \quad (1.2)$$

Donde:

$j$ : es el número imaginario  $j^2 = -1$

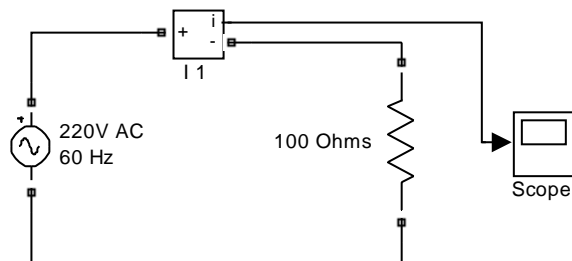
$\omega$ : es  $2*\pi*frecuencia$

$L$ : es la inductancia

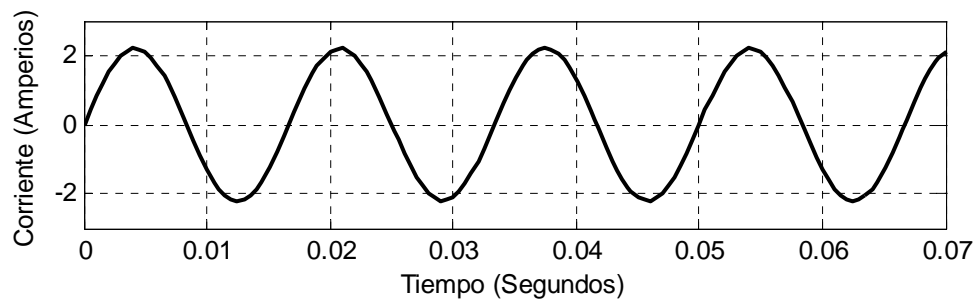
### 1.3.1 Modelo de un circuito de corriente alterna

En la figura 4 se muestra un circuito con una fuente de 220 voltios de corriente alterna con una frecuencia de 60 hertzios, una carga de 100 ohmios, un medidor de corriente identificado como I1 y un bloque para visualizar la corriente. Este circuito fue construido utilizando el programa computacional *MATLAB 7.0 / Simulink 6.0* y la librería de dispositivos de potencia *SimPowerSystems*

**Figura 4. Modelo de un circuito de corriente alterna**



**Figura 5. Gráfica de corriente alterna contra tiempo**



En la figura 5 se encuentra la gráfica de la corriente contra tiempo obtenida luego de simular por 0.07 segundos el circuito de corriente alterna de la figura 4. La gráfica muestra la corriente en la carga como una señal, cuya forma puede ser descrita por una función senoidal con un desfase igual a cero. También puede apreciarse claramente cómo su amplitud varía mientras avanza en el tiempo, y cómo existen cambios de polaridad, de positivo a negativo y negativo a positivo, entre los puntos máximos de la gráfica.

### 1.3.2 Corriente alterna monofásica

Este tipo de corriente es mucho más utilizado para alimentar cargas de tipo residencial, y son los equipos de corriente directa las que utilizan este tipo de corriente como fuente de alimentación. Las principales razones son su facilidad para convertirla de corriente alterna a corriente directa, de una forma económica y la necesidad de usar solamente dos conductores. Solo algunos tipos de motores relativamente pequeños, o cargas netamente resistivas utilizan corriente alterna monofásica sin convertirla en corriente directa. El hecho de no utilizar en cargas grandes corriente alterna monofásica se debe a que la potencia transmitida es pulsante y algunas veces la potencia puede alcanzar valores negativos. A continuación se presenta una explicación matemática, un circuito eléctrico y las gráficas correspondientes.

Considerando un circuito de corriente alterna donde el voltaje es:

$$v(t) = v_{\text{máx}} \sin(\omega t) \quad (1.3)$$

Y la corriente es:

$$i(t) = i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - \phi) \quad (1.4)$$

El ángulo  $\phi$ , que aparece en la ecuación 1.4 es positivo cuando la corriente se retrasa respecto al voltaje y es negativo cuando la corriente se adelanta respecto al voltaje. Este ángulo lo define la impedancia de la carga.

La potencia instantánea viene dada por:

$$p = v(t)i(t) \quad (1.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.3 y 1.4 en la ecuación 1.5 se tiene que:

$$p = v_{\text{máx}} i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t - \phi)$$

Utilizando la identidad trigonométrica:

$$\text{sen } A \text{sen } B = \frac{1}{2} (\cos(A - B) - \cos(A + B))$$

Se puede expresar la potencia instantánea de la siguiente manera:

$$p = v_{\text{máx}} i_{\text{máx}} \frac{1}{2} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - \phi))$$

$$p = \frac{v_{\text{máx}} i_{\text{máx}}}{2} \cos(\phi) - \frac{v_{\text{máx}} i_{\text{máx}}}{2} \cos(2\omega t - \phi) \quad (1.6)$$

En la ecuación 1.6 se muestra la potencia instantánea, formada por dos términos. El primer término es independiente del tiempo, mientras el factor de potencia representado por  $\cos(\phi)$ , tiene el mayor nivel de influencia en este término. El segundo término oscila senoidalmente en el tiempo al doble de la frecuencia fundamental, con cambios constantes en su signo (+ / -). La potencia instantánea total puede alcanzar valores negativos si en algún momento:

$$\left| \frac{v_{\text{máx}} i_{\text{máx}}}{2} \cos(\phi) \right| < \left| \frac{v_{\text{máx}} i_{\text{máx}}}{2} \cos(2\omega t - \phi) \right| \quad (1.7)$$

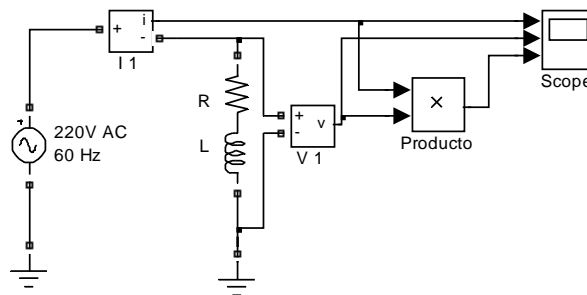
La desigualdad 1.7 muestra que  $\cos(\phi)$ , o sea el factor de potencia, será el principal responsable de una posible potencia negativa en el momento que este factor adquiera valores muy pequeños.



### 1.3.2.1 Modelo de un circuito de corriente alterna monofásica

En la figura 6 se presenta un circuito de corriente alterna monofásica con una fuente de 220 voltios de corriente alterna y frecuencia de 60 hertzios. Hay un bloque que realiza la multiplicación de las señales de corriente y voltaje para calcular la potencia instantánea. Tanto la potencia instantánea como la corriente y el voltaje, son enviados a un bloque para su visualización.

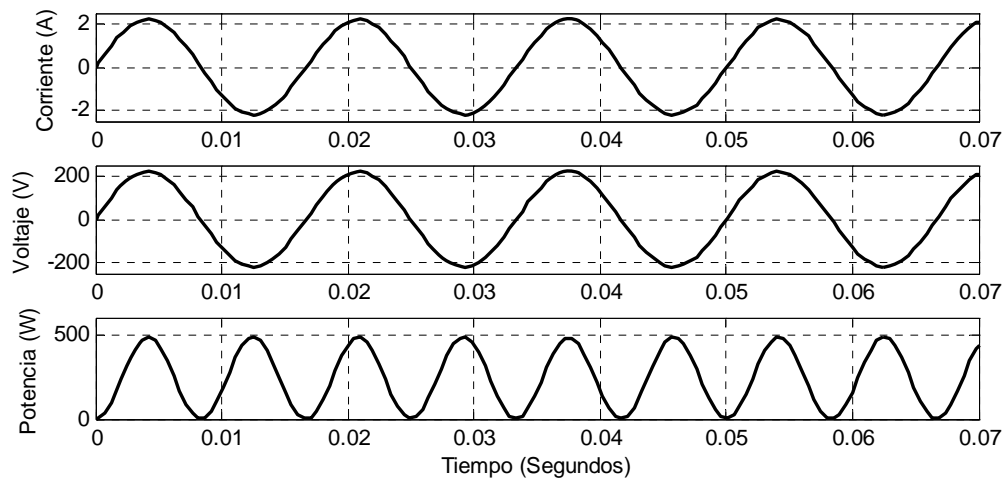
**Figura 6. Modelo de un circuito de corriente alterna monofásica**



Con el circuito de la figura 6 se realizaron dos simulaciones. La gráfica resultante de la primera simulación se muestra en la figura 7. Para este caso se utilizó una carga puramente resistiva con un valor de 100 ohmios, esto significa que la carga tiene un factor de potencia ó  $\cos(\phi)$  igual a 1, que a su vez equivale a un ángulo  $\phi = 0^\circ$ . Por lo tanto la corriente y el voltaje (ecuaciones 1.3 y 1.4) estarán en fase, esto se puede ver en las gráficas de voltaje y corriente de la figura 7.

El comportamiento pulsante de la potencia instantánea puede verse en la figura 7, otra característica muy importante de la gráfica de potencia es que su valor siempre es positivo.

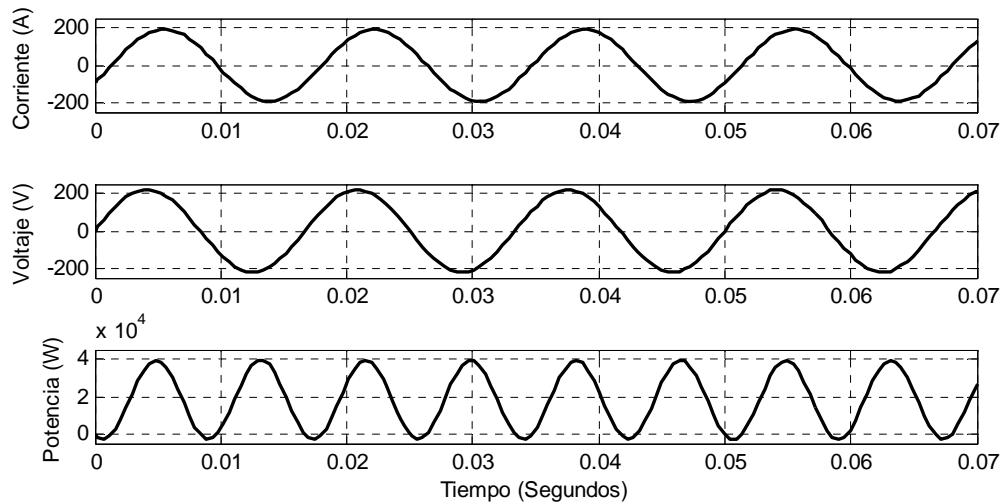
**Figura 7. Gráficas de corriente, voltaje y potencia contra tiempo en un sistema monofásico**



La segunda simulación se realizó utilizando el mismo circuito de la figura 6. Con la diferencia que en este caso la carga tiene una componente resistiva de 1 ohmio y una componente inductiva de 1.5 milihenrios. En consecuencia esta carga tiene un factor de potencia igual a 0.8705. Este factor de potencia representa un ángulo  $\phi = 29.488^\circ$ . Con un ángulo  $\phi$  diferente de cero existirá un desfase entre la corriente y el voltaje (ecuaciones 1.3 y 1.4). El desfase se puede apreciar claramente en las gráficas de corriente y voltaje de la figura 8.

La potencia instantánea mostrada en la figura 8 tiene de nuevo una forma oscilante pero en esta ocasión hay un pequeña porción de la potencia con signo negativo. Esto significa que cierta cantidad de potencia regresa de la carga a la fuente de alimentación, ocasionando que la carga no aproveche el cien por ciento de la potencia.

**Figura 8. Gráficas de corriente, voltaje y potencia contra tiempo con carga resistiva e inductiva**



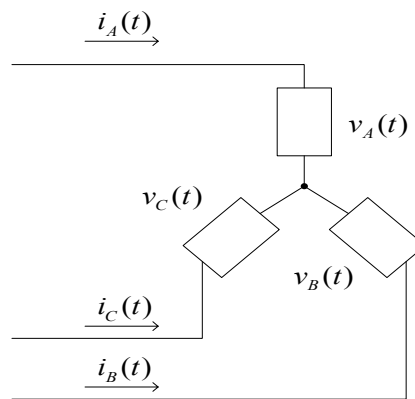
### 1.3.3 Corriente alterna trifásica

En la mayoría de sistemas de generación, transmisión y conversión de potencia eléctrica se utiliza corriente alterna trifásica. Para la producción de corriente trifásica se utilizan tres generadores monofásicos, de los cuales sus voltajes son iguales en magnitud pero están separados entre sí un ángulo de fase de  $120^\circ$ . Esto produce un grupo de tres corrientes separadas  $120^\circ$  entre sí.

Algunas de las razones por las que se utilizan sistemas trifásicos son: Se puede obtener más potencia por libra de metal de una máquina trifásica comparada con una monofásica. La potencia suministrada a una carga trifásica es constante a través del tiempo y no oscilante como la que puede brindar un sistema monofásico. Con energía trifásica se puede alimentar motores de inducción, que no necesitan de devanados especiales, ni de primotores para sus sistemas de arranque.

En el siguiente desarrollo se mostrará porqué la corriente alterna trifásica es capaz de entregar una potencia constante, que no depende del tiempo. Partiendo de la figura 9, se tiene una carga balanceada conectada en estrella, donde se muestran las corrientes de línea y los voltajes de fase.

**Figura 9. Carga trifásica balanceada conectada en Y**



Los voltajes trifásicos pueden ser representados por:

$$\begin{aligned} v_A(t) &= v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \\ v_B(t) &= v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \\ v_C(t) &= v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (1.8)$$

Y las corrientes trifásicas están dadas por:

$$\begin{aligned} i_A(t) &= i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - \phi) \\ i_B(t) &= i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \phi) \\ i_C(t) &= i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - 240^\circ - \phi) \end{aligned} \quad (1.9)$$

Utilizando la ecuación 1.5 para encontrar la potencia instantánea en cada fase:

$$\begin{aligned} p_A(t) &= v_{\text{máx}} i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\omega t - \phi) \\ p_B(t) &= v_{\text{máx}} i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \text{sen}(\omega t - 120^\circ - \phi) \\ p_C(t) &= v_{\text{máx}} i_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t - 240^\circ) \text{sen}(\omega t - 240^\circ - \phi) \end{aligned} \quad +$$

Aplicando la identidad trigonométrica:

$$\operatorname{sen} A \operatorname{sen} B = \frac{1}{2} (\cos(A - B) - \cos(A + B))$$

$$p_A(t) = \frac{v_{\max} i_{\max}}{2} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - \phi))$$

$$p_B(t) = \frac{v_{\max} i_{\max}}{2} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - 240^\circ - \phi))$$

$$p_C(t) = \frac{v_{\max} i_{\max}}{2} (\cos(\phi) - \cos(2\omega t - 480^\circ - \phi))$$

Para obtener la potencia total se deben sumar las tres potencias instantáneas obtenidas en cada fase.

$$P_{TOTAL} = p_A(t) + p_B(t) + p_C(t)$$

Con el objetivo de simplificar los procedimientos se hará la siguiente sustitución:

$$k = 2\omega t - \phi$$

$$P_{TOTAL}(t) = \frac{v_{\max} i_{\max}}{2} (3 \cos(\phi) - \cos(k) - \cos(k - 240^\circ) - \cos(k - 480^\circ)) \quad (1.10)$$

Ahora se puede utilizar una nueva identidad trigonométrica:

$$\cos(A \pm B) = \cos A \cos B \mp \operatorname{sen} A \operatorname{sen} B$$

$$\cos(k - 240^\circ) = \cos k \cos 240^\circ + \operatorname{sen} k \operatorname{sen} 240^\circ$$

$$\cos(k - 240^\circ) = \frac{-\cos k}{2} - \frac{\sqrt{3} \operatorname{sen} k}{2}$$

$$\cos(k - 480^\circ) = \cos k \cos 480^\circ + \operatorname{sen} k \operatorname{sen} 480^\circ$$

$$\cos(k - 480^\circ) = \frac{-\cos k}{2} + \frac{\sqrt{3} \operatorname{sen} k}{2}$$

Después de realizar las sustituciones de las identidades, anteriormente desarrolladas, en la ecuación 1.10 se encuentra el valor de la potencia total:

$$p_{TOTAL}(t) = \frac{3}{2} v_{\max} i_{\max} \cos(\phi) \quad (1.11)$$

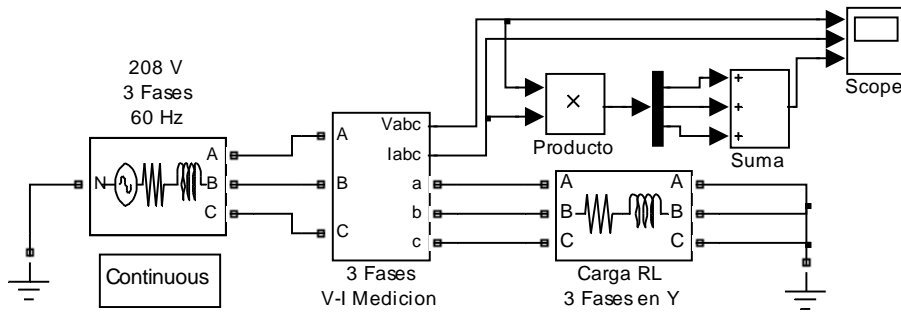
La ecuación 1.11 muestra cómo la potencia entregada a la carga es independiente del tiempo, pero afectada directamente por el factor de potencia.

### 1.3.3.1 Modelo de un circuito de corriente alterna trifásica

Utilizando un circuito simple de corriente trifásica, como el mostrado en la figura 10, se puede llevar a cabo la simulación. Este circuito consta de una fuente de voltaje de corriente alterna trifásica conectada en Y, que alimenta una carga balanceada con  $Z_{fase} = 12 + j9\Omega$  también conectada en Y. La fuente tiene una impedancia interna de  $Z_G = 0.06 + j0.12\Omega$ . El bloque de medición genera las señales de corriente y voltaje de las tres fases multiplexadas en una sola señal. El bloque identificado como producto realiza la multiplicación de las señales de corriente y voltaje para calcular la potencia instantánea.

Para sumar la potencia de cada fase se utiliza un bloque de suma, pero antes de este, es necesario un demultiplexor para separar la potencia de cada fase. Las señales de voltaje y corriente trifásica, junto con la de potencia instantánea son enviadas al bloque de visualización para obtener las gráficas respectivas.

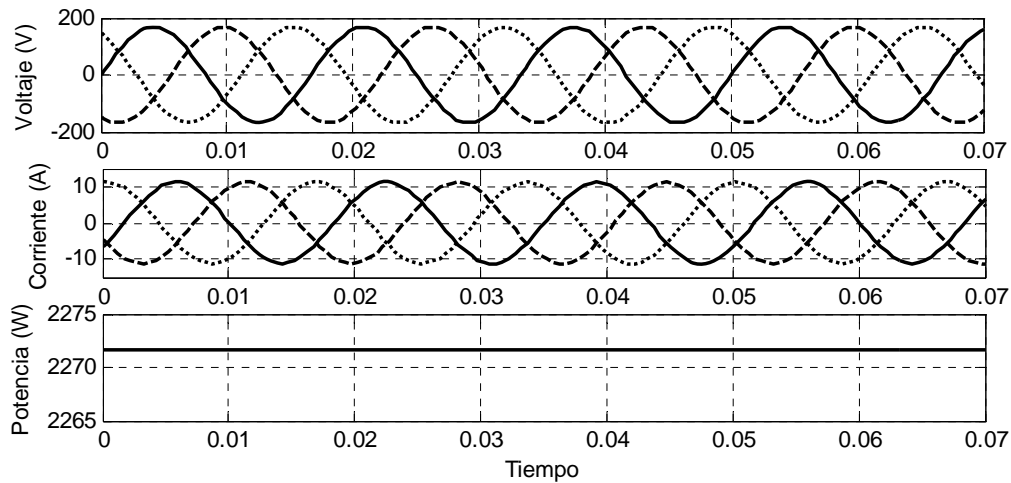
**Figura 10. Modelo trifásico con carga balanceada**



La gráfica resultante se muestra en la figura 11. Aquí se representan las formas de onda finales del voltaje, corriente y potencia instantánea en la carga. Debido a que la carga tiene un factor de potencia de 0.8 y la presencia de la impedancia interna del generador que aporta una componente resistiva y una inductiva, la corriente está atrasada respecto al voltaje.

La principal característica de la energía trifásica se hace evidente en su respectiva gráfica. Su valor es constante a través del tiempo y no presenta ninguna oscilación. Esta es la mayor ventaja que un sistema de corriente alterna trifásica presenta sobre un sistema de corriente alterna monofásico. Debido a esto la energía trifásica es la principal forma que se utiliza en la actualidad para sistemas de generación, transporte y distribución y el consumo final.

**Figura 11. Gráficas de voltaje, corriente y potencia trifásica contra tiempo**



#### 1.4 Diodos de potencia

Los diodos son los dispositivos más simples y económicos que existen. Los de mayor difusión, son los fabricados con silicio, aunque existen diodos de germanio, estos no tienen el mismo comportamiento que los de silicio ante altas temperaturas, pero son utilizados en otras aplicaciones. Su construcción consta de una sola unión PN. Esto se refiere a que una parte es de material semiconductor tipo P y la otra es de material semiconductor tipo N

El material tipo P es silicio puro dopado en cierta proporción con algún elemento del grupo III, por ejemplo boro, galio, indio. Al formarse los enlaces quedan espacios vacíos, a estos espacios les correspondería llevar un electrón por cada espacio. Los electrones faltantes representan un desbalance de cargas dando lugar a un semiconductor positivo.



El material tipo N también es silicio puro, pero dopado con algún elemento del grupo V, como el fósforo, arsénico o antimonio. Después que ambos elementos se enlazan hay un excedente de electrones. Debido a este excedente de electrones, se generan bloques semiconductores negativos.

Para identificar la parte positiva y negativa en un diodo se debe observar su símbolo, este se muestra en la figura 12. El lado que muestra la cola de la flecha es el ánodo o parte positiva, mientras que la punta de la flecha es el cátodo o parte negativa.

**Figura 12. Símbolo de un diodo**



#### **1.4.1 Diodo en polarización directa**

Al polarizar directamente un diodo, la corriente fluye a través de él siguiendo la dirección que indica la flecha de su símbolo (figura 12). Esto se logra cuando el nivel de voltaje en el ánodo es más positivo que en el cátodo. Generalmente hay un valor mínimo que debe superarse para lograr el estado de conducción. Para el silicio es de aproximadamente 0.7 voltios mientras para el germanio el valor es muy cercano a los 0.5 voltios.

Las principales características en un diodo de potencia mientras está polarizado directamente son: Una buena capacidad para soportar la circulación de grandes cantidades de corriente a través de él. Una mínima caída de tensión a través de él, para evitar que el diodo absorba cantidades considerables de potencia durante su funcionamiento.

Algunos valores, que son proporcionados por los fabricantes, deben ser tomados en cuenta cuando un diodo es polarizado directamente.

- Corriente media nominal: Es el valor medio de la máxima corriente de pulsos senoidales que es capaz de soportar el diodo en forma continuada, mientras se mantiene la temperatura del encapsulado a una determinada temperatura, generalmente son 100°C.
- Corriente de pico repetitivo: Corriente máxima que puede ser soportada cada 20 milisegundos con duración de pico de 1 milisegundo.
- Corriente de pico único: Corriente máxima que puede ser soportada por una sola vez cada 10 o más minutos siempre que la duración del pico sea inferior a 10 milisegundos.

#### **1.4.2 Diodo en polarización inversa**

Al polarizar inversamente un diodo, con un nivel de voltaje más positivo en el cátodo que en el ánodo, idealmente la corriente no puede fluir a través de él. Pero en la práctica existe una corriente de fuga muy pequeña. Si esta corriente se compara con la corriente en polarización directa, que puede ser de algunas decenas o centenas de amperios, la corriente de fuga en miliamperios resulta insignificante. Al estado de polarización inversa también se le conoce como estado de bloqueo, porque representa una barrera para la corriente.

Las principales características en un diodo de potencia mientras está polarizado inversamente son: Una buena capacidad para soportar la aplicación de niveles altos de tensión en sus terminales marcadas como ánodo y cátodo. Una mínima circulación de corriente de fugas a través de él, para que el diodo no se vea sometido a soportar altas cantidades de potencia.

Algunos valores, que son proporcionados por los fabricantes, deben ser tomados en cuenta cuando un diodo es polarizado inversamente.

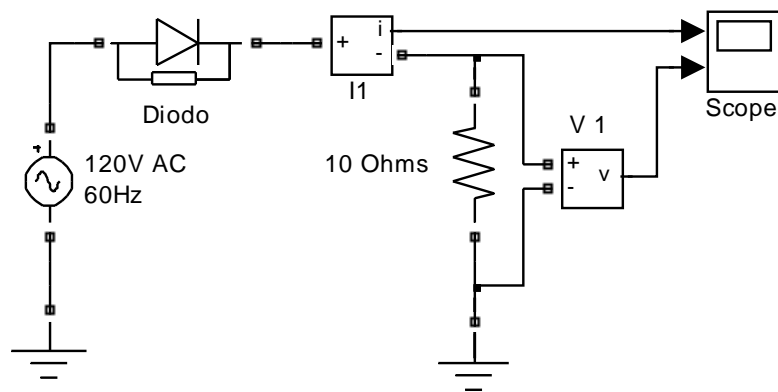
- Tensión inversa de trabajo: Máxima tensión inversa que puede soportar de forma continua sin peligro de avalancha.
- Tensión inversa de pico repetitivo: Máxima tensión inversa que puede soportar por tiempo indefinido si la duración del pico es inferior a 1 milisegundo y su frecuencia de repetición inferior a 100 Hz.
- Tensión inversa de pico único: Máxima tensión inversa que puede soportar por una sola vez cada 10 ó mas minutos si la duración del pico es inferior a 10 milisegundos.
- Tensión de ruptura: Valor de la tensión capaz de provocar la avalancha aunque solo se aplique una vez por un tiempo superior a 10 milisegundos.

### **1.4.3 Modelo de un diodo en un circuito de corriente alterna**

En la figura 13 se muestra un circuito con una fuente de voltaje de corriente alterna de 120 voltios y 60 hertzios, que está alimentando una carga resistiva de 10 ohmios. Pero la corriente suministrada está siendo modificada por la conexión en serie, con la carga, de un diodo rectificador.

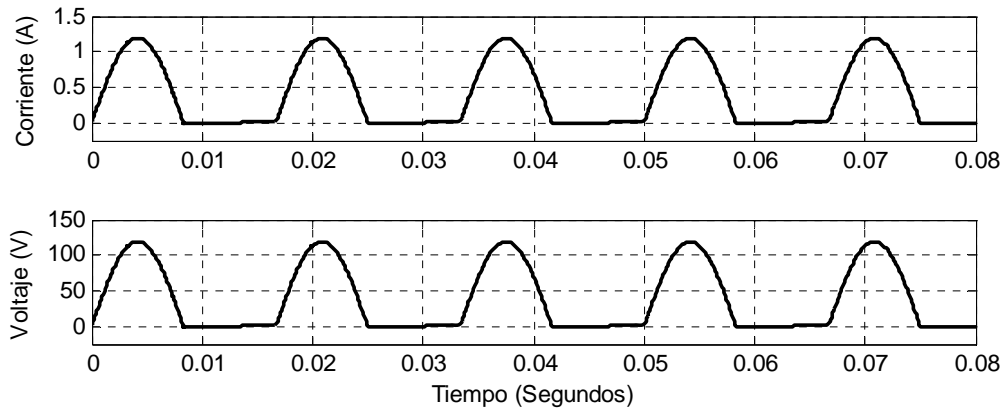
El circuito también cuenta con un amperímetro y un voltímetro, que trasladan las señales de corriente y voltaje de la carga, a un bloque de visualización, donde los resultados serán desplegados para su posterior análisis.

**Figura 13. Modelo de corriente alterna con un diodo**



Los resultados de la simulación, con una duración de 0.8 segundos, se pueden observar en la figura 14. Ahora la corriente ya no tiene una forma senoidal, como la mostrada en la figura 7, donde el circuito era casi exactamente el mismo, a excepción de que éste no incluía un diodo. A todas luces es notable que la corriente muestra una discontinuidad en la mitad negativa de su período. El diodo permite el paso de la corriente sólo cuando su ánodo es más positivo que su cátodo.

**Figura 14. Gráficas de voltaje y corriente contra tiempo del modelo de la figura 13**



Debido a que la fuente de alimentación es de corriente alterna, el voltaje aplicado al ánodo del diodo tiene la forma:

$$v(t) = v_{\text{máx}} \sin(\omega t)$$

Para encontrar el período en que el diodo conduce basta con resolver la siguiente desigualdad:

$$v_{\text{máx}} \sin(\omega t) > 0 \tag{1.12}$$

La solución de la desigualdad 1.12 es:

$$2n\pi < \omega t < (2n+1)\pi$$

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Tomando como base la desigualdad 1.12 y su rango de solución, la corriente del circuito de la figura 13, puede ser descrita por la siguiente función:

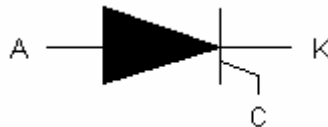
$$i(t) = i_{\text{máx}} \sin(\omega t - \phi); \quad 2n\pi < \omega t - \phi < (2n+1)\pi \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

$$i(t) = 0; \quad \text{para cualquier otro valor de } \omega t - \phi$$
(1.13)

## 1.5 Tiristor

Los tiristores son dispositivos semiconductores de cuatro capas (pnpn). Tiene tres terminales, el ánodo, cátodo y compuerta. La figura 15 muestra el símbolo de un tiristor, el ánodo está identificado con la terminal A, el cátodo con la terminal K y la compuerta con la terminal C. Como en los diodos, la corriente solo puede seguir una dirección y está indicada por la flecha de su símbolo. Su forma de operación es como la de un interruptor con encendido controlado y apagado automático. Algo muy importante en el uso de tiristores es que tienen pérdidas muy bajas cuando están conduciendo corriente, y por esto, son capaces de manejar mayores potencias.

**Figura 15. Símbolo de un tiristor**



### **1.5.1 Tiristor en polarización directa**

Un tiristor es muy parecido a un diodo, por esta razón, para polarizarlo directamente el ánodo debe ser más positivo que el cátodo, este estado se conoce como bloqueo directo. Esto significa que la polarización directa no es suficiente para que empiece a conducir la corriente a través de él. El tiristor necesita un pulso positivo en la compuerta C para pasar a un estado encendido y permitir que la corriente circule.

La duración del pulso en la compuerta debe ser lo suficiente para alcanzar cierto nivel de corriente y mantener su estado de conducción. El valor de la corriente que permite la conducción a través del tiristor se llama corriente de retención, cuando un tiristor alcanza este valor, no necesita más del pulso en la compuerta y mantiene su estado de conducción, aún cuando la señal de la compuerta haya sido suspendida.

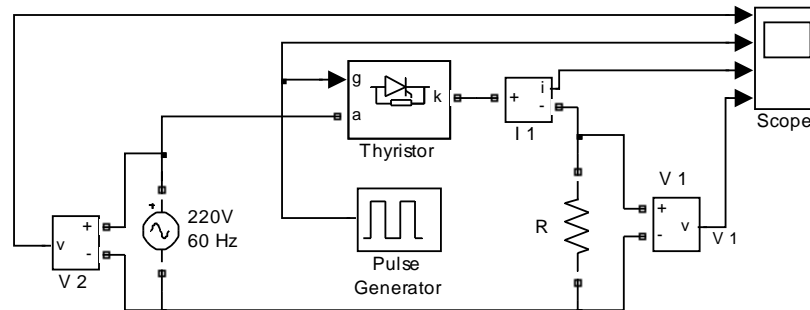
### **1.5.2 Tiristor en polarización inversa**

Al polarizar inversamente un tiristor su ánodo es más negativo que su cátodo, por lo tanto, no permite la conducción de corriente, aún cuando exista el pulso de excitación en su compuerta. Cuando un tiristor alcanza este estado se dice que permanece en bloqueo inverso. Algunas veces se utiliza este método para interrumpir el paso de la corriente en el tiristor y abrir el circuito, o simplemente se reduce la corriente hasta un valor menor de la corriente de retención para bloquear el tiristor.

Si un tiristor alcanza el estado de bloqueo por polarización inversa, pero seguidamente se polariza directamente, debe recibir un pulso en la compuerta para que la corriente fluya de nuevo a través de él, si la compuerta no es excitada el tiristor no conducirá aunque esté en polarización directa

### 1.5.3 Modelo de un tiristor en un circuito de corriente alterna

Figura 16. Modelo de un circuito de corriente alterna con tiristor

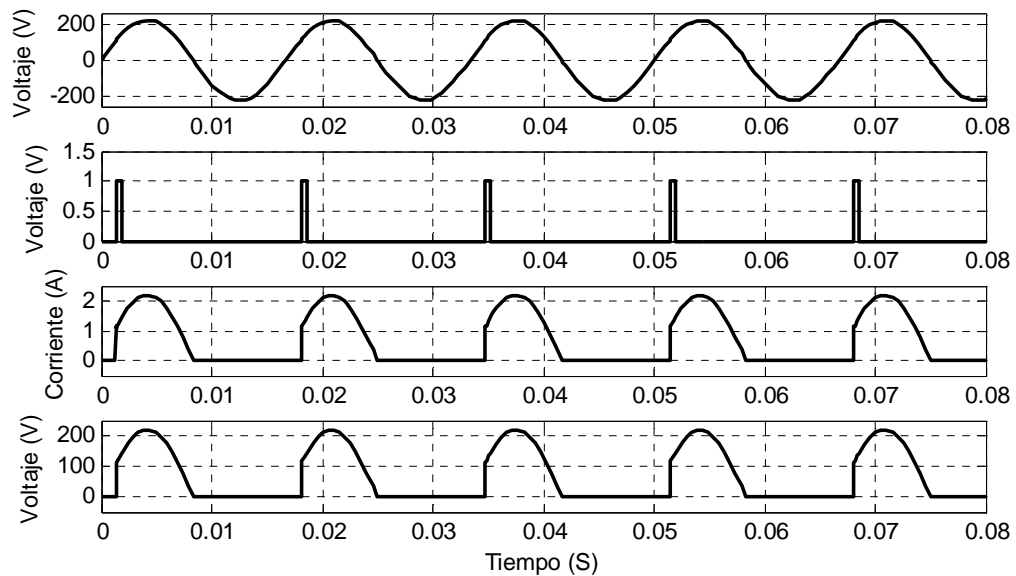


La figura 16 es el diagrama del modelo de un rectificador de media onda, utilizando un tiristor como elemento rectificador. La carga es una resistencia de 100 ohmios, que es alimentada por una fuente de corriente alterna de 220 voltios y 60 hertzios. Dentro del modelo hay dos voltímetros y un amperímetro para mostrar el voltaje de la fuente, el voltaje en la carga y la corriente en la carga respectivamente. El control del tiristor se lleva a cabo por medio de un generador de pulsos. La frecuencia de este generador es también de 60 hertzios, y el desfase es de  $1/720$  segundos. Este desfase representa un ángulo de retraso para el disparo del tiristor de  $30^\circ$ .

En la figura 17 aparecen las gráficas de voltaje en la fuente, forma de onda del generador de pulsos, corriente y voltaje en la carga. Lo más importante de estas gráficas es que el tiristor no conduce durante los ciclos de corriente negativa, y empieza a conducir cuando recibe el pulso en la compuerta, a pesar de estar polarizado directamente.



**Figura 17. Gráficas de voltaje en la fuente, generador de pulsos, corriente y voltaje en la carga**



## 1.6 Transistor bipolar de compuerta aislada IGBT

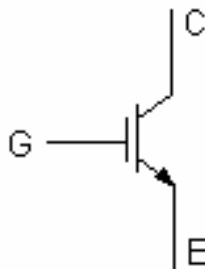
Los transistores de compuerta aislada o IGBT por sus siglas en inglés, combinan las características de alta impedancia en la compuerta de los transistores MOSFET, con la capacidad de manejo de alta corriente de los transistores BJT o bipolares. Esto se logra combinando una compuerta aislada como las de los transistores MOSFET, que funciona como la base de un transistor bipolar, para realizar las funciones de un interruptor de potencia en un solo dispositivo. Algunas de las ventajas en este tipo de transistores, es el hecho de utilizar un sistema de control bastante simple y las bajas pérdidas por conmutación y conducción.

Debido a la compuerta aislada que se usa para el control de este transistor, las fugas de corriente presentadas por los transistores de compuerta aislada son muy pequeñas, esto significa un manejo más eficiente de la potencia. Esta es una de las principales razones por las que estos dispositivos han alcanzado un enorme desarrollo en la actualidad, llegando a sustituir tecnologías tradicionales, tales como transistores bipolares en configuración Darlington y tiristores.

La primera generación de estos dispositivos presentaba algunas dificultades, como una baja velocidad de conmutación y algunas fallas en el funcionamiento. Pero en el presente estos transistores se utilizan en aplicaciones con niveles de voltaje mayores a los 300 voltios y frecuencias de conmutación de hasta 100 kHz. La figura 18 muestra el símbolo de un transistor de compuerta aislada IGBT.

Este dispositivo tiene tres terminales el colector, emisor y compuerta. Las primeras dos actúan como el colector y emisor de un transistor bipolar, permitiendo el paso de la corriente controlada a través de estas. Por otra parte, la compuerta funciona como la compuerta de un transistor MOSFET, controlando la corriente que circula a través del colector y emisor por medio de la diferencia de potencial aplicada entre la compuerta y el emisor.

**Figura 18. Símbolo de un transistor de compuerta aislada IGBT**



La principal aplicación de estos transistores es su uso como interruptores controlados por medio de su compuerta. Por esta razón, al estudiar este tipo de transistores, se hace con un enfoque en dos formas de operación. El transistor puede funcionar en corte o saturación entre el colector y emisor, dependiendo de la señal aplicada en la compuerta.

### **1.6.1 Transistor IGBT en saturación**

Cuando un transistor IGBT está en saturación la corriente puede fluir libremente a través de él de colector a emisor siguiendo la dirección que indica la flecha de su símbolo. Aunque este dispositivo es muy eficiente, presenta una caída de tensión entre colector y emisor, produciendo un consumo de energía.

Normalmente el valor de tensión que se presenta entre colector y emisor se encuentra en un rango de 1.5 a 2.2 voltios, mientras que un transistor MOSFET puede presentar caídas de tensión de hasta 5 voltios, esto hace que los transistores IGBT tengan un mejor desempeño. Si se toma en cuenta que estos transistores trabajan con niveles de voltaje que van desde los cien voltios hasta los miles de voltios, una reducción de 1.5 a 2.2 voltios resulta despreciable en los circuitos prácticos.

Para que un transistor IGBT alcance el punto de saturación se requieren dos condiciones. Primero, el voltaje entre el colector y emisor debe ser mayor a la caída de tensión propia de cada transistor. Segundo, en la compuerta debe aplicarse un nivel de tensión mayor al nivel de tensión existente en el emisor, esta diferencia de potencial debe ser proporcional a la corriente deseada entre el colector y emisor del transistor.

### **1.6.2 Transistor IGBT en corte**

Después que un transistor IGBT se ha llevado al punto de saturación y la corriente fluye entre el colector y emisor para alimentar la carga, muchas veces es necesario interrumpir esta corriente con el objetivo de controlar la cantidad total de corriente aplicada a la carga o permitir la liberación de la energía almacenada en la carga.

Cuando la compuerta se coloca a un nivel de potencial menor que el aplicado al emisor, la diferencia de potencial entre el colector y emisor comienza a aumentar linealmente, pero por un breve instante la corriente mantiene el mismo valor que circulaba durante la etapa de saturación, para luego comenzar a disminuir hasta alcanzar un valor igual a cero.

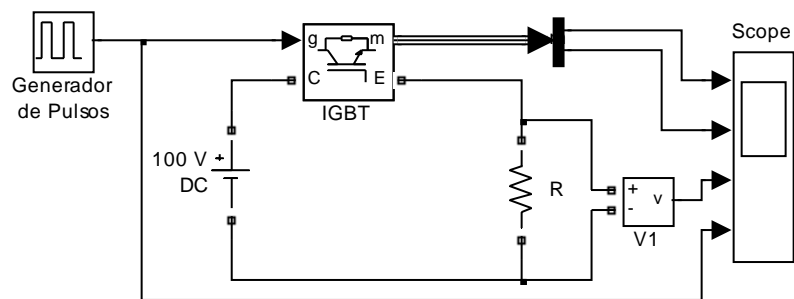
Este efecto representa un leve incremento en las pérdidas de energía por interrupción a través de un transistor IGBT. Estas pérdidas son proporcionales a la frecuencia de trabajo en el transistor IGBT, pues a mayores frecuencias, mayor será el número de veces que se repetirá el efecto antes descrito, Al igual que en un transistor BJT, el tiempo que se mantiene la corriente después que la tensión entre colector y emisor ha comenzado a aumentar tiende a incrementarse si aumenta la temperatura de funcionamiento del dispositivo en cuestión.

Después que se ha logrado interrumpir la corriente a través del colector y emisor, se presentan pequeñas corrientes, también conocidas como corrientes de fuga, originadas principalmente por los altos diferenciales de potencial existentes entre el colector y el emisor del transistor en el momento de interrumpir la corriente.

### 1.6.3 Modelo de un transistor bipolar de compuerta aislada IGBT

En la figura 19 aparece un circuito sencillo que ilustra la forma de operación en un transistor IGBT. La fuente de corriente directa alimenta con 100 voltios una carga resistiva de 100 ohmios. El flujo de corriente aplicado a la carga es regulado por un transistor de compuerta aislada, la corriente entra por el colector y sale por el emisor. El generador de pulsos controla la operación del transistor como un interruptor generando pulsos a una frecuencia de 1000 hertzios y un ciclo de trabajo del 50%.

**Figura 19. Modelo de un transistor IGBT**

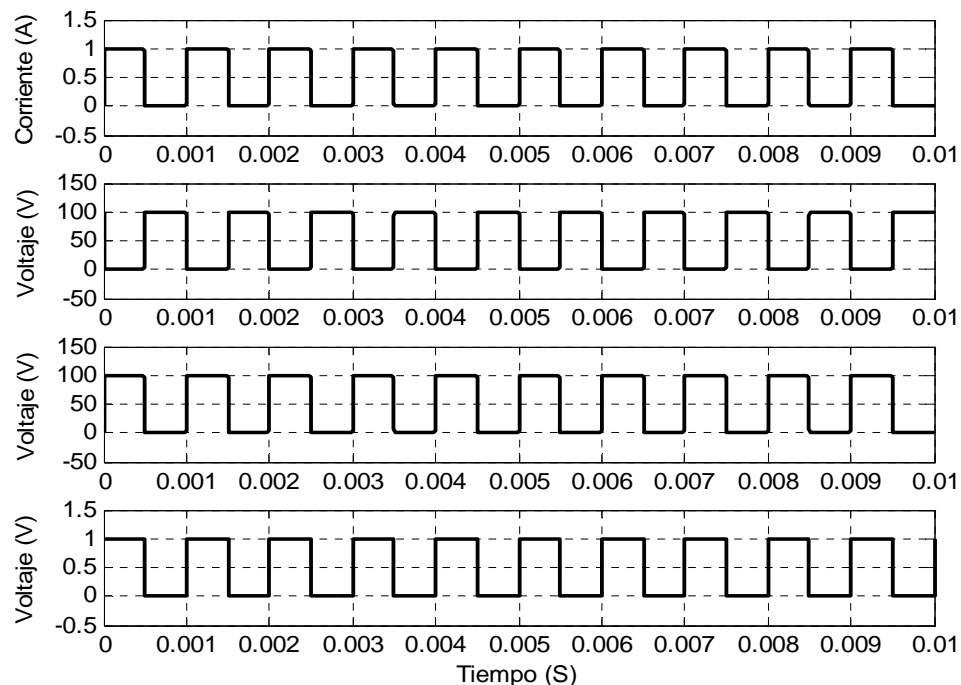


En el modelo de la figura 19 se utiliza un bloque que simula el funcionamiento de un transistor IGBT, posee las tres terminales comunes de un transistor, colector, emisor y compuerta, además, por medio de la terminal marcada como m se obtienen dos señales para medición y visualización. Estas señales son corriente y voltaje entre el colector y emisor. Las señales que provee el bloque IGBT junto a la señal de un voltímetro conectado a la carga son enviadas al bloque de visualización, para obtener una respuesta gráfica de su comportamiento.

Después de simular el modelo de la figura 19 por diez milisegundos y utilizando el generador de pulsos a una frecuencia de 1000 hertzios se obtienen diez ciclos completos, tal y como se muestra en las gráficas de la figura 20. Las primeras dos curvas corresponden a la corriente y voltaje entre el colector y emisor del transistor respectivamente. La tercera curva es el voltaje aplicado a la carga y la cuarta curva es la señal aplicada por el generador de pulsos a la compuerta del transistor IGBT.

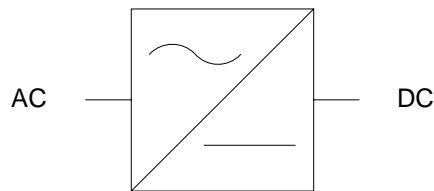
Las principales características de estas curvas son que la corriente está en fase con el voltaje debido al comportamiento netamente resistivo de la carga. El voltaje es la función inversa de la corriente, tal y como sucede en un interruptor. El voltaje aplicado a la carga sigue el mismo patrón de señal que se inyecta en la compuerta del transistor.

**Figura 20. Corriente y voltaje entre colector y emisor, voltaje en la carga, voltaje en la compuerta**



## 2 CONVERSORES DE CORRIENTE ALTERNA A CORRIENTE DIRECTA

**Figura 21. Símbolo de un rectificador**



Los conversores de corriente alterna a corriente directa también son conocidos como rectificadores. La figura 21 muestra un símbolo muy utilizado para representar a los rectificadores en esquemas eléctricos. El propósito de un rectificador es convertir una señal de corriente alterna a una señal unidireccional o directa.

Pueden ser clasificados en dos grupos, rectificadores controlados y rectificadores no controlados. Los primeros son los que utilizan solamente diodos de propósito general, mientras que los segundos utilizan tiristores o rectificadores controlados de silicio (SCR's) y necesitan de un sistema de control para un funcionamiento adecuado. Otra característica que puede diferenciar a los rectificadores es el número de fases que sea capaz de operar. Aunque el número de fases puede variar según las necesidades, lo más común es encontrar dos tipos: Monofásicos y trifásicos.

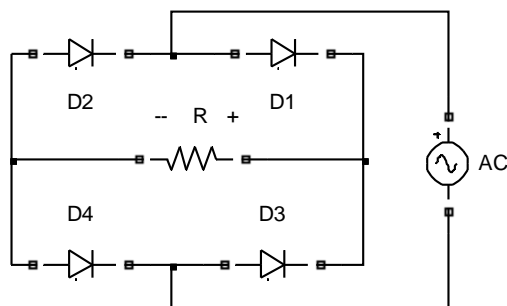
## 2.1 Rectificadores no controlados

Estos rectificadores usan exclusivamente diodos como elementos conversores. Los diodos son dispositivos de dos terminales que no poseen ninguna forma externa para el control de su funcionamiento por esta razón, este tipo de rectificadores no necesitan circuito de control, haciéndolos simples y confiables. En su entrada pueden recibir corriente alterna monofásica o corriente alterna trifásica. Mientras que en su salida se obtendrá una corriente directa no controlada. El valor de esta corriente depende del voltaje de entrada, la corriente demandada por la carga y la topología del conversor.

### 2.1.1 Rectificador no controlado monofásico

Los rectificadores de onda completa son los que tienen mayores aplicaciones en la actualidad. En la figura 22 se muestra un rectificador tipo puente. Durante el primer medio ciclo, los diodos D1 y D4 se encuentran conduciendo y los diodos D2 y D3 están bloqueados. Cuando la corriente cambia de dirección en el segundo medio ciclo, la situación se invierte para que los diodos D3 y D4 pasen al estado de conducción y los diodos D1 y D2 pase a bloquearse. Este comportamiento da como resultado que se obtenga el flujo de la corriente en una sola dirección a través de la carga.

**Figura 22. Rectificador conectado en puente**



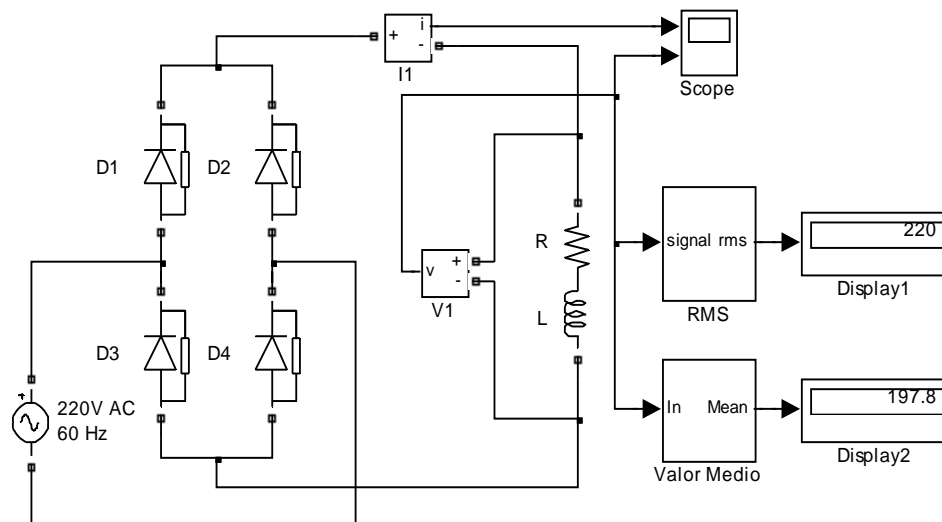


### 2.1.1.1 Modelo de un rectificador no controlado monofásico

El circuito de la figura 23 posee cuatro diodos conectados en puente, además, se han incluido dos bloques de cálculo. Uno es el bloque RMS, el objetivo de este bloque es calcular el valor eficaz o RMS de una señal instantánea de corriente o voltaje aplicada a su entrada. El otro bloque es el Mean, este bloque calcula el valor promedio de la señal instantánea de voltaje o corriente que se coloca en la entrada del bloque.

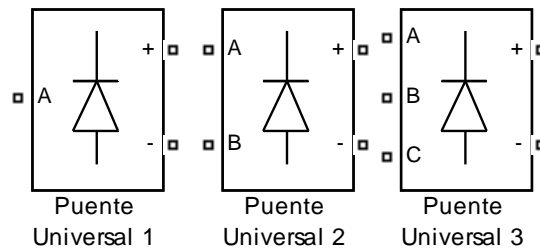
Ambos bloques son de mucha utilidad para la simulación de este tipo de circuitos, pues los diodos distorsionan las señales convirtiéndolas en funciones no lineales, especialmente las de corriente, y como consecuencia se hace muy complicada la solución de los sistemas de ecuaciones, por medios analíticos.

**Figura 23. Modelo de un rectificador monofásico con diodos conectados en configuración puente**



Dentro de la librería de *SimPowerSystems* existe un bloque identificado como puente universal. Este bloque puede funcionar como un puente de dos, cuatro o seis diodos según se especifique dentro de sus propiedades. La figura 24 muestra los tres diferentes tipos de puentes de diodos que se pueden implementar dentro de un modelo. Cada uno tiene diferente número de entradas, indicadas por las letras A, B y C; pero todos tienen solamente una salida positiva y una negativa, como corresponde a una señal de corriente directa. Un bloque con dos entradas se utiliza para rectificar una señal monofásica. El bloque con tres entradas se utiliza para la rectificación de una señal trifásica.

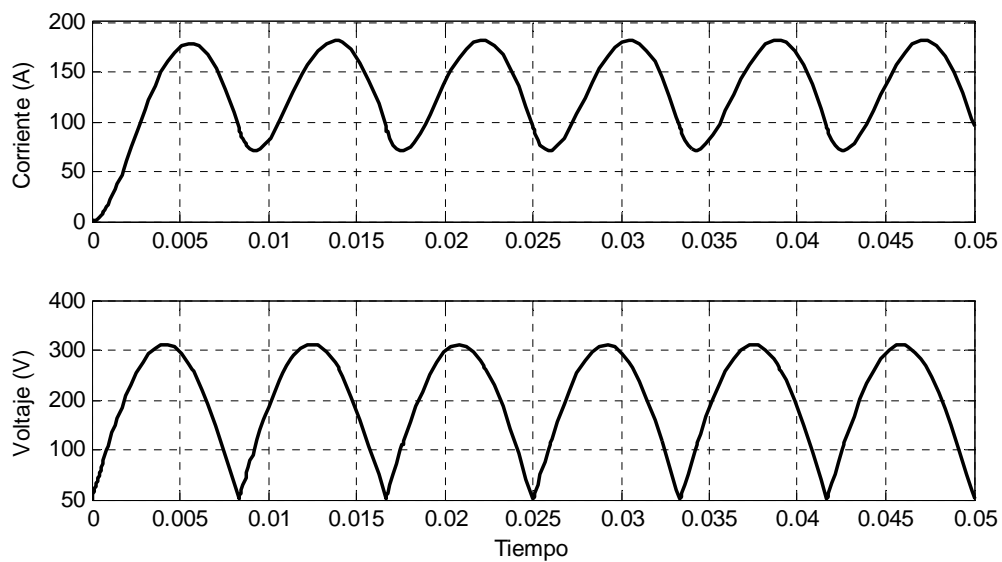
**Figura 24. Diferentes tipos de puentes**



Después de simular el circuito de la figura 23 por 0.05 segundos se obtuvieron las gráficas de corriente y voltaje en una carga compuesta por una resistencia de 1.5 ohmios y una inductancia de 2.5 milihenrios. Los resultados gráficos se pueden apreciar en la figura 25, el voltaje tiene una forma de onda mucho mejor definida que la onda de corriente, esto se debe al efecto de conmutación en los diodos.

Los resultados del cálculo efectuado por los bloques RMS y Mean son mostrados dentro del mismo circuito, a través de los bloques Display 1 y Display 2. En la figura 23 se visualiza un valor eficaz de voltaje en la carga de 220 voltios y un valor promedio de 197.8 voltios.

**Figura 25. Curvas de corriente y voltaje en la carga de la figura 23**



El voltaje en la carga tiene la forma:

$$v(t) = v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \quad 0 \leq \omega t \leq \pi \quad \text{y} \quad T = \pi \quad (2.1)$$

Luego el valor promedio será:

$$V_m = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) d(\omega t) \quad (2.2)$$

$$V_m = \frac{2v_{\text{máx}}}{\pi} \quad (2.3)$$

Al evaluar la ecuación 2.3 con un voltaje máximo de 311.13 voltios se tiene un voltaje promedio de 198.07, al compararlo con el valor mostrado en la figura 23 de 197.8 voltios, el error es bastante pequeño, alrededor de 0.13%. Este pequeño margen de error se debe al hecho de realizar cálculos sobre la base de diodos ideales.

En el modelo del diodo utilizado para la simulación, las características pueden acercarse bastante a un diodo ideal, pero se encontrarán algunas limitantes, por ejemplo, la resistencia interna del diodo no puede ser cero, por requerimientos del programa, aunque si un número muy pequeño, en el orden de los miliohmios.

Al calcular el valor eficaz de la ecuación 2.1 se tiene:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} (v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t))^2 d(\omega t)} \quad (2.4)$$

$$V_{rms} = \frac{V_{\text{máx}}}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

Evaluando la ecuación 2.5 con un voltaje máximo de 311.13 voltios, el voltaje eficaz es 220 voltios, este es el mismo voltaje mostrado por el bloque RMS de la figura 23, por lo tanto no existe error para el valor mostrado por el bloque RMS y el valor calculado teóricamente.

Existen otros dos parámetros muy útiles para determinar el rendimiento de un rectificador. El primero de ellos es el factor de forma, que es una medida de la relación entre el valor eficaz y el valor promedio del voltaje en la salida del rectificador:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_m} \quad (2.6)$$

Donde  $V_{rms}$  es el voltaje eficaz y  $V_m$  es el voltaje promedio.

El otro parámetro es el factor de rizo, este es una medida del contenido alterno residual, en la onda de voltaje de la salida del rectificador:

$$RF = \sqrt{(FF)^2 - 1} \quad (2.7)$$

Donde  $FF$  es el factor de forma.

Para un rectificador monofásico como el mostrado en la figura 23 el factor de forma, según la ecuación 2.6, tiene un valor de 1.1122, donde el factor de forma de un rectificador ideal es 1. Al aplicar la ecuación 2.7 se obtiene un factor de rizo de 0.4869, pero en un rectificador ideal este factor debe ser 0.

## **2.1.2 Rectificador no controlado trifásico**

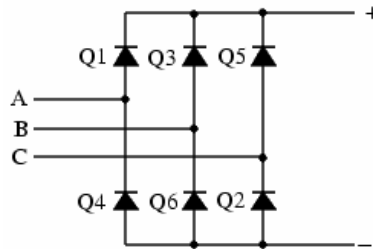
De la ecuación 2.3 se hace evidente que el voltaje promedio que un rectificador monofásico puede proporcionar a la carga es de 0.6366 veces el voltaje máximo. Debido a esta limitante, este tipo de rectificadores son utilizados en aplicaciones que requieren hasta un máximo de 15 kW. Para cargas que exijan mayores potencias son preferibles los rectificadores trifásicos.

### **2.1.2.1 Modelo de un rectificador no controlado trifásico**

Para el modelo del rectificador trifásico se usará un bloque puente universal de diodos con seis diodos para producir una corriente directa en su salida. El uso de este bloque hace que el circuito se vea más simple y pequeño, pero esto no significa que su desempeño sea menor o limitado.

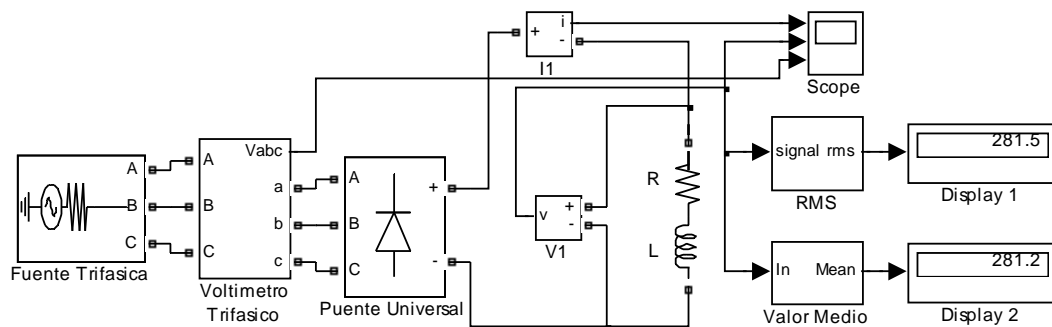
El bloque hace la misma función que harían seis diodos individuales conectados en puente. En la figura 26 se muestra un esquema equivalente a un bloque puente universal.

**Figura 26. Esquema equivalente del puente universal**



La corriente y el voltaje instantáneos, en una carga con resistencia de 1.5 ohmios y una inductancia de 2.5 milihenrios, son medidos por un amperímetro y un voltímetro respectivamente. El modelo cuenta con un voltímetro trifásico, para medir el voltaje de la fuente. También se incluyen los bloques RMS y Mean para calcular y mostrar el valor eficaz y el valor promedio de la señal de voltaje en la carga. El modelo completo y los bloques de visualización se pueden observar en la figura 27.

**Figura 27. Modelo de un rectificador trifásico con bloque puente universal**



En la figura 28 se presentan las curvas resultantes de corriente y voltaje en la carga del modelo mostrado en la figura 27, luego de 0.03 segundos de simulación. La fuente que alimenta esta carga es una fuente trifásica con un voltaje de línea a línea de 208 voltios, 60 hertzios, conectada en estrella. La principal característica de las curvas de voltaje y corriente en la carga, es que a pesar de sus valores oscilantes el cambio entre los valores máximos y mínimos no es tan grande como en un sistema monofásico.

La causa de este fenómeno es que el ángulo de conducción en los diodos se reduce a  $\pi/3$ , pero en un sistema trifásico, los valores máximos y mínimos de voltaje, se producen en intervalos de tiempo también más pequeños. Esto logra que el nivel de voltaje en la salida oscile más rápido pero sus valores mínimos no alcancen magnitudes muy pequeñas, mucho menos cero, tal como sucede en un sistema monofásico.

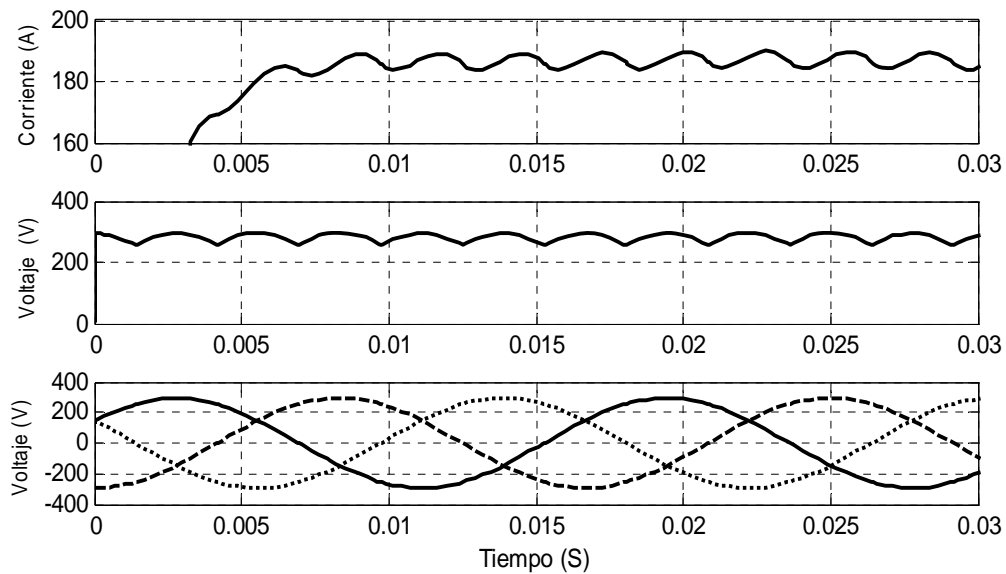
Para visualizar el fenómeno anteriormente descrito, simplemente se deben comparar las gráficas de voltaje de las figuras 25 y 28; tomando en cuenta que el tiempo en el eje “x” de la figura 28 es menor al de la figura 25. Pero a pesar de las diferencias en el tiempo, la gráfica con un intervalo de tiempo de 0.03 segundos presenta una cantidad mayor de ciclos, que la gráfica de 0.05 segundos.

Las diferencias entre voltajes máximos y mínimos son muy claras. La figura 25 muestra cómo el valor de voltaje máximo es el que se esperaría según la fuente de alimentación, pero el voltaje mínimo llega a alcanzar un valor igual a cero, por otro lado, en la figura 28, el voltaje mínimo está muy lejos del cero y el voltaje máximo también corresponde al valor máximo entregado por la fuente de alimentación.

La curva de corriente en la carga, mostrada en la figura 28, necesita de un período de tiempo para alcanzar cierto grado de estabilidad. La razón por la cual se necesita de este tiempo, se debe a la presencia de una componente inductiva en la carga. Antes de llegar a este valor la corriente parte de cero, y empieza a crecer gradualmente, esto no se logra apreciar en la gráfica. La escala en el eje “y”, para la corriente de la carga, no se muestra desde cero, porque se desea prestarle mayor atención a la señal en régimen permanente, y no al régimen transitorio, para mostrar la no linealidad en la corriente.

Continuando con la figura 28, la gráfica de voltaje en la carga representa claramente, la unión de los picos positivos y negativos del voltaje de las tres fases de la fuente de alimentación. La obtención de esta forma de onda se debe a que cada diodo permite el paso de la corriente solo durante un ángulo de  $\pi/3$ , para luego cambiar a otra fase.

**Figura 28. Curvas de corriente y voltaje en la carga y voltaje en la fuente**





Para un rectificador trifásico conectado en puente, el ángulo de conducción para los diodos es  $\pi/3$ , por lo tanto el voltaje en la salida adquiere la forma de:

$$v = \sqrt{3}v_{\text{máx}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \quad 0 \leq \omega t \leq \frac{\pi}{3} \quad \text{y} \quad T = \frac{\pi}{3} \quad (2.8)$$

Donde  $v_{\text{máx}}$  es el voltaje máximo de línea a neutro del sistema.

El voltaje promedio en la carga viene dado por:

$$V_m = \frac{1}{\pi/3} \int_0^{\pi/3} \sqrt{3}v_{\text{máx}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t)$$

$$V_m = \frac{3\sqrt{3}v_{\text{máx}}}{\pi} \quad (2.9)$$

El voltaje eficaz en la carga es:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_0^{\pi/3} \left( \sqrt{3}v_{\text{máx}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{6}\right) \right)^2 d(\omega t)}$$

$$V_{rms} = v_{\text{máx}} \sqrt{\frac{9\sqrt{3}}{4\pi} + \frac{3}{2}} \quad (2.10)$$

Al evaluar la ecuación 2.9 con un voltaje máximo de línea a neutro de 169.831 voltios, el voltaje promedio es de 280.90 voltios, muy cercano al mostrado en la figura 27, de 281.2 voltios. Con la ecuación 2.10 y el voltaje máximo de 169.831 voltios el voltaje eficaz en la carga es de 281.15 voltios, el resultado es bastante cercano a los 281.5 voltios, como se muestra en la figura 27 a través el bloque RMS.

Utilizando las ecuaciones 2.6 y 2.7 se puede calcular el factor de forma y el factor de rizo para el rectificador trifásico no controlado. El factor de forma es 1.001 y el factor de rizo es 0.0462. El rectificador trifásico se acerca mucho más a un rectificador ideal con factor de forma igual a uno y un factor de rizo igual a cero, comparado con un rectificador monofásico.

## **2.2 Rectificadores controlados**

Este tipo de rectificadores permite obtener una corriente continua con diferentes niveles de tensión. El tiristor es el dispositivo básico utilizado para la conversión de energía en estos rectificadores. El control de un tiristor se logra modificando el tiempo de retardo de la señal de disparo, que se aplica a la compuerta. El bloqueo de los tiristores se hace por conmutación natural, es decir, cuando el tiristor se polariza inversamente, automáticamente queda bloqueado, hasta recibir de nuevo la señal de disparo en la compuerta.

### **2.2.1 Rectificador controlado monofásico**

El rectificador controlado monofásico que se presenta a continuación, tiene como principal característica la capacidad de poder entregar a una carga un valor variable de voltaje de corriente directa, desde una fuente de corriente alterna de una sola fase.

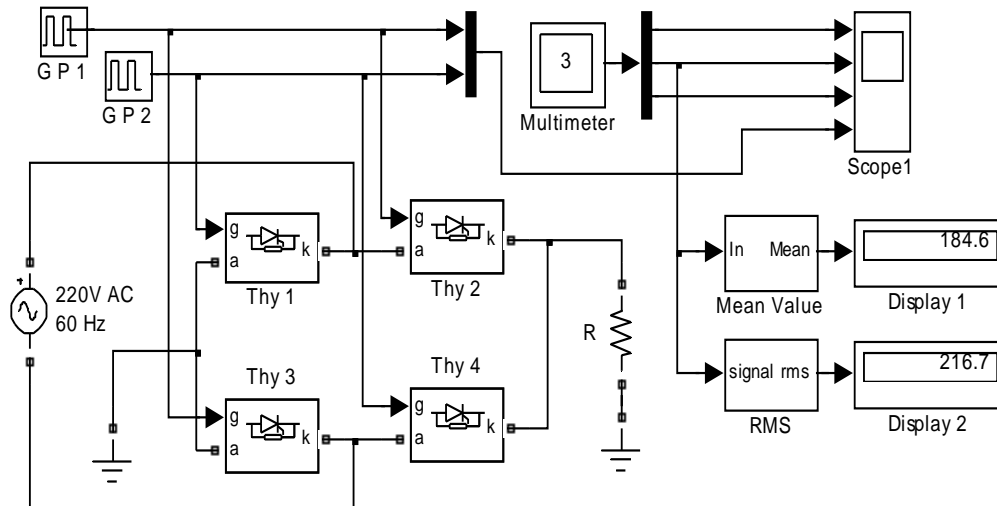
### 2.2.1.1 Modelo de un rectificador controlado monofásico

Al igual que en el modelo de la figura 23, aquí se utilizará una configuración tipo puente, pero con la diferencia que en lugar de diodos se utilizarán cuatro tiristores. El circuito de control para este rectificador se compone de dos generadores de pulsos. La frecuencia de cada generador es de 60 hertzios. Los generadores pueden ser observados en la figura 29.

Para modificar el ángulo de disparo del rectificador, se retrasa el disparo de cada generador de pulsos. El generador identificado como G P 1 excita a los tiristores 2 y 3 con el retraso que se les haya definido, después de un ángulo de desfase igual a  $\pi$  el generador G P 2 envía el pulso de disparo a los tiristores 1 y 4. Luego se repite de nuevo todo el proceso durante 60 veces por segundo. Para este modelo el ángulo de disparo es  $\pi/6$  para cada pareja de tiristores.

En el modelo de la figura 29 se ha implementado un nuevo bloque, este se identifica como Multimeter. El nuevo bloque simplifica el manejo de las mediciones dentro de los modelos. Algunos elementos, tales como la fuente de alimentación y la resistencia de carga, tienen la opción para mostrar la medición de corriente y voltaje. El bloque Multimeter muestra los parámetros que puede mostrar del modelo para que el usuario los seleccione.

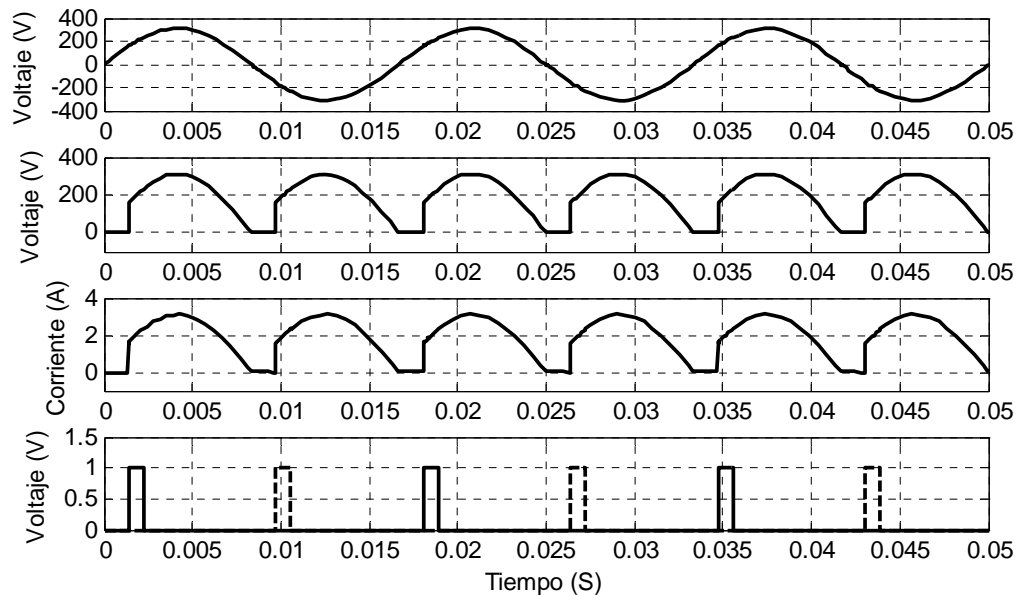
**Figura 29. Modelo de un rectificador monofásico controlado**



La figura 29 muestra el modelo completo del rectificador que alimenta una carga resistiva de 100 ohmios. Las gráficas resultantes después de una simulación de 0.05 segundos se encuentran en la figura 30. A continuación se describe brevemente cada curva.

La primer curva senoidal que se puede observar corresponde al voltaje de la fuente de alimentación. La segunda y tercera curva son el voltaje y la corriente en la carga. La cuarta gráfica muestra la señal que emiten los dos generadores de pulsos para activar las compuertas de cada pareja de tiristores que trabajan durante el mismo lapso de tiempo.

**Figura 30. Gráficas de voltaje en la fuente, voltaje y corriente en la carga y voltaje en los generadores de pulsos**



Al analizar las gráficas de la figura 30 se observa claramente que la corriente obtenida en la carga es directa, pero con ciertas discontinuidades. Dichas discontinuidades comienzan cuando la corriente a través del tiristor se hace igual a cero, y finalizan cuando el tiristor recibe un pulso en su compuerta. La duración de las discontinuidades está definida por el ángulo de disparo en las compuertas de cada pareja de tiristores. Aún cuando el pulso de disparo en el tiristor solo dura un tiempo corto, cada tiristor mantiene su estado de conducción hasta que su corriente se hace cero.

El voltaje de la fuente mostrada en la figura 29 puede ser representado por:

$$v = v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \quad (2.11)$$

Mientras que el voltaje en la carga será:

$$v = v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) \quad \alpha < \omega t < \pi \quad T = \pi \quad (2.12)$$

Donde  $\alpha$  es el ángulo de disparo de los tiristores.

Utilizando la ecuación 2.12, el voltaje promedio en la carga es:

$$V_m = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t) d(\omega t)$$

$$V_m = \frac{v_{\text{máx}}}{\pi} (1 + \cos(\alpha)) \quad (2.13)$$

Para calcular el voltaje eficaz también se utiliza la ecuación 2.12:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t))^2 d(\omega t)}$$

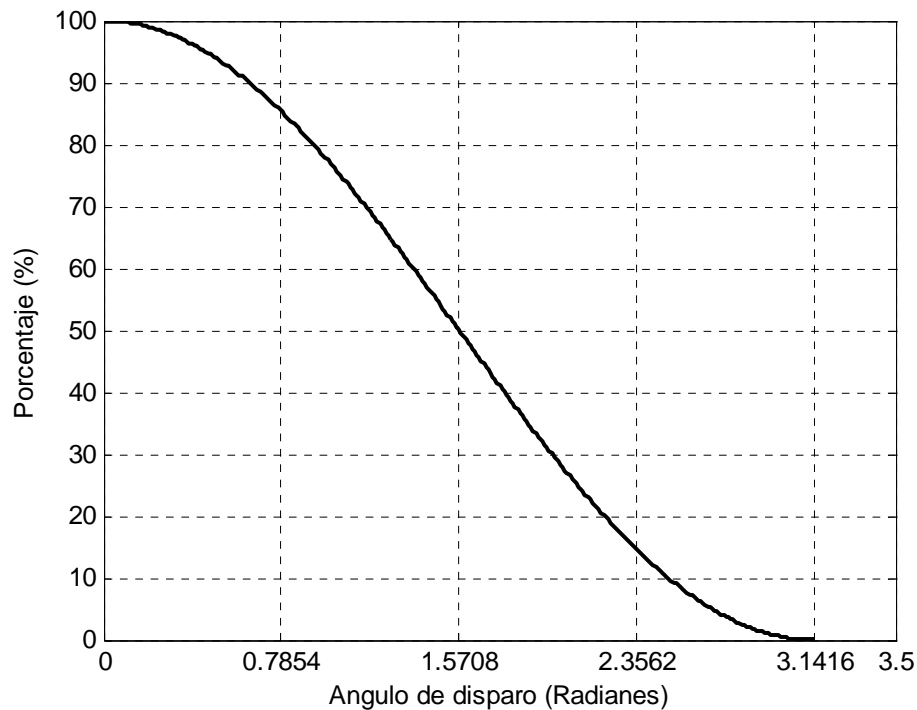
$$V_{rms} = \frac{v_{\text{máx}}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\text{sen}(\alpha) \cos(\alpha) - \alpha + \pi} \quad (2.14)$$

Al evaluar las ecuaciones 2.13 y 2.14 con un voltaje máximo de 311.13 y un ángulo de disparo en los tiristores de  $\pi/6$ , se obtiene un voltaje promedio de 184.8 voltios, y un voltaje eficaz de 216.8. Ambos valores son muy cercanos a los mostrados en la figura 29, 184.6 voltios para el voltaje promedio y 216.7 voltios para el voltaje eficaz. De acuerdo con los resultados de la simulación el factor de forma es 1.458 y el factor de rizo es 1.061.

Como se mencionó anteriormente, una característica muy importante de este tipo de rectificadores, es su capacidad de generar diferentes niveles de voltaje. En las ecuaciones 2.13 y 2.14 es evidente que el voltaje está representado en función del ángulo de disparo en los tiristores.

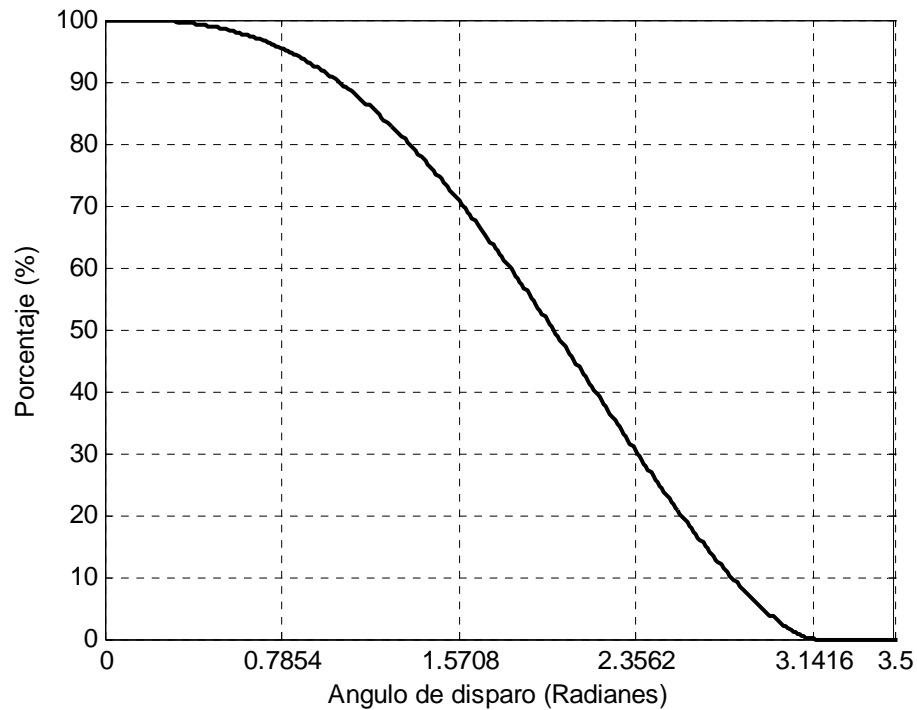
Para comprender mejor esta cualidad, a continuación se encuentra la figura 31, donde está representada la gráfica del voltaje promedio (ecuación 2.13) en función del ángulo  $\alpha$  ó ángulo de disparo. En el eje X se representa el ángulo en radianes y en el eje Y se representa el porcentaje del voltaje promedio. El mínimo se encuentra con un ángulo igual a  $\pi$ , y el máximo es con un ángulo igual a cero.

**Figura 31. Curva de porcentaje del voltaje promedio contra ángulo de disparo**



En la figura 32 se muestra la gráfica para el voltaje eficaz (ecuación 2.14) donde aparece el porcentaje del voltaje eficaz en función del ángulo  $\alpha$  ó ángulo de disparo. En el eje X se representa el ángulo en radianes y en el eje Y se representa el porcentaje del voltaje eficaz. El mínimo se encuentra con un ángulo igual a  $\pi$ , y el máximo con un ángulo igual a cero.

**Figura 32. Curva de porcentaje de voltaje eficaz contra ángulo de disparo**





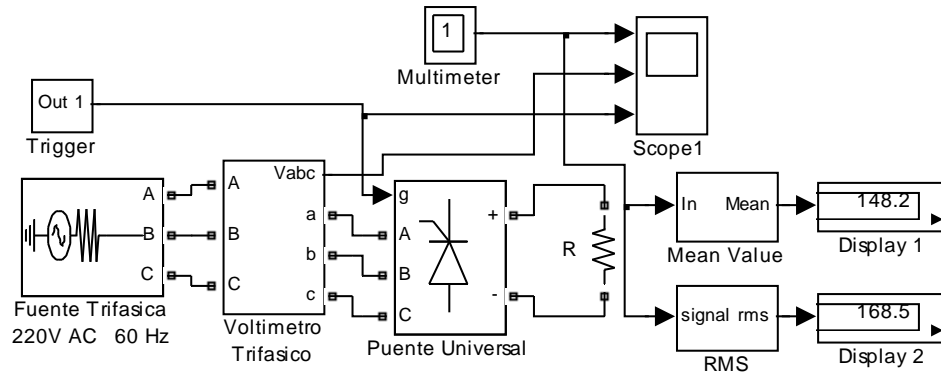
## **2.2.2 Rectificador controlado trifásico**

El rectificador controlado trifásico es muy parecido al rectificador no controlado trifásico mostrado en la figura 27. Con la salvedad que en lugar de utilizar diodos se utilizan tiristores y el requerimiento de un circuito de control para activarlos. Debido a que es un circuito controlado el voltaje que entrega a la carga puede ser modificado según sean las necesidades, y depende del ángulo de disparo que se aplique en los tiristores. En general los rectificadores controlados trifásicos poseen mejores características operativas que los rectificadores controlados monofásicos, obviamente se debe al uso de energía trifásica.

### **2.2.2.1 Modelo de un rectificador controlado trifásico**

El modelo que se muestra en la figura 33 posee una fuente trifásica de 220 voltios corriente alterna y 60 hertzios. El puente universal es igual al de la figura 26, pero en lugar de diodos se utilizan tiristores. El número del bloque Multimeter indica que está midiendo un parámetro, este parámetro es el voltaje en la carga resistiva de 100 ohmios. El voltímetro trifásico busca medir el voltaje que proporciona la fuente antes que sea modificado por el bloque puente universal.

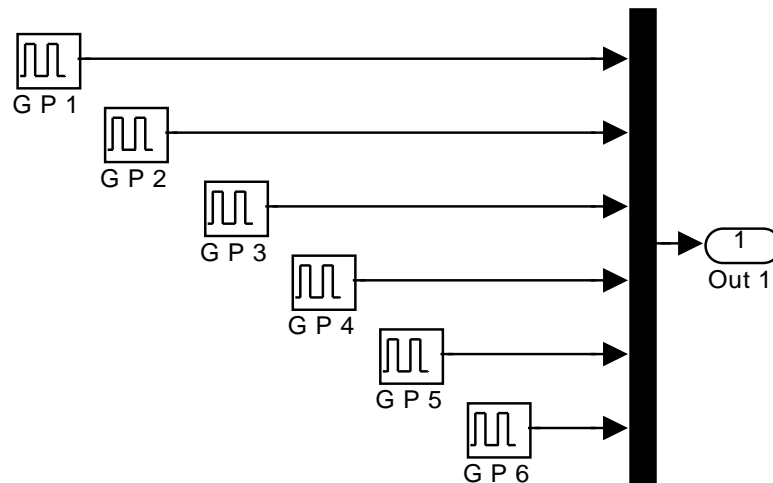
**Figura 33. Modelo de un rectificador trifásico controlado**



Para activar los tiristores, se utiliza un subsistema identificado como Trigger. Los subsistemas sirven para agrupar diversos elementos en un solo bloque, dentro del mismo modelo, con las respectivas entradas y salidas según sea el caso, para interactuar con las demás partes del modelo.

La figura 34 muestra el contenido del bloque Trigger. Dentro de este bloque se encuentran seis generadores de pulsos, cada generador se encarga de controlar la compuerta de un tiristor. Las seis salidas de los generadores se mezclan en un bloque multiplexor para tener una sola salida identificada como Out 1. La serie de pulsos mezclados se aplican a la entrada de señales para compuertas del puente universal. Los seis generadores de pulsos tienen un ángulo de desfase de  $\pi/3$  entre ellos, para dividirse durante un ciclo completo.

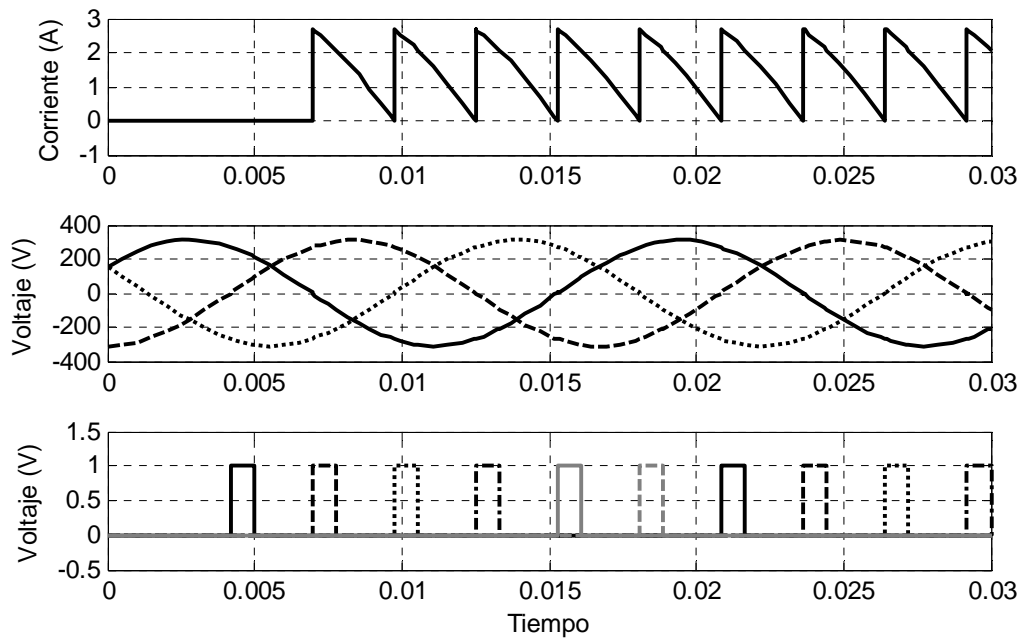
**Figura 34. Vista interna del bloque Trigger**



Al finalizar una simulación de 0.03 segundos y utilizando un ángulo de disparo en los tiristores igual a  $\pi/3$ , se obtienen las gráficas de la figura 35. En la gráfica de corriente que circula a través de la carga hay una discontinuidad al inicio del proceso. Esto se debe a que después del primer pulso, solo hay un tiristor conduciendo, pero luego del segundo pulso el puente comienza a conducir la corriente, de acuerdo a sus características de funcionamiento.

Dentro de la misma figura 35 se pueden observar los pulsos de los seis generadores encapsulados dentro del subsistema Trigger, y cómo quedan distribuidos equitativamente a través de un ciclo completo. Esto significa que la frecuencia de operación en cada generador es de 60 hertzios, pero existe un ángulo de desfase de  $\pi/3$  entre cada uno.

**Figura 35. Gráficas de corriente en la carga, voltaje en la fuente, pulsos de sistema de control**



Para el rectificador trifásico de la figura 33 el voltaje en la carga resistiva es:

$$v = \sqrt{3}v_{\text{máx}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad \frac{\pi}{6} + \alpha \leq \omega t \leq \frac{\pi}{2} + \alpha \quad \text{y} \quad T = \frac{\pi}{3} \quad (2.15)$$

Donde:

$v_{\text{máx}}$  : es el voltaje máximo de línea a neutro del sistema

$\alpha$ : es el ángulo de disparo en los tiristores

Mientras el voltaje promedio se encuentra utilizando la ecuación 2.15:

$$V_m = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \sqrt{3}v_{\text{máx}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) d(\omega t)$$

$$V_m = \frac{3\sqrt{3}v_{\text{máx}}}{\pi} \cos(\alpha) \quad (2.16)$$

Ahora se procede a encontrar el voltaje eficaz, también usando la ecuación 2.15:

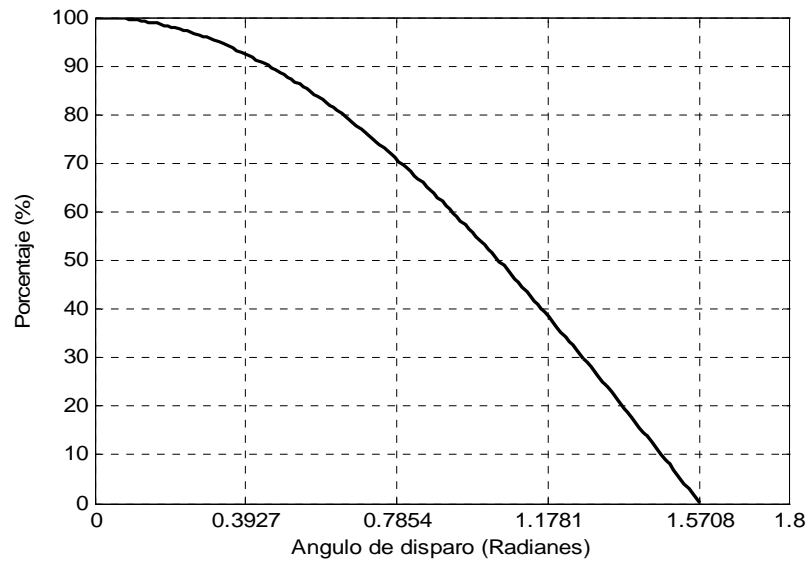
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/2+\alpha} \left(\sqrt{3}v_{\text{máx}} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right)\right)^2 d(\omega t)}$$

$$V_m = \sqrt{3}v_{\text{máx}} \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{3\sqrt{3}}{4\pi} \cos(2\alpha)} \quad (2.17)$$

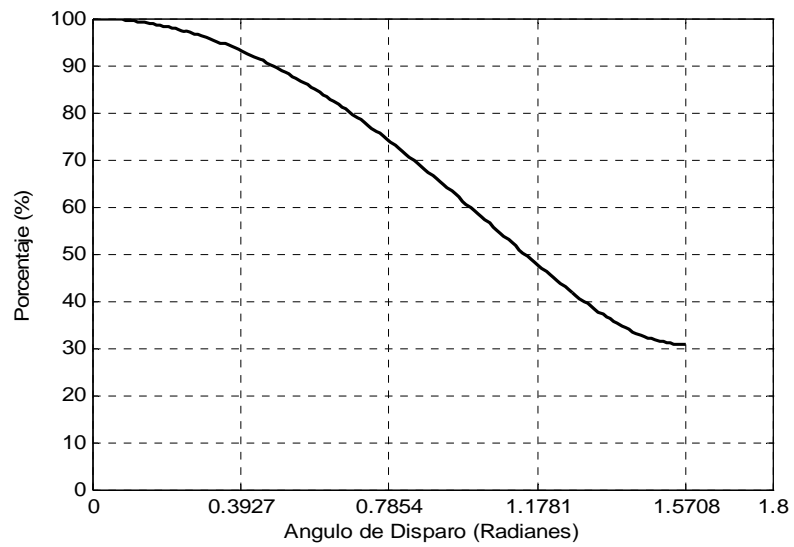
Recordando que el voltaje máximo de fase a neutro es 179.63 voltios y el ángulo de disparo en los tiristores es de  $\pi/3$ . Al evaluar las ecuaciones 2.16 y 2.17 se tiene que el voltaje promedio es de 148.55 voltios y el voltaje eficaz es de 168.48 voltios. Ambos valores son muy cercanos a los mostrados por los bloques Mean y RMS respectivamente en la figura 33.

Al normalizar las ecuaciones 2.16 y 2.17 se obtienen las expresiones de voltaje promedio y voltaje eficaz en función del ángulo de disparo. En la figura 36 se muestra la gráfica del porcentaje del voltaje promedio con un ángulo de disparo que va desde 0 hasta  $\pi/2$ , y en la figura 37 aparece la gráfica del porcentaje del voltaje eficaz con un ángulo de disparo también de 0 hasta  $\pi/2$ .

**Figura 36. Curva de porcentaje del voltaje promedio contra ángulo de disparo**

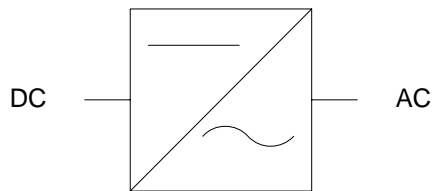


**Figura 37. Curva de porcentaje del voltaje eficaz contra ángulo de disparo**



### 3 CONVERSORES DE CORRIENTE DIRECTA A CORRIENTE ALTERNA

**Figura 38. Símbolo de un inversor**



Este tipo de conversores también se conoce con el nombre de inversores estáticos. Los inversores se caracterizan por tener la capacidad de producir una tensión o una corriente alterna, a partir de una fuente de corriente continua. Tanto el voltaje de salida como la frecuencia pueden ser constantes o variables, según sean las necesidades y requerimientos de las cargas que es necesario alimentar.

Existen dos formas de obtener un voltaje variable en la salida del inversor. Una forma es la variación del voltaje de entrada, manteniendo la ganancia constante. La otra forma es mantener el voltaje de entrada constante, pero se hace variar la ganancia del inversor, esto se logra con un control por modulación de ancho de pulso o PWM por sus siglas en inglés (*Pulse Width Modulation*). La ganancia de un inversor se define como la relación que existe entre el voltaje de salida en corriente alterna y el voltaje de entrada de corriente directa.

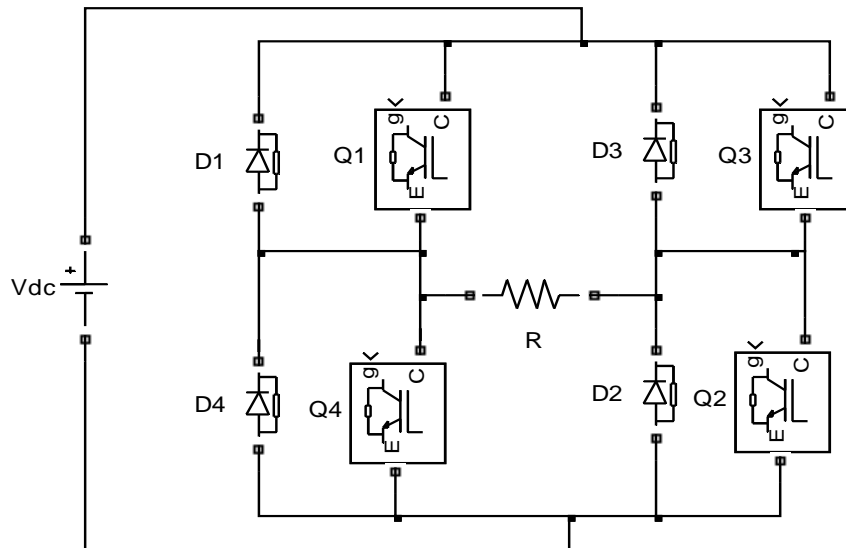
Con la tecnología actual de transistores de potencia y tiristores esta tarea se ha simplificado enormemente. Cabe mencionar que los inversores estáticos son de fácil instalación, sin emisiones de ruido, mayor tiempo de vida y excelente eficiencia. A continuación se presentan dos tipos de inversores muy comunes en la actualidad, el primero de ellos es un inversor monofásico con configuración tipo puente, el segundo es un inversor trifásico también en configuración tipo puente. Ambos inversores son de baja frecuencia, con una onda resultante cuadrada.

### **3.1 Inversor monofásico en configuración tipo puente**

Este tipo de inversor utiliza cuatro transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT por sus siglas en inglés), conectados en configuración tipo puente. Las regiones en que trabajan los transistores son dos, en saturación y en corte. De forma general se pueden describir estos transistores como un juego de interruptores controlados. Por lo tanto, el circuito de control es un elemento muy importante para el correcto funcionamiento de estos convertidores. Cada transistor necesita de un diodo conectado en antiparalelo entre se colector y emisor. Los diodos se utilizan como dispositivos de retroalimentación.



**Figura 39. Inversor monofásico en configuración tipo puente**



La figura 39 muestra un inversor monofásico completo (transistores de compuerta aislada, diodos, carga y fuente de corriente directa), a excepción del circuito de control, este no se muestra para lograr una mejor comprensión del circuito.

Los transistores funcionan en parejas, Q1 y Q2 forman una pareja, mientras Q3 y Q4 forman la otra pareja. Cuando dos están conduciendo la corriente a través de ellos, los otros dos permanecen bloqueando la corriente. Después que ha transcurrido la mitad del período las funciones se invierten, los dos transistores que estaban conduciendo corriente pasan a bloquearla y los otros dos transistores que estaban bloqueando la corriente comienzan a conducirla hasta finalizar el período. Luego toda la secuencia se repite periódicamente a la frecuencia que se defina en el sistema de control.

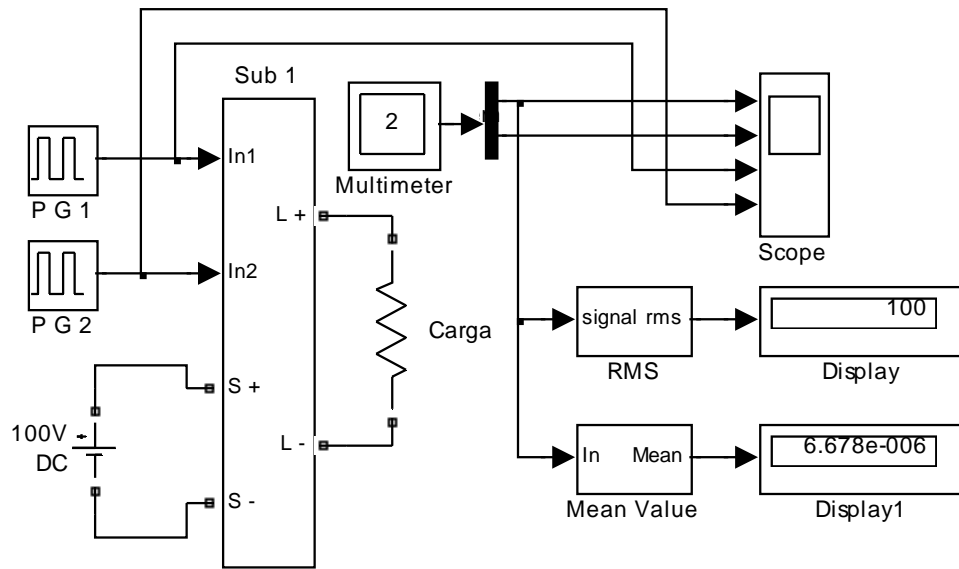
La mayoría de las cargas tienen componentes inductivas, debido a esto, cuando el voltaje que se le aplica cambia de polaridad, la corriente no puede cambiar inmediatamente. Es en este instante cuando se hace necesaria la operación de los diodos de retroalimentación. Cuando comienzan a funcionar permiten que la corriente mantenga su dirección a través de la carga, aún después que los transistores que estaban conduciendo la corriente en esa misma dirección ahora se encuentren bloqueándola.

Con cargas netamente resistivas, donde el factor de potencia es 1, la corriente no se retrasa con respecto al voltaje en ningún momento, por lo tanto, no son necesarios los diodos de retroalimentación dentro del circuito. Todos los cambios de voltaje que se apliquen a la carga siempre permanecerán en fase con los cambios de corriente, de esta manera la corriente que circula por la carga resistiva podrá circular sin dificultades a través de los mismos transistores que conectan la fuente con la carga.

### **3.1.1 Modelo de un inversor monofásico en configuración tipo puente**

En la figura 40 se puede apreciar el modelo de un inversor monofásico en configuración tipo puente. Al igual que en los modelos anteriores, en este se hace uso de un subsistema, identificado como Sub 1. Los subsistemas hacen que un modelo con varios elementos sea más ordenado y fácil de seguir. Las entradas In1 e In2 reciben las señales del sistema de control, en este caso el sistema de control lo componen dos generadores de pulsos. Los puntos de conexión S+ y S- deben recibir la alimentación de una fuente de corriente directa, para este modelo se utilizó 100 V DC. La carga se conectará entre los puntos L+ y L-, en estos puntos el inversor entregará corriente alterna.

**Figura 40. Modelo de un inversor monofásico en configuración tipo puente**



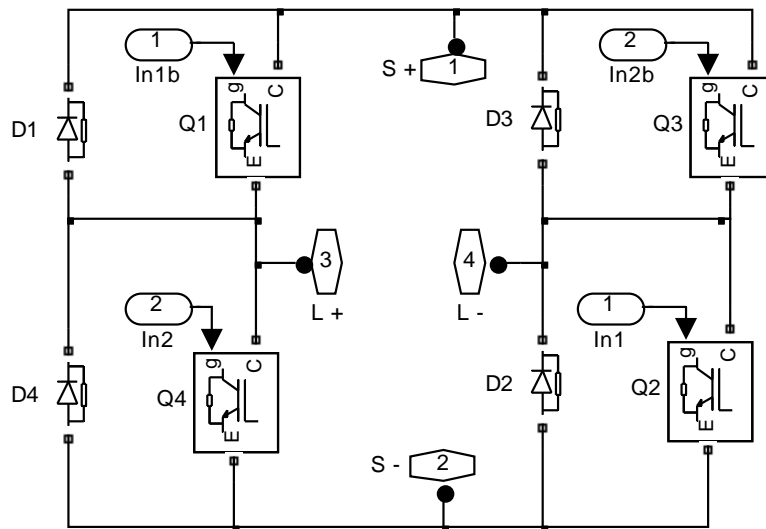
Dentro del modelo se tiene un bloque de medición identificado como Multimeter, el número 2 que muestra este bloque, indica que está midiendo dos señales y enviando sus valores a una barra demultiplexora. Esta barra se encarga de separar las señales que recibe combinadas y llevarlas al bloque de visualización. Las señales mencionadas anteriormente se refieren al voltaje y la corriente de la carga.

El circuito de control lo componen dos generadores de pulsos. Ambos generadores están funcionando a una frecuencia de 60 hertzios y el ciclo de trabajo es de 50% para los dos. El desfase entre ambos es de 180 grados. Cada generador de pulsos controla dos transistores de compuerta aislada.

Los transistores y diodos de retroalimentación pueden observarse en la figura 41. En esta figura aparece una vista interna del subsistema Sub 1, aquí también se puede identificar las direcciones que toman: la corriente suministrada por la fuente de corriente directa, la señal de los generadores de pulsos, y de dónde proviene la corriente alterna aplicada a la carga.

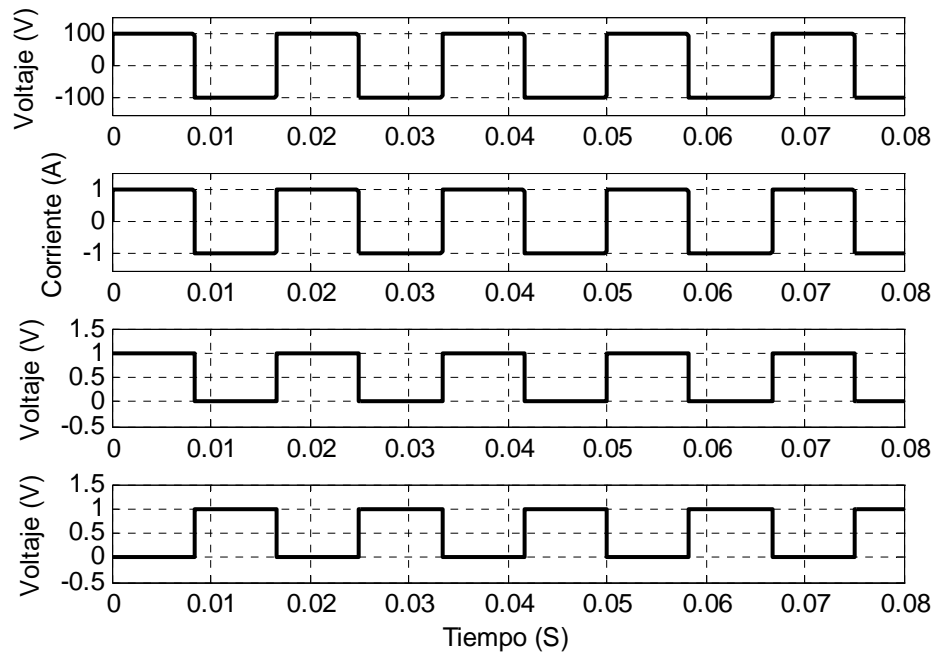
El generador de pulsos PG1 envía la señal a las entradas identificadas con In1 e In1b, mientras el generador PG2 envía una señal a las entradas In2 e In2b, las cuatro entradas corresponden a las compuertas de los transistores. Los puntos de conexión S+ y S- reciben la energía de la fuente de corriente directa y los puntos de conexión L+ y L- brindan la corriente alterna a la carga.

**Figura 41. Vista interna del subsistema Sub 1**



Para la simulación del modelo anterior se colocó entre las terminales L+ y L- una carga completamente resistiva de 100 ohmios. Después de ejecutar la simulación del modelo por 0.08 segundos se obtienen las gráficas resultantes, mostradas en la figura 42.

**Figura 42. Voltaje y corriente en la carga, señal de salida en los generadores de pulsos PG1 y PG2**



De la figura 42 se pueden resaltar las siguientes características. El voltaje de salida tiene la forma de una onda cuadrada con un ciclo de trabajo del 50%. La amplitud del voltaje varía entre 100 y -100 voltios, que es el voltaje nominal de la fuente de corriente directa. La frecuencia de operación es de 60 hertzios.

El generador de pulsos 1 controla el tiempo que la carga recibe voltaje positivo, y por otro lado, el generador de pulsos 2 controla el tiempo que la carga recibe voltaje negativo, además ambos generadores de pulsos están desfasados 180 grados, para producir una onda completa. Debido a que la carga solamente posee una componente resistiva la corriente estará en fase con el voltaje y tendrá la misma forma de onda que el voltaje.

Al inspeccionar la forma de onda del voltaje aplicado a la carga, desde el inversor mostrado en la figura 40, es evidente que su forma es periódica. Este tipo de ondas puede ser representado por una sumatoria infinita de funciones seno y coseno, también conocida como serie de Fourier (ecuación 3.1). Al estudiar la forma de onda, se pueden eliminar dos factores de la serie. Los términos a eliminar son el  $a_0$  y el  $a_n$ . El primero de ellos es el valor promedio de la señal, tomando en cuenta la simetría respecto al eje X, el valor promedio es cero. Otra característica importante en esta onda, es el hecho de ser una función impar, con este rasgo, se pueden eliminar todos los factores que incluyen coseno, esto quiere decir que el factor  $a_n$  es cero.

$$v(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sen(n\omega t)) \quad (3.1)$$

Para el voltaje de salida del inversor:

$$b_n = \frac{2}{2\pi} \left( \int_0^{\pi} V_s \sen(n\omega t) d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} -V_s \sen(n\omega t) d(\omega t) \right) \quad (3.2)$$

Al resolver la ecuación 3.2 se tiene:

$$b_n = \frac{4V_s}{(2n-1)\pi}$$

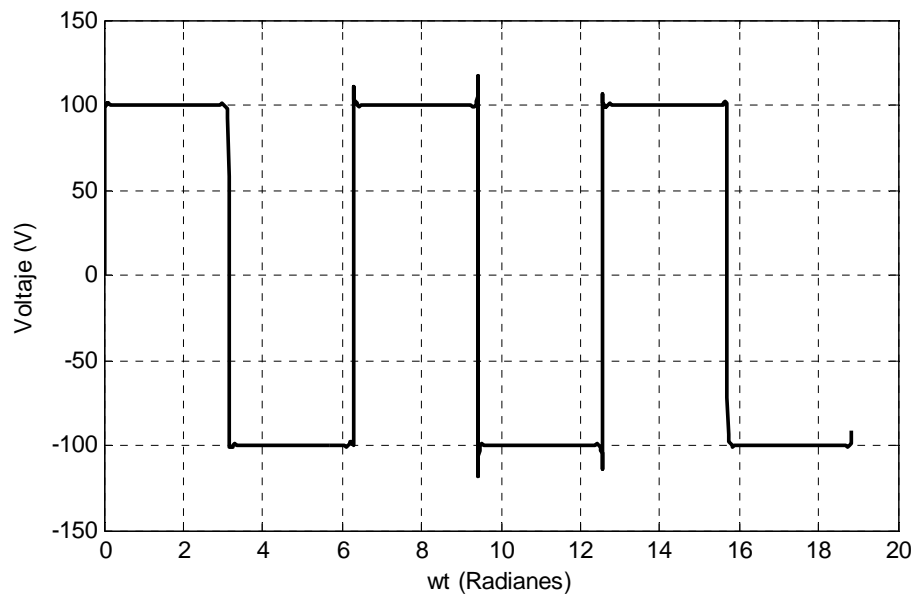
Por lo tanto el voltaje en la carga solo posee componentes armónicas impares y puede ser representado por:

$$v(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{4V_s}{n\pi} \sen(n\omega t) \right) \quad (3.3)$$

Para la ecuación 3.3  $V_s$  es el voltaje de la fuente de corriente directa. Al tomar  $n$  igual a 1 y dividir dentro de  $\sqrt{2}$ , se obtiene el voltaje RMS de la componente fundamental. Este valor es el 90% de  $V_s$ .

Utilizando variables y expresiones simbólicas en la línea de comando de *Matlab*, se puede ingresar la función 3.3 y luego graficarla con un  $n=300$  y  $V_s=100$  V. El resultado solamente muestra los primeros tres ciclos, estos se pueden observar en la figura 43.

**Figura 43. Gráfica de la función 3.3**



Al colocar una carga resistiva en el inversor de la figura 3-3 la corriente instantánea viene dada por la ecuación 3.4:

$$i(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{4V_s}{Rn\pi} \text{sen}(n\omega t) \right) \quad (3.4)$$

En un inversor existe un parámetro muy importante, la distorsión armónica total (THD). Esta distorsión es una medida del valor efectivo de la sumatoria de todas las componentes armónicas, comparado con el valor de la componente fundamental. Por ejemplo, una corriente con una distorsión armónica total del 20% significa que la corriente armónica total es igual al 20% del total de la corriente fundamental. Para calcular la distorsión armónica total se utiliza la ecuación 3.5.

$$THD = \frac{1}{V_{\text{máx1}}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_{\text{máxn}}^2} \quad (3.5)$$

Para el inversor de la figura 40 la distorsión armónica total de la corriente, utilizando la ecuación 3.5 y tomando en consideración hasta la armónica número 29 es:

$$THD = \frac{1}{0.90} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{15} \left( \left( \frac{4(100)}{\sqrt{2}(2n-1)\pi(100)} \right)^2 \right)}$$

$$THD = 46.60\%$$

En la tabla I se muestran los resultados obtenidos al utilizar la herramienta *FFT Analysis (Fast Fourier Transform Analysis)*. Con esta opción *Simulink* realiza una transformada rápida de Fourier para analizar cualquier señal periódica. Este análisis se utilizó en la corriente que circula por la carga del inversor mostrado en la figura 40, tomando en consideración hasta la armónica número 30. La forma de onda de la corriente aparece en la figura 43. La información más importante de la tabla I es el valor pico y el valor RMS de la componente fundamental, así como la distorsión total armónica.



Otro dato muy interesante es el factor armónico de las diferentes componentes, este factor indica la contribución de cada armónica. Al revisar estos factores se puede notar que las componentes pares no tienen un porcentaje representativo, comparado con las componentes impares y la componente de corriente directa resulta ser despreciable.

**Tabla I. Resultados del análisis de Transformada de Fourier para un inversor monofásico**

Sampling time	= 4.68384e-005 s
Samples per cycle	= 355.833
Fundamental	= 1.273 peak (0.9003 rms)
Total Harmonic Distortion (THD)	= 46.57%
0 Hz (DC)	0.22 %
60 Hz Fund	100.00 %
120 Hz (h2)	0.44 %
180 Hz (h3)	33.33 %
240 Hz (h4)	0.44 %
300 Hz (h5)	19.99 %
360 Hz (h6)	0.44 %
420 Hz (h7)	14.27 %
480 Hz (h8)	0.44 %
540 Hz (h9)	11.10 %
600 Hz (h10)	0.44 %
660 Hz (h11)	9.07 %
720 Hz (h12)	0.44 %
780 Hz (h13)	7.67 %
840 Hz (h14)	0.44 %
900 Hz (h15)	6.64 %
960 Hz (h16)	0.44 %
1020 Hz (h17)	5.85 %
1080 Hz (h18)	0.44 %
1140 Hz (h19)	5.23 %
1200 Hz (h20)	0.44 %
1260 Hz (h21)	4.73 %
1320 Hz (h22)	0.44 %
1380 Hz (h23)	4.31 %
1440 Hz (h24)	0.44 %
1500 Hz (h25)	3.96 %
1560 Hz (h26)	0.44 %
1620 Hz (h27)	3.66 %
1680 Hz (h28)	0.44 %
1740 Hz (h29)	3.40 %
1800 Hz (h30)	0.44 %

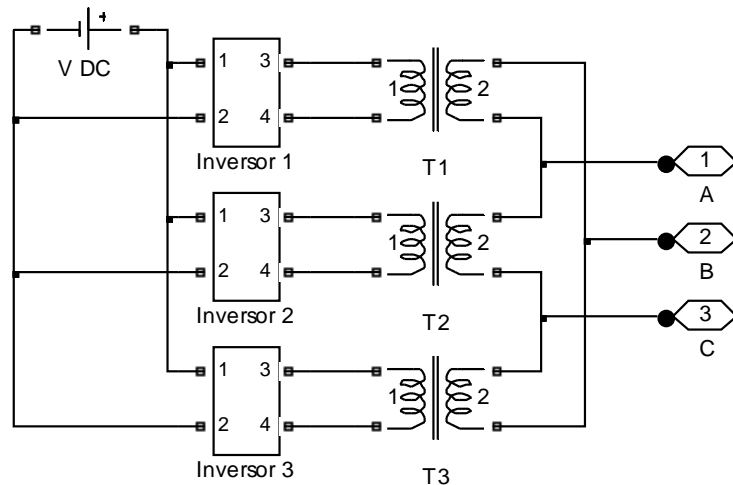
### **3.2 Inversor trifásico en configuración tipo puente**

Las cargas trifásicas tienen como principal característica la demanda de cantidades considerables de potencia. Por este motivo, este tipo de inversores es muy común que manejen grandes niveles de potencia. Para obtener la configuración final de un inversor trifásico, usualmente se conectan tres inversores monofásicos en paralelo a una misma fuente de corriente continua. Cada inversor monofásico funciona con un ángulo de desfase entre sí de 120 grados para lograr generar un voltaje trifásico balanceado.

Cada inversor monofásico provee la energía de cada fase, pero es obvio que sus salidas no pueden conectarse entre sí. Para obtener un inversor trifásico funcional se necesitan de tres transformadores monofásicos, donde los devanados primarios deben estar aislados entre sí. Los devanados secundarios pueden estar conectados en estrella o en delta, pero se prefiere el uso de la delta para evitar las componentes armónicas múltiplos de 3.

En la figura 44 se muestra el esquema general para un inversor trifásico, compuesto por una fuente de corriente continua, tres inversores monofásicos y tres transformadores también monofásicos. Los devanados primarios de los transformadores quedan aislados entre sí por medio de los inversores, mientras que las bobinas del lado secundario están conectadas en delta.

**Figura 44. Esquema de un inversor trifásico**

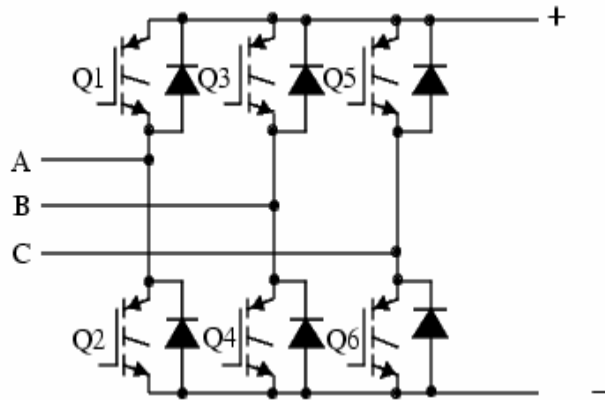


### 3.2.1 Modelo de un inversor trifásico.

Para realizar el modelo del inversor trifásico se utilizará un puente universal de transistores con compuerta aislada, como el que se observa en la figura 45. La fuente de corriente continua se conecta a través de las terminales marcadas con + y -, para luego obtener corriente alterna trifásica en las terminales A, B y C.

Una característica muy interesante del puente universal es el hecho de tener incluidos los diodos de retroalimentación dentro del mismo bloque. Estos diodos brindan un camino a la corriente que fluye a través de cargas con factores de potencia menores a 1. Es decir, cuando la corriente esta desfasada respecto al voltaje, debido a las características de la carga.

**Figura 45. Puente universal de transistores con compuerta aislada**

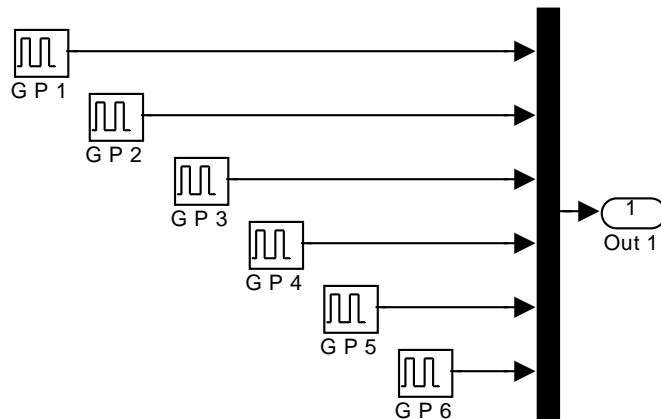


El circuito de control para este inversor trifásico, es uno de los componentes más importantes para un funcionamiento adecuado. En este modelo el circuito de control consta de 6 generadores de pulsos, cada uno controla la compuerta de un transistor. La operación de estos transistores es en dos regiones específicas, región de corte y saturación. Esta forma de operación puede ser comparada a la operación de un interruptor controlado.

Los pulsos de los 6 generadores tienen una frecuencia de operación de 60 hertzios y un ciclo de trabajo de 50%. Las señales de los generadores están desfasadas 60 grados entre sí. En la figura 46 se muestran los 6 generadores de pulsos, dichos generadores se encuentran agrupados dentro de un subsistema. Las señales de todos los generadores se unen para ser enviadas todas juntas al bloque puente universal.

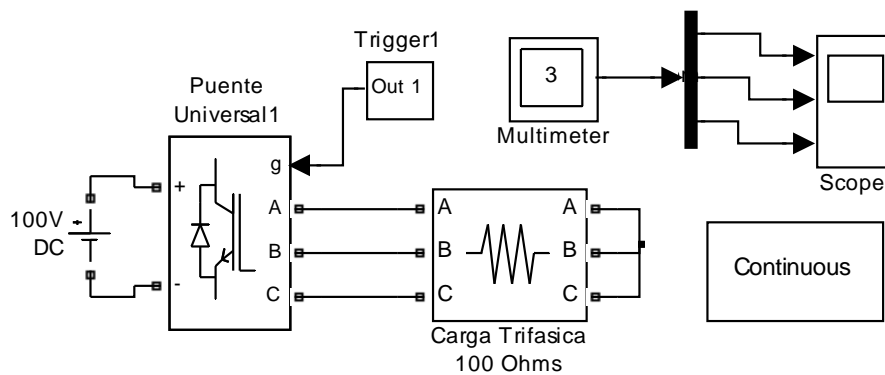
Todas las cualidades y formas de operación antes descritas, dan como resultado una fuente de corriente alterna trifásica, donde las tres fases están desplazadas 120 grados entre sí.

**Figura 46. Bloque de control con 6 generadores de pulsos**



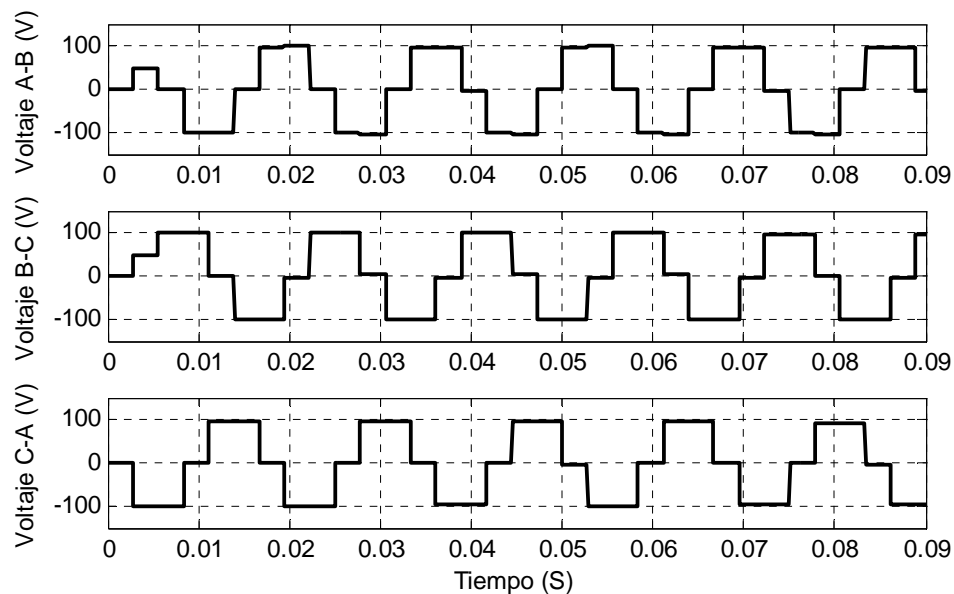
El modelo del inversor trifásico, utilizando un puente universal de transistores con compuerta aislada, y los demás elementos necesarios para realizar la simulación respectiva se muestran en la figura 47.

**Figura 47. Modelo de un inversor trifásico**



La carga del modelo de la figura 47 es trifásica balanceada de 100 ohmios, conectada en estrella. El bloque Continuous contiene diferentes herramientas para el análisis de los modelos, en este caso se utiliza la herramienta FFT Analysis, para desarrollar un análisis rápido aplicando la transformada de Fourier a las señales obtenidas del bloque Multimeter.

**Figura 48. Gráficas de voltaje de línea a línea de las tres fases de la figura 47**



Después de ejecutar la simulación durante 0.09 segundos, se obtienen las gráficas del voltaje de línea a línea en cada fase. Estas gráficas se muestran en la figura 48. Lo más importante de tomar en cuenta en las tres gráficas, es el desplazamiento de 120 grados que existe entre cada señal, además del hecho que el voltaje máximo aplicado a la carga es el mismo que provee la fuente de corriente directa.

Siguiendo con la figura 48, debe considerarse que la forma de onda no es senoidal, sino cuadrada, esto se traduce en una componente fundamental senoidal y otras componentes armónicas. El primer ciclo en cada fase no presenta la misma forma que el resto de la onda, esto se debe a que los transistores son activados según una secuencia establecida. Durante el primer ciclo no todos los transistores están conduciendo la corriente a través de ellos. En la tabla II se muestran los resultados del análisis armónico del voltaje línea a línea entre las fases A y B. El valor pico de la componente fundamental es 109.8 voltios, esto significa que el valor RMS es 77.61 voltios. Mientras que la distorsión armónica total es 29.22 %.

**Tabla II. Resultados del análisis de Transformada de Fourier para un inversor trifásico**

```

Sampling time      = 4.95595e-005 s
Samples per cycle = 336.296
Fundamental       = 109.8 peak (77.61 rms)
Total Harmonic Distortion (THD) = 29.22%

```

0 Hz (DC)	1.52 %
60 Hz Fund	100.00 %
120 Hz (h2)	0.11 %
180 Hz (h3)	0.49 %
240 Hz (h4)	0.08 %
300 Hz (h5)	20.06 %
360 Hz (h6)	0.18 %
420 Hz (h7)	14.24 %
480 Hz (h8)	0.05 %
540 Hz (h9)	0.20 %
600 Hz (h10)	0.09 %
660 Hz (h11)	9.09 %
720 Hz (h12)	0.15 %
780 Hz (h13)	7.65 %
840 Hz (h14)	0.08 %
900 Hz (h15)	0.12 %
960 Hz (h16)	0.10 %
1020 Hz (h17)	5.86 %
1080 Hz (h18)	0.15 %
1140 Hz (h19)	5.20 %
1200 Hz (h20)	0.08 %
1260 Hz (h21)	0.09 %
1320 Hz (h22)	0.08 %
1380 Hz (h23)	4.32 %
1440 Hz (h24)	0.16 %
1500 Hz (h25)	3.91 %
1560 Hz (h26)	0.07 %
1620 Hz (h27)	0.08 %
1680 Hz (h28)	0.08 %
1740 Hz (h29)	3.41 %
1800 Hz (h30)	0.16 %

Haciendo un desplazamiento de  $60^\circ$  se logra obtener una simetría par en la forma de onda resultante. Empleando la ecuación 3.1, para representar el voltaje por medio de su serie de Fourier y empleando una simetría par, los términos  $a_0$  y  $b_n$  de la serie pueden ser eliminados. A continuación se presenta el desarrollo necesario para obtener la serie de Fourier antes descrita.

$$a_n = \frac{2}{2\pi} \left( \int_{-\pi}^{-\frac{2\pi}{3}} -V_s \cos(n\omega t) d(\omega t) + \int_{-\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{3}} V_s \cos(n\omega t) d(\omega t) + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} -V_s \cos(n\omega t) d(\omega t) \right) \quad (3.6)$$

Resolviendo la ecuación 3.6 se tiene que:

$$a_n = \frac{4V_s}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (3.7)$$

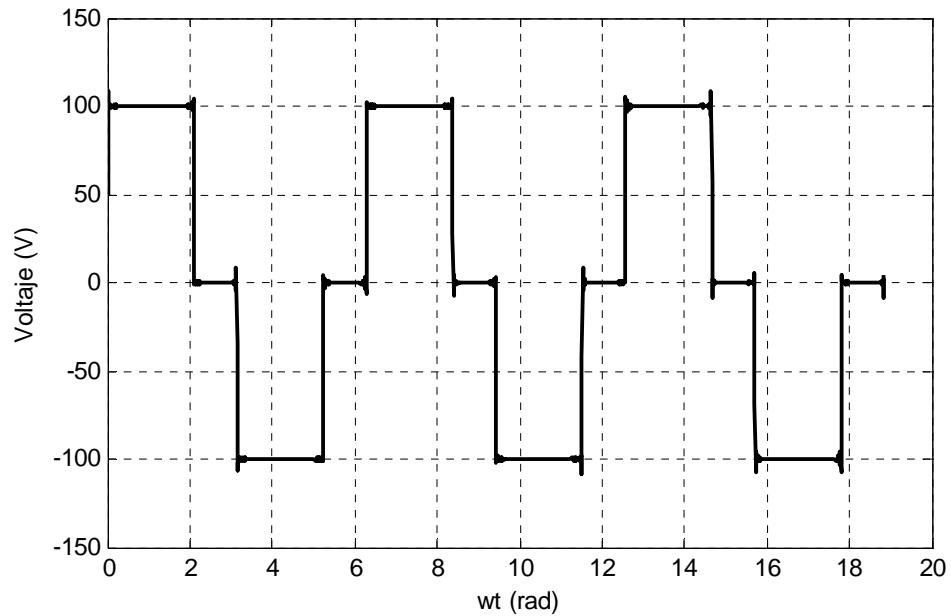
Sustituyendo el valor obtenido de la expresión 3.7, en la ecuación 3.1, y tomando en cuenta el desfase de  $60^\circ$  o  $\pi/3$ :

$$v(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{4V_s}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cos\left(n\omega t - \frac{\pi}{3}\right) \right) \quad (3.8)$$

Al aplicar de nuevo el uso de variables y expresiones simbólicas en *Matlab*, se puede representar la función 3.8 para luego graficarla con un  $n=300$  y  $V_s=100$  V. El resultado solamente muestra los primeros tres ciclos, estos se encuentran representados a través de la figura 49.



**Figura 49. Gráfica de la función 3.8**



De la ecuación 3.8 se puede obtener el valor pico o máximo de la componente fundamental haciendo  $n=1$  y sustituyendo  $V_s$  por 100 V en la ecuación 3.9 el voltaje máximo es 110.27 voltios.

$$v_{\text{máx}} = 1.1027V_s \quad (3.9)$$

El valor RMS de la componente fundamental se muestra en la ecuación 3.10. Sustituyendo  $V_s$  por 100 V en la ecuación 3.10 el voltaje RMS es 77.97 voltios.

$$v_{\text{rms}} = 0.7797V_s \quad (3.10)$$

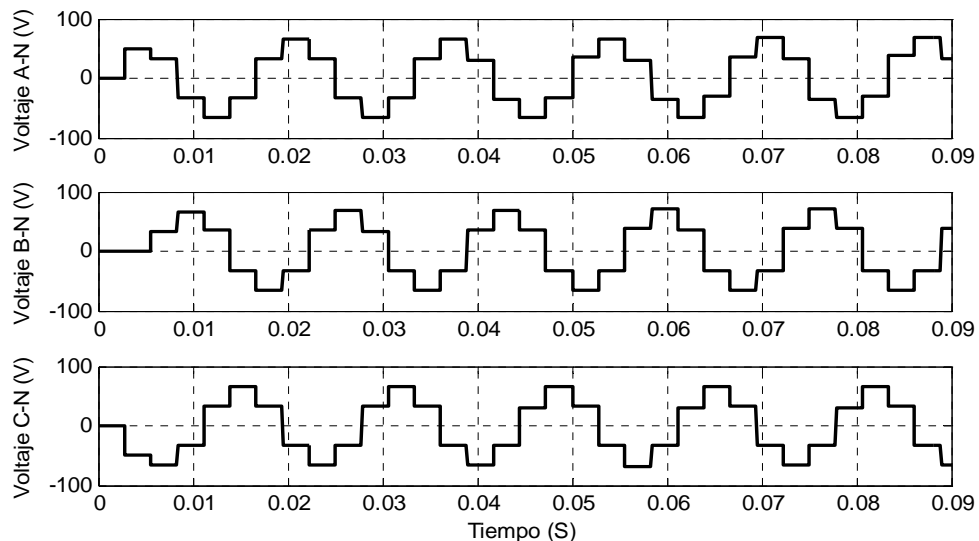
Tanto el voltaje máximo como el voltaje RMS, de la componente fundamental tienen un valor muy cercano al mostrado en los resultados del análisis de Fourier aplicado a la señal. Estos resultados se pueden observar en la tabla II. Este análisis asigna porcentaje a las componentes pares y de corriente directa, esto se percibe en las diferencias de los valores mostrados por el análisis y los valores calculados matemáticamente. Aplicando la ecuación 3.5 para encontrar la distorsión armónica total se tiene:

$$THD = \frac{1}{110.27} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots}^{30} \left( \left( \frac{4(100)}{n\pi} \operatorname{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \right)^2 \right)}$$

$$THD = 29.24\%$$

Utilizando el mismo modelo de la figura 47, pero cambiando los puntos de referencia para la medición en el bloque Multimeter, se pueden obtener los valores de voltaje de línea a neutro y luego de una simulación, con duración de 0.09 segundos, se obtienen las gráficas de la figura 50.

**Figura 50. Gráficas de voltaje de línea a neutro de las tres fases de la figura 47**



De igual forma que en la figura 48, el primer ciclo de las curvas en la figura 50 no tiene una forma bien definida, es a partir del segundo ciclo cuando la onda muestra un patrón mucho más simétrico. La explicación para esta característica, es la misma que se dio en el caso anterior. Los transistores están comenzando a conducir uno por uno, hasta que se alcanza un estado estable de trabajo. Este estado es evidente a partir del segundo ciclo.

Las formas de onda periódica de la figura 50, pueden ser descritas por su respectiva serie de Fourier. Utilizando una simetría de función impar, es decir, respecto al eje Y, se tiene:

$$b_n = 2 \frac{2}{2\pi} \left( \int_0^{\frac{\pi}{3}} \frac{V_s}{3} \text{sen}(n\omega t) d(\omega t) + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{2V_s}{3} \text{sen}(n\omega t) d(\omega t) + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \frac{V_s}{3} \text{sen}(n\omega t) d(\omega t) \right) \quad (3.11)$$

Resolviendo la ecuación 3.11 se encuentra:

$$b_n = \frac{4V_s}{3n\pi} \left( \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{6}\right) + 1 \right) \quad (3.12)$$

Después de haber encontrado el valor de  $b_n$  y sabiendo que  $a_0=0$  y  $a_n=0$ , estos valores pueden ser sustituidos en la ecuación 3.1 para tener:

$$v(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \left( \frac{4V_s}{3n\pi} \left( \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi}{6}\right) + 1 \right) \text{sen}(n\omega t) \right) \quad (3.13)$$

Tomando en consideración solamente la componente fundamental, es decir  $v(t)$  con  $n=1$ , se obtienen los valores máximos y RMS de la ecuación 3.13. Las ecuaciones 3.14 y 3.15 representan el voltaje máximo y el voltaje RMS en función del voltaje de la fuente de alimentación de corriente directa.

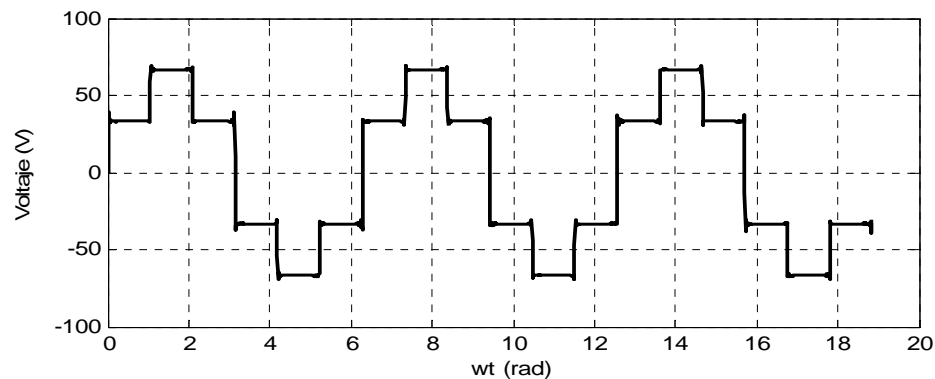
$$v_{\text{máx}} = 0.6366V_s \quad (3.14)$$

$$v_{\text{rms}} = 0.4501V_s \quad (3.15)$$

Al comparar las ecuaciones 3.9 y 3.10 con las ecuaciones 3.14 y 3.15, se hace evidente la relación de  $\sqrt{3}$  que existe entre valores de línea a línea y valores de línea a neutro en una carga conectada en estrella.

Sustituyendo  $V_s$  por 100 voltios en las ecuaciones 3.14 y 3.15 se encuentra el valor máximo y RMS del voltaje en el modelo. Esto significa que el voltaje máximo es 63.66 voltios y el voltaje RMS es 45.01 voltios. Empleando variables y expresiones simbólicas, *Matlab* puede ser utilizado para graficar este tipo de funciones. La gráfica resultante de la función 3.13 aparece representada en la figura 51

**Figura 51. Gráfica de la función 3.13**



Con la serie de Fourier obtenida en la ecuación 3.13 y la fórmula 3.5 se procederá a calcular la distorsión armónica total de la forma de onda hasta la componente armónica número 30.

$$THD = \frac{1}{63.66} \sqrt{\sum_{n=2}^{16} \left( \left( \frac{4(100)}{3(2n-1)\pi} \left( \sin\left(\frac{(2n-1)\pi}{2}\right) \sin\left(\frac{(2n-1)\pi}{6}\right) + 1 \right) \right)^2 \right)}$$

$$THD = 29.24\%$$

Al realizar un análisis de Fourier a la señal del Voltaje de línea a neutro, de la fase A, utilizando el bloque Continuous del modelo se obtienen los resultados que se muestran en la tabla III. Aquí se pueden comparar los valores calculados anteriormente de voltaje máximo, voltaje RMS y distorsión armónica total. Algo muy interesante de la distorsión armónica total, es que tanto para el voltaje de línea a línea, como de línea a neutro su valor es el mismo, si se toma en cuenta que existen diferencias notables entre las formas de onda para el voltaje de línea a línea y el voltaje de línea a neutro aplicado por la fuente a la carga del sistema.

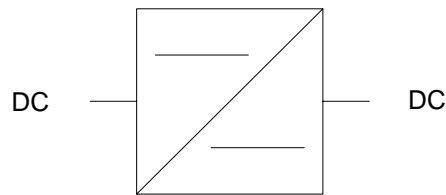
**Tabla III. Resultados del análisis de Transformada de Fourier para voltaje de línea a neutro**

Sampling time = 4.95595e-005 s  
 Samples per cycle = 336.296  
 Fundamental = 63.24 peak (44.72 rms)  
 Total Harmonic Distortion (THD) = 29.18%

0 Hz (DC)	0.28 %
60 Hz Fund	100.00 %
120 Hz (h2)	0.05 %
180 Hz (h3)	0.26 %
240 Hz (h4)	0.13 %
300 Hz (h5)	19.99 %
360 Hz (h6)	0.11 %
420 Hz (h7)	14.29 %
480 Hz (h8)	0.11 %
540 Hz (h9)	0.13 %
600 Hz (h10)	0.13 %
660 Hz (h11)	9.04 %
720 Hz (h12)	0.09 %
780 Hz (h13)	7.69 %
840 Hz (h14)	0.12 %
900 Hz (h15)	0.11 %
960 Hz (h16)	0.13 %
1020 Hz (h17)	5.81 %
1080 Hz (h18)	0.09 %
1140 Hz (h19)	5.24 %
1200 Hz (h20)	0.11 %
1260 Hz (h21)	0.10 %
1320 Hz (h22)	0.12 %
1380 Hz (h23)	4.27 %
1440 Hz (h24)	0.10 %
1500 Hz (h25)	3.96 %
1560 Hz (h26)	0.11 %
1620 Hz (h27)	0.10 %
1680 Hz (h28)	0.12 %
1740 Hz (h29)	3.35 %
1800 Hz (h30)	0.09 %

## 4 CONVERSORES DE CORRIENTE DIRECTA A CORRIENTE DIRECTA

Figura 52. Símbolo de un conversor de corriente directa a corriente directa



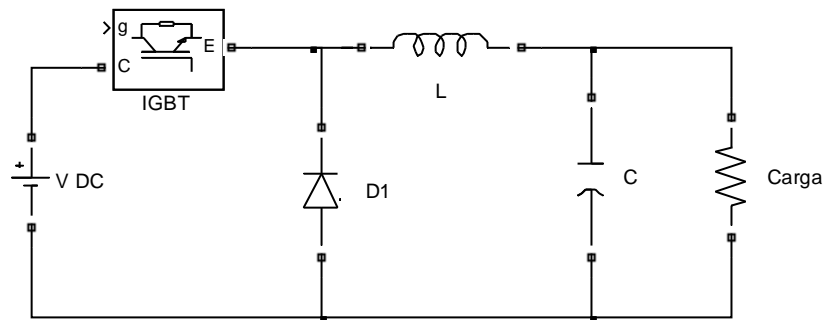
Un conversor de corriente directa a corriente directa es un dispositivo electrónico que recibe voltaje en corriente directa en su entrada y produce un voltaje también en corriente directa pero con un nivel diferente al nivel de entrada. Estos conversores son de gran utilidad pues a diferencia de la corriente alterna, en la cual se puede aumentar o disminuir fácilmente el nivel de tensión por medio de un transformador, con corriente directa el proceso es un poco más complejo. En muchas ocasiones el conversor de corriente directa a corriente directa es considerado como el transformador de corriente directa. En la figura 52 se muestra el símbolo utilizado para representar un conversor completo dentro de un diagrama.

En este capítulo se hará énfasis en dos tipos de conversores de corriente directa a corriente directa. El convertidor elevador y el convertidor reductor, ambos conversores llevan implícito en su nombre la principal función de cada uno de ellos.

#### 4.1 Conversor reductor de corriente directa a corriente directa

En el circuito de la figura 53 aparece un conversor de corriente directa a corriente directa que reduce el voltaje de entrada, al valor necesario que debe aplicarse a la carga, según sean las necesidades de la misma. El conversor está formado por seis dispositivos. Fuente de corriente directa, transistor IGBT, diodo, inductor, capacitor y carga.

**Figura 53. Circuito de un conversor reductor**



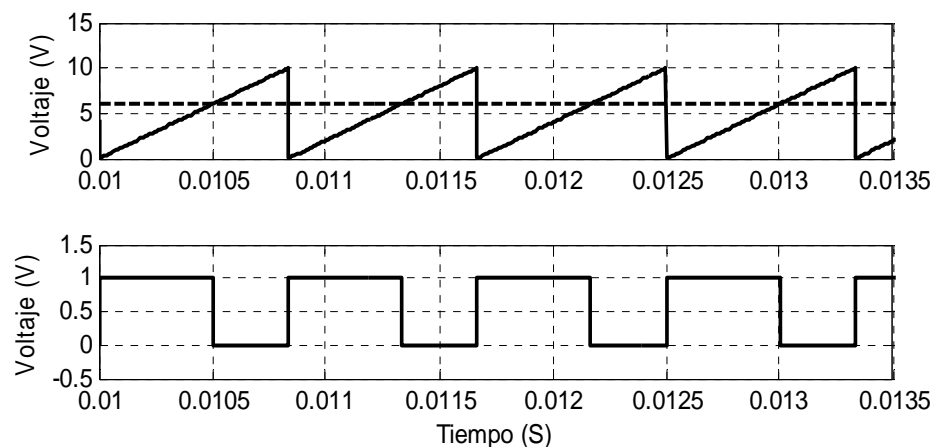
La fuente de corriente directa provee de la energía necesaria para el funcionamiento del conversor y la carga. El transistor IGBT realiza la función de un interruptor periódico, abriendo y cerrando el circuito para permitir y evitar el paso de corriente respectivamente. El diodo, en este tipo de circuitos, es conocido como diodo de corrida libre, entra a operar cuando el transistor desconecta el conversor de la fuente, permitiendo un camino para la circulación de la corriente almacenada en el conversor. El inductor permite acumular energía proveniente de la fuente. El capacitor debe reducir el rizado del voltaje antes de ser aplicado directamente a la carga.



El funcionamiento de este convertor es bastante simple. Existen dos etapas, la primera es cuando el transistor IGBT se encuentra en saturación y permite el paso de corriente hacia el circuito. La segunda etapa sucede cuando el transistor pasa a estado de corte e interrumpe la circulación de la corriente desde la fuente hacia el convertor. Es en este momento cuando comienza a operar el diodo de corrida libre, brindando un camino a la corriente para poder circular a través de los respectivos dispositivos.

Como en los convertidores anteriores el circuito de control es de elevada importancia, generalmente se pueden encontrar dos tipos de control, por variación de frecuencia y ciclo de trabajo constante o por frecuencia constante y variación de ciclo de trabajo. Para el modelo que sigue a continuación, se utilizará una frecuencia constante y un ciclo de trabajo variable. Esto se hará debido a que es el tipo de control más común en la actualidad, pues en convertidores reales un control con frecuencia variable requiere de un rango bastante extenso para lograr la regulación de voltaje, además de la necesidad de filtros más complejos para reducir la distorsión armónica.

**Figura 54. Creación de la señal de disparo en un convertidor reductor**



Una forma fácil de generar la señal de disparo para la compuerta de un transistor IGBT se describe a continuación. Debe generarse una onda diente de sierra y una señal para comparación, en este caso una señal continua, tal como se muestra en la figura 54. Tomar el resultado de la diferencia entre la señal continua y la diente de sierra, para luego obtener una forma de onda cuadrada, esta también es mostrada en la figura 54. Al variar el valor de la señal continua se podrá controlar el ciclo de trabajo de la onda cuadrada, controlando al mismo tiempo el funcionamiento del transistor IGBT.

Debido a que la compuerta y el emisor del transistor IGBT funcionan como un interruptor, este sigue la señal aplicada a la base. Con esto se logra aplicar una onda cuadrada, tal como se ve en la figura 54, a la carga. Al variar el tiempo en que la onda cuadrada es mayor que cero se puede definir este tiempo utilizando el ciclo de trabajo. De esta forma el tiempo en que el interruptor permanece cerrado es  $DT$  donde  $D$  es el ciclo de trabajo, tomando valores entre 0 y 1, y  $T$  es el período.

Al calcular el voltaje promedio obtenido por la acción del transistor IGBT se tiene que:

$$v_m = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = DV_s \quad (4.1)$$

$$v_m = \frac{1}{T} \int_{DT}^T 0 dt = 0 \quad (4.2)$$

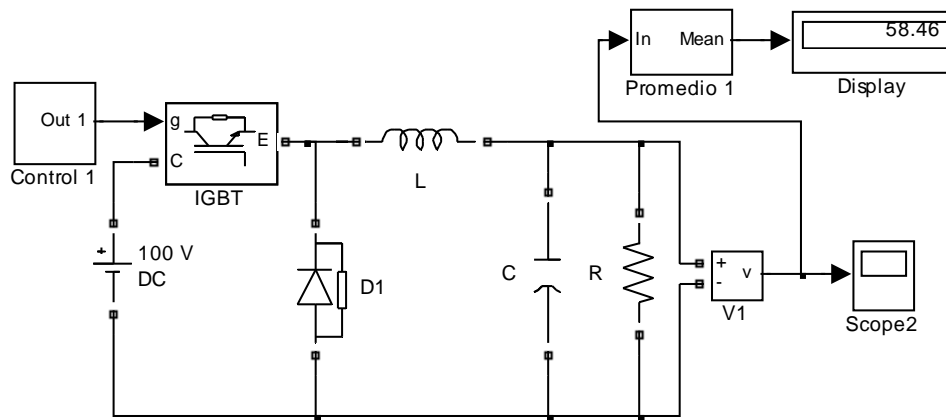
La suma del resultado obtenido al resolver las integrales 4.1 y 4.2 corresponde al valor promedio total de una onda cuadrado con ciclo de trabajo variable. El voltaje promedio queda expresado, de forma lineal, en función del ciclo de trabajo en la ecuación 4.3, donde  $D$  es el ciclo de trabajo y  $V_s$  es el voltaje de la fuente.

$$v_m = DV_s \quad (4.3)$$

#### 4.1.1 Modelo de un convertor reductor de corriente directa a corriente directa

Como se describió anteriormente un convertor reductor puede variar el valor promedio del voltaje aplicado a la carga, para obtener una fuente de alimentación regulable de corriente directa. En la figura 55 puede observarse el modelo de un convertor reductor listo para simularse en *Simulink*.

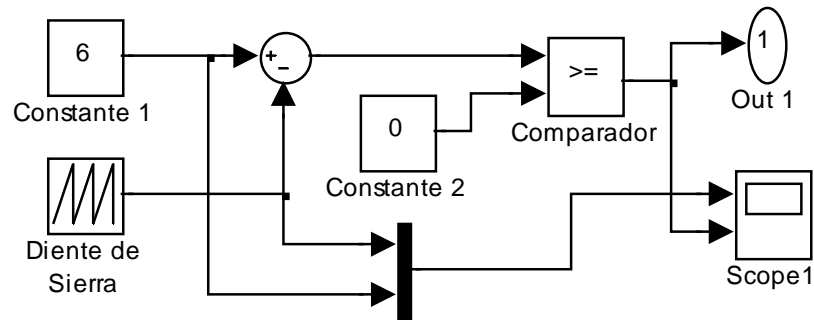
**Figura 55. Modelo de un convertor reductor de corriente directa a corriente directa**



Los valores de los componentes pasivos del circuito mostrado en la figura 55 son: inductancia: 75 milihenrios; capacitancia: 50 microfaradios; resistencia: 25 ohmios, esta resistencia funciona dentro del modelo como una carga. Después de simular el circuito por 0.025 segundos, el valor promedio del voltaje obtenido en la carga es de 59.39 voltios.

La razón por la cual en la carga se obtiene un valor promedio de 59.39 voltios, cuando la fuente es de 100 voltios se puede explicar al analizar el subsistema encerrado dentro del bloque Control 1. El contenido del subsistema Control 1 aparece en la figura 56.

**Figura 56. Subsistema Control 1**



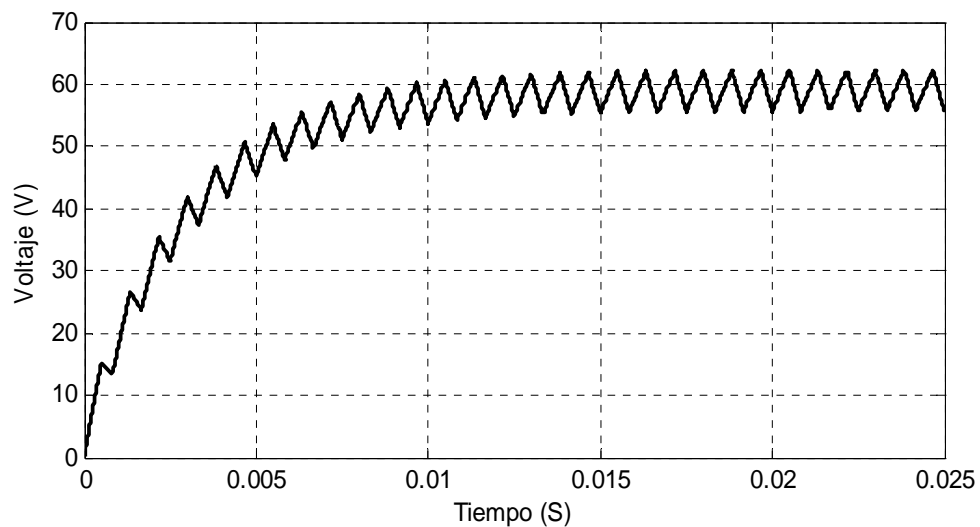
La señal diente de sierra es restada al valor de la constante 1, el resultado de esta operación pasa a través de un discriminador etiquetado como Comparador, si el resultado es mayor que cero emitirá una señal positiva, de lo contrario emitirá una señal igual a cero. Esta señal sale del subsistema a través de la terminal Out 1. La forma de onda obtenida del bloque visualizador Scope 1 aparece en la figura 54. Los parámetros de sus componentes son: amplitud de la onda diente de sierra igual a 10 voltios y frecuencia de 1200 hertzios; Constante 1: 6 voltios; Constante 2: 0 voltios. El valor de la Constante 1 define la duración del pulso de salida en valor alto, pudiendo variar entre 0 y 100%. Con un valor igual a 6 representa el 60% del valor de entrada.

Para este conversor se realizaron dos simulaciones utilizando *Simulink*. Las gráficas resultantes aparecen en las figuras 57 y 58. En la primera simulación no se incluye el capacitor de 50 microfaradios, ver figura 57. Mientras que en la segunda simulación sí se incluye el capacitor de 50 microfaradios, ver figura 58.

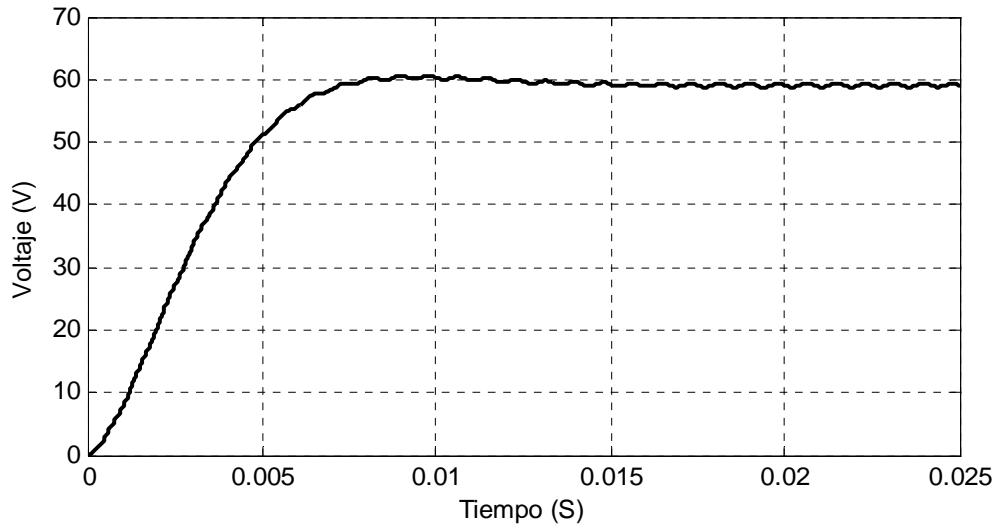
Al comparar ambas gráficas es bastante notorio cómo mejora la forma de onda del voltaje aplicado a la carga desde el conversor cuando en su salida existe un filtro. Por otro lado se puede apreciar claramente el comportamiento exponencial de la forma de onda, característico en los circuitos con resistencias e inductancias.

Para la simulación que no incluye el filtro en la salida, el voltaje promedio calculado por el bloque Promedio 1, colocado dentro del modelo, es de 58.46 voltios, y en la simulación que si incluye un filtro en la salida, el voltaje promedio es de 59.39 voltios.

**Figura 57. Gráfica de voltaje contra tiempo sin filtro en la salida**



**Figura 58. Gráfica de voltaje contra tiempo con filtro en la salida**



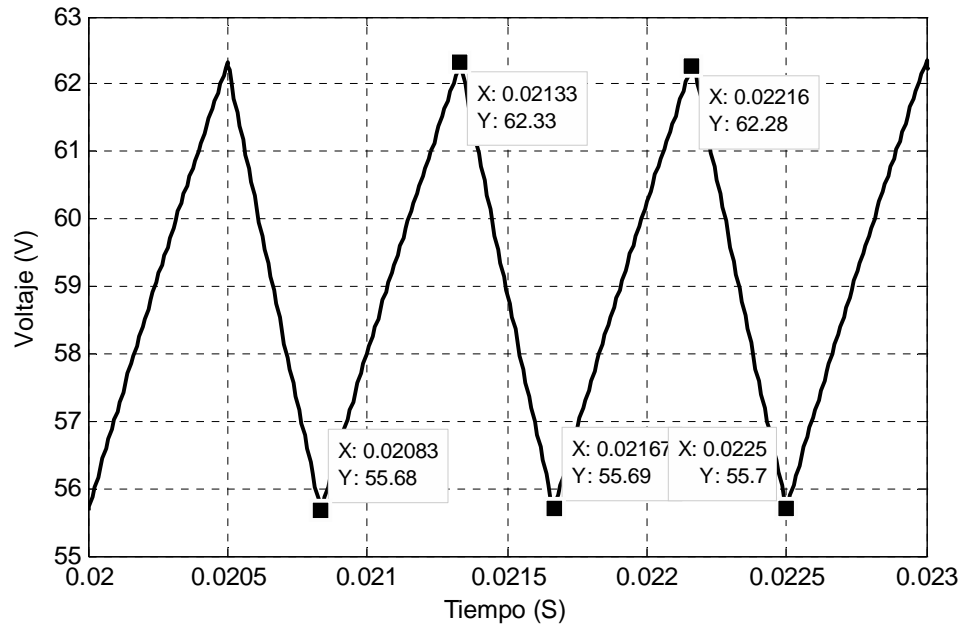
En la figura 59 se muestra una sección ampliada de la figura 57. Tanto el incremento como el decremento del voltaje pueden considerarse como lineales y periódicos. Al utilizar los valores mostrados en la figura 59, sabiendo que la frecuencia de operación es de 1200 hertzios, y el ciclo de trabajo es del 60% se pueden obtener las funciones que describen el voltaje. Estas funciones se muestran con las ecuaciones 4.4 y 4.5.

$$v(t) = 13300t + 55.68 \quad 0 < t < 0.6T \quad (4.4)$$

$$v(t) = -19950t + 72.239 \quad 0.6T < t < T \quad (4.5)$$

Donde  $T$  es el período de la función, para este caso el período es de  $1/1200$  segundos, y  $t$  es el tiempo en segundos.

**Figura 59. Sección ampliada de la figura 57**



Al calcular el valor promedio de las ecuaciones 4.4 y 4.5 se obtiene:

$$v_m = 1200 \int_0^{\frac{0.6}{1200}} 13300t + 55.68 dt = 35.403 \quad (4.6)$$

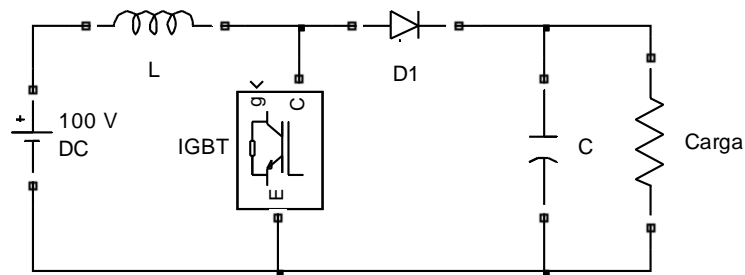
$$v_m = 1200 \int_{\frac{0.6}{1200}}^{\frac{1}{1200}} -19950t + 72.239 dt = 23.576 \quad (4.7)$$

Sumando los resultados obtenidos de las integrales 4.3 y 4.4 el voltaje promedio total es de 58.979 voltios, este es un valor muy cercano al mostrado por el bloque Promedio 1 en la figura 55, que es de 58.46 voltios.

## 4.2 Conversor elevador de corriente directa a corriente directa

Este tipo de convertidores utiliza los mismos componentes pasivos y activos que un conversor reductor de corriente directa a corriente directa, la diferencia está en la disposición de estos elementos dentro del circuito. El objetivo de este tipo de conversor es también diferente, pues en lugar de reducir el voltaje, tal como en el caso anterior, este conversor eleva el voltaje. La forma de elevar el voltaje se explica a continuación, utilizando el circuito de la figura 60. Dentro de esta figura aparecen los siguientes dispositivos, fuente de corriente directa, inductancia, capacitor, diodo, transistor IGBT y la carga representada por una resistencia.

**Figura 60. Circuito de un conversor elevador**



Para este conversor, su funcionamiento puede dividirse en dos etapas, la primera sucede cuando el transistor IGBT, que trabaja como un interruptor de potencia, se cierra dejando al capacitor y la carga separadas de la fuente de alimentación y solamente el inductor es conectado a dicha fuente. La segunda etapa corresponde al momento en que el transistor IGBT pasa a funcionar en corte y por lo tanto el diodo, capacitor y carga son alimentados por la energía almacenada en el inductor.



Durante la primera etapa el voltaje en el inductor es:

$$V_s = L \frac{di}{dt_1} \quad (4.8)$$

En la ecuación 4.9 aparece la razón de cambio de la corriente respecto al tiempo, partiendo de la ecuación 4.8.

$$\frac{di}{dt_1} = \frac{V_s}{L} \quad (4.9)$$

Debido a que  $V_s$ , el voltaje de la fuente, es positivo y constante la razón de cambio de la corriente será positiva y lineal. El cambio de corriente de la ecuación 4.9 también puede ser representada utilizando el ciclo de trabajo, tal como aparece en la ecuación 4.10.

$$\Delta I = \frac{V_s}{L} (DT) \quad (4.10)$$

En la segunda etapa del funcionamiento, el voltaje aplicado a la carga se muestra en la ecuación 4.11.

$$V_o = V_s + L \frac{di}{dt_2} \quad (4.11)$$

Representando de nuevo el cambio de corriente, utilizando la ecuación 4.11 y el ciclo de trabajo para la segunda etapa del funcionamiento se obtiene la ecuación 4.12.

$$\Delta I = \frac{V_s - V_o}{L} ((1-D)T) \quad (4.12)$$

El cambio de corriente representado en la ecuación 4.12 debe ser negativo para conservar el equilibrio en el funcionamiento del convertidor, esto se logra con un voltaje en la salida mayor al voltaje de la fuente, este es el principal propósito del capacitor conectado en la salida del convertidor. Para obtener una respuesta periódica el cambio neto de la corriente dentro de un ciclo completo, es decir durante un período, debe ser igual a cero, esto se logra sumando las ecuaciones 4.10 y 4.12.

$$\frac{V_s}{L}(DT) + \frac{V_s - V_o}{L}((1-D)T) = 0 \quad (4.13)$$

Utilizando un poco de álgebra sencilla se resuelve la ecuación 4.13 para encontrar el voltaje de salida del convertidor en función del ciclo de trabajo, el resultado está representado en la ecuación 4.14

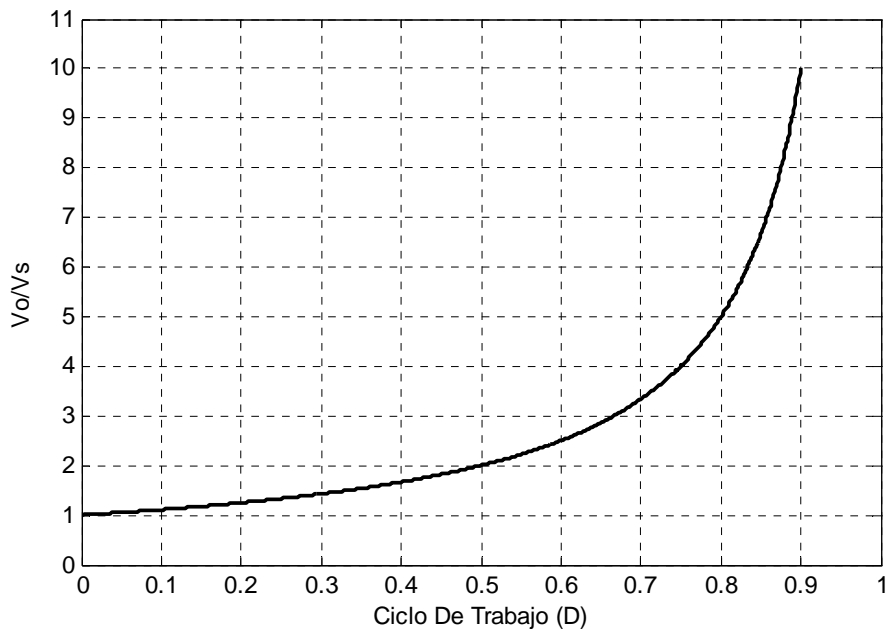
$$V_o = \frac{V_s}{(1-D)} \quad (4.14)$$

Al analizar la ecuación 4.14 teóricamente se pueden obtener voltajes que van desde valores iguales a los de la fuente hasta el infinito, en la práctica esto no es así, generalmente se trabaja con los valores D, mostrados por la desigualdad 4.15.

$$0.1 < D < 0.9 \quad (4.15)$$

En la figura 61 se muestra la gráfica de la función de transferencia de la ecuación 4.14. De esta gráfica se puede obtener información muy importante relacionada con el funcionamiento de este tipo de convertidores. Tomando como referencia la desigualdad 4.15, el aumento del voltaje en la salida del convertidor puede considerarse lineal para los valores del ciclo de trabajo que están dentro del rango 0.1 a 0.5, después del 0.5 la gráfica crece rápidamente, es en esta área donde muchos convertidores son sensibles e inestables a pequeños cambios en el ciclo de trabajo.

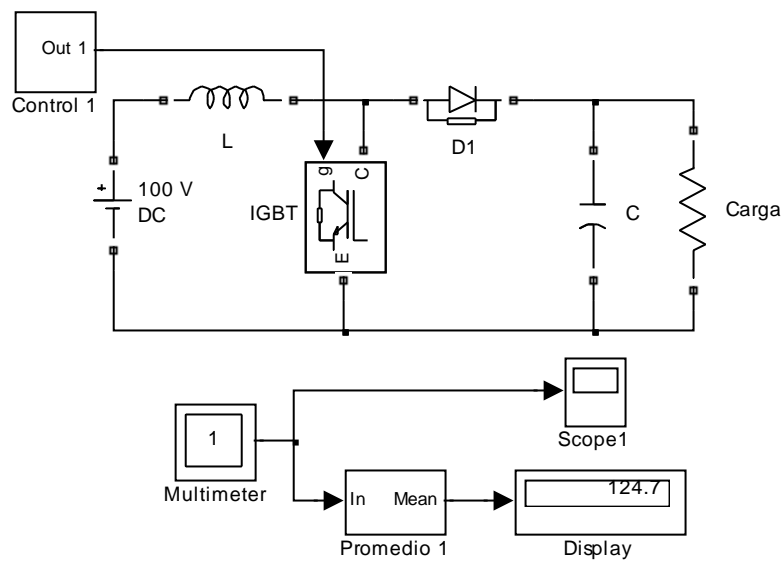
**Figura 61. Función de transferencia de ecuación 4.14**



#### 4.2.1 Modelo de un conversor elevador de corriente directa a corriente directa

Al comparar las figuras 55 y 62 se notará la similitud en el tipo y la cantidad de dispositivos utilizados para ambos modelos. Prácticamente el conversor elevador de voltaje utiliza los mismos elementos, pero estos se encuentran conectados de forma un tanto diferente, específicamente el inductor, el diodo de corrida libre y el transistor IGBT.

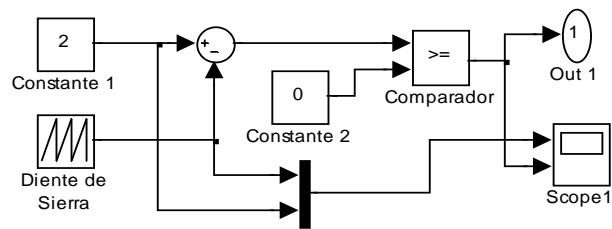
**Figura 62. Modelo de un conversor elevador de corriente directa a corriente directa**



Los valores de los componentes de la figura 62 son: inductancia: 60 milihenrios; capacitancia: 100 microfaradios; carga: 20 ohmios. La fuente de voltaje de corriente directa es de 100 voltios. El bloque Control 1 se encarga de activar y desactivar el transistor IGBT, por medio de los pulsos en la compuerta.

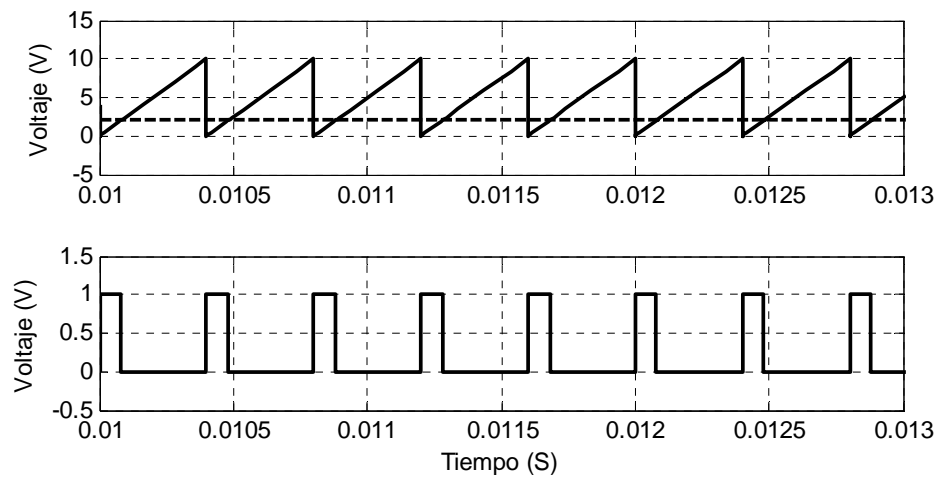
El subsistema Control 1 es el mismo que se utilizó en el convertor reductor de voltaje, pero para este caso se utilizó un ciclo de trabajo igual a 0.2 y una frecuencia de operación de 2500 hertzios, los elementos contenidos dentro del subsistema Control 1 son mostrados en la figura 63.

**Figura 63. Elementos del subsistema Control 1**



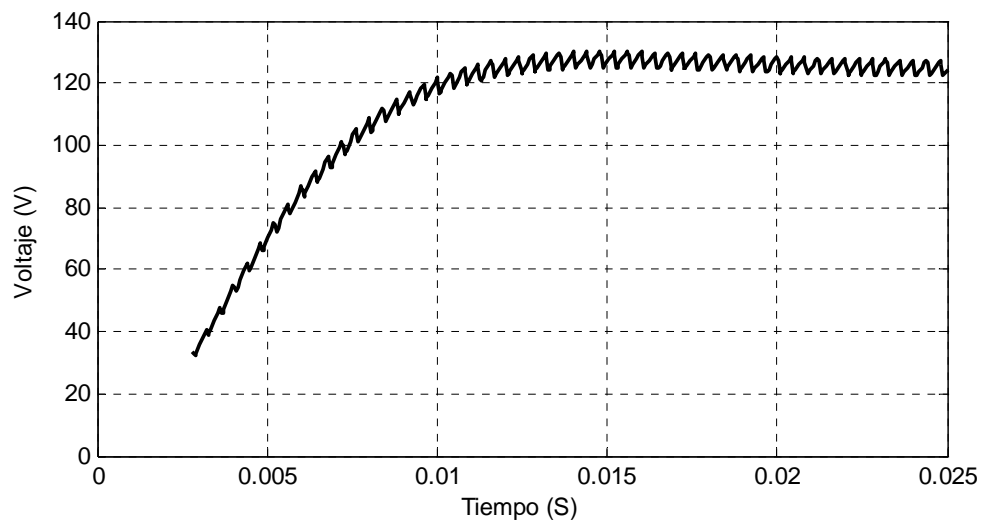
El bloque de visualización del subsistema Control 1 muestra la señal aplicada a la base del transistor IGBT, un segmento de esta señal aparece en la figura 64.

**Figura 64. Señal de salida del subsistema Control 1**



Después de simular el modelo de la figura 62 por 0.025 segundos, el voltaje aplicado a la carga es obtenido desde el bloque Multimeter para luego ser dirigido al bloque de visualización Scope 1 y el bloque Promedio 1. En el bloque Promedio 1, *Simulink* calcula el valor promedio de la forma de onda que recibe en su entrada y en su salida muestra el valor numérico correspondiente, utilizando el bloque Display. La forma de onda resultante, es graficada por el bloque Scope 1, el resultado obtenido por este bloque puede estudiarse a través de la figura 65.

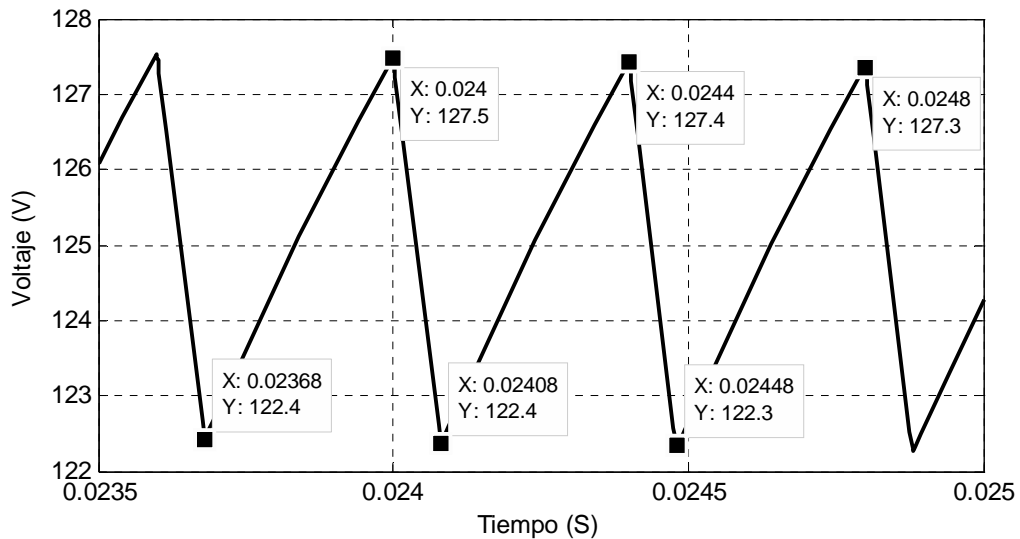
**Figura 65. Voltaje aplicado a la carga del modelo de la figura 62**



De igual forma que en el convertidor reductor, el voltaje crece de manera exponencial hasta alcanzar un valor estable, pero en este caso el valor promedio que se logra obtener es mayor al voltaje de la fuente, esto significa mayor a 100 voltios de corriente directa. Para calcular analíticamente el valor promedio del voltaje obtenido se hace una ampliación de la parte final de la gráfica mostrada en la figura 65.

Con los valores de la gráfica, mostrados en la figura 66, es posible obtener la función matemática que describe su comportamiento en estado estable y así calcular el valor promedio que se logra obtener en la salida del conversor elevador.

**Figura 66. Sección ampliada de la figura 65**



A continuación se encuentran las ecuaciones 4.16 y 4.17, utilizando estas ecuaciones se puede proseguir al cálculo del valor promedio del voltaje.

$$v(t) = 15935.5t - 261.375 \quad 0 < t < 0.8T \quad (4.16)$$

$$v(t) = -63750t + 1682.9 \quad 0 < t < 0.8T \quad (4.17)$$

Donde  $T$  es el período de la función, para este caso el período es de  $1/2500$  segundos, y  $t$  es el tiempo en segundos.

El cálculo del valor promedio se realiza a través de la resolución de las ecuaciones 4.18 y 4.19.

$$v_m = 2500 \int_0^{\frac{0.8}{2500}} 15935.5t + 122.4 dt = 99.96 \quad (4.18)$$

$$v_m = 2500 \int_{\frac{0.8}{2500}}^{\frac{1}{2500}} -63750t + 147.8 dt = 24.97 \quad (4.19)$$

Al sumar el resultado de las ecuaciones 4.18 y 4.19 se obtiene el valor promedio total, este es igual a 124.93 voltios, ahora se puede comparar este valor con el mostrado en la figura 62. En esta figura el bloque promedio arroja un valor de 124.7 voltios, siendo una cantidad muy cercana al valor calculado analíticamente utilizando las ecuaciones 4.16 y 4.17. Además si se toma en cuenta la ecuación 4.14, una fuente de voltaje de 100 voltios de corriente directa y un ciclo de trabajo igual al 20% el voltaje en la salida de este conversor debería ser de 125 voltios. Por esta razón la simulación ha generado el valor que se esperaba al definir el valor de la fuente de corriente directa y el ciclo de trabajo en la operación del transistor IGBT, según los datos anteriores.

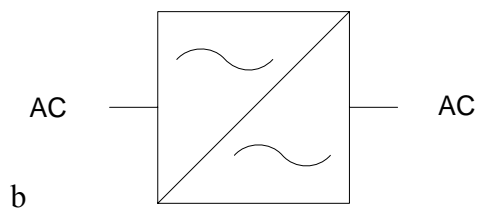


## 5 CONVERSORES DE CORRIENTE ALTERNA A CORRIENTE ALTERNA

Un conversor de corriente alterna a corriente alterna, en forma general, se puede describir como un dispositivo que recibe potencia eléctrica en forma de corriente alterna y en su salida es capaz de entregar también corriente alterna, pero con una forma de onda o una frecuencia diferente.

Los conversores de corriente alterna a corriente alterna utilizados para obtener un voltaje eficaz variable a través de la carga, pero con una frecuencia constante, se conocen como controladores de voltaje de corriente alterna. Para lograr este control en el voltaje se pueden utilizar dos métodos, control por ángulo de fase o control por encendido y apagado. La figura 67 muestra el símbolo de un conversor de corriente alterna a corriente alterna.

**Figura 67. Símbolo de un conversor de corriente alterna a corriente alterna**

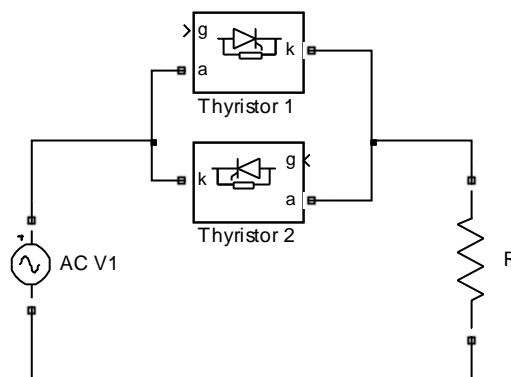


## 5.1 Controladores de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase

Este tipo de convertidores tienen una forma de operación muy parecida a los rectificadores controlados que fueron descritos en el capítulo 2. Con la diferencia que en este caso la corriente obtenida en la salida del convertidor es corriente alterna y no corriente directa.

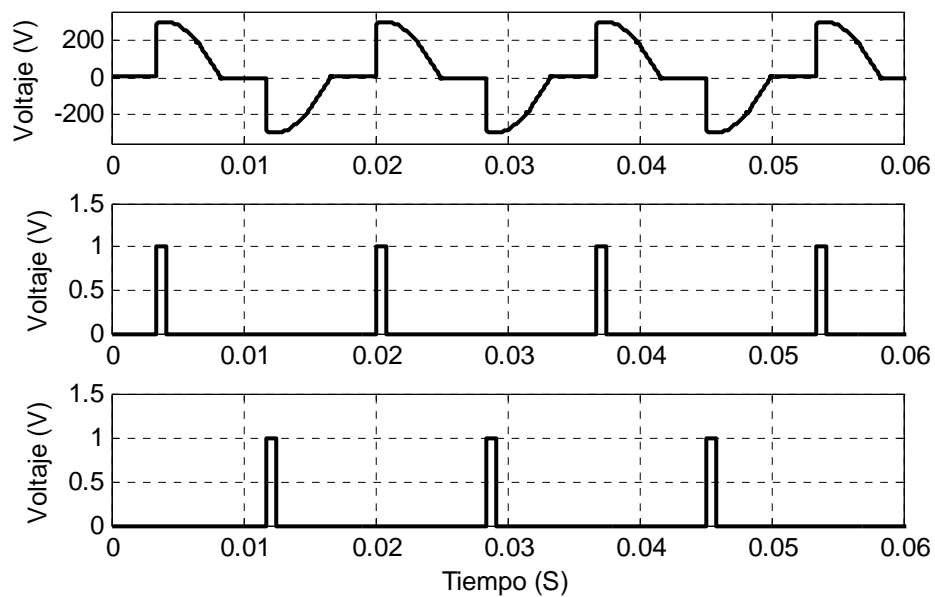
Un circuito sencillo, con control por ángulo de fase, se puede observar en la figura 68. El elemento principal dentro de este convertidor son los dos tiristores conectados en antiparalelo, con este tipo de conexión se logra transmitir hacia la carga, tanto los medios ciclos positivos como los medios ciclos negativos, pero teniendo control sobre la cantidad de voltaje transmitido en ambos medios ciclos a través del ángulo de disparo en cada tiristor. Aunque en la figura 68 no aparecen los circuitos generadores de los pulsos de disparo, estos serán explicados más adelante.

**Figura 68. Circuito de un controlador de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase**



El funcionamiento del circuito de la figura 68 se puede entender más fácilmente al estudiar las gráficas de la figura 69, en ellas se muestra el voltaje controlado que es aplicado a la carga, los pulsos de disparo para el tiristor 1 y los pulsos de disparo para el tiristor 2. El tiristor 1 se encarga de manejar los medios ciclos positivos y el tiristor 2 de los medios ciclos negativos, ambos tiristores poseen conmutación natural, es decir que interrumpen el flujo de corriente a través de ellos cuando esta pasa por valores iguales a cero.

**Figura 69. Voltaje aplicado a la carga, pulsos de disparo en el tiristor 1, pulsos de disparo en el tiristor 2**



Si el ángulo de disparo para el tiristor 1 es  $\alpha$ , con el objetivo de lograr una forma de onda simétrica, y evitar una componente de corriente directa, que genere saturación en las partes ferromagnéticas de las máquinas eléctricas, el pulso de disparo para el tiristor 2 debe ser  $\pi + \alpha$ .

La amplitud de los pulsos de disparo debe ser lo suficientemente alta para permitir que el tiristor comience a conducir la corriente a través de los mismos. Este nivel de tensión se maneja dentro de un rango de 2 a 3 voltios positivos. Además la frecuencia debe ser la misma que se esté utilizando en el sistema que se desea regular, en nuestro caso la frecuencia del sistema es de 60 hertzios, se necesita el uso de la misma frecuencia para que el ángulo de disparo comience a ser medido desde los cruces por cero de la corriente.

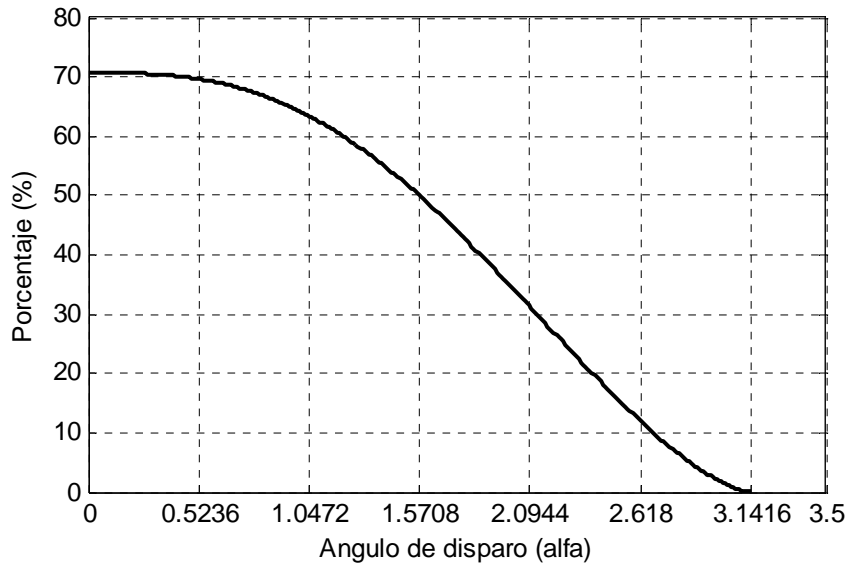
Por medio de la ecuación 5.1 se puede calcular el valor eficaz del voltaje que será aplicado a una carga cuando en un convertidor se controla el ángulo de fase. Debido a la simetría de la forma de onda resultante solo se necesita tomar en cuenta el primer medio ciclo y luego multiplicar por 2.

$$V_{rms} = \sqrt{2 \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (v_{\text{máx}} \text{sen}(\omega t))^2 d(\omega t)} \quad (5.1)$$

La ecuación 5.2 muestra el resultado obtenido al resolver la ecuación 5.1, aquí se muestra el voltaje eficaz en función del ángulo de disparo y el valor del voltaje máximo de la fuente. Esta misma ecuación es graficada utilizando *Matlab*, el resultado normalizado aparece en la figura 70.

$$V_{rms} = v_{\text{máx}} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4\pi}} \quad (5.2)$$

**Figura 70. Gráfica normalizada de la ecuación 5.2**



Al estudiar la ecuación 5.2 y su gráfica, se encuentra que el voltaje eficaz máximo que es posible alcanzar corresponde a un valor de  $\alpha$  igual a cero. Cuando  $\alpha$  es igual a cero el voltaje eficaz que se obtiene es 70.71 % del voltaje máximo, esto significa que se obtiene el 100 % del voltaje eficaz entregado por una fuente de corriente alterna senoidal, es decir, voltaje máximo dividido dentro de la raíz cuadrada de dos.

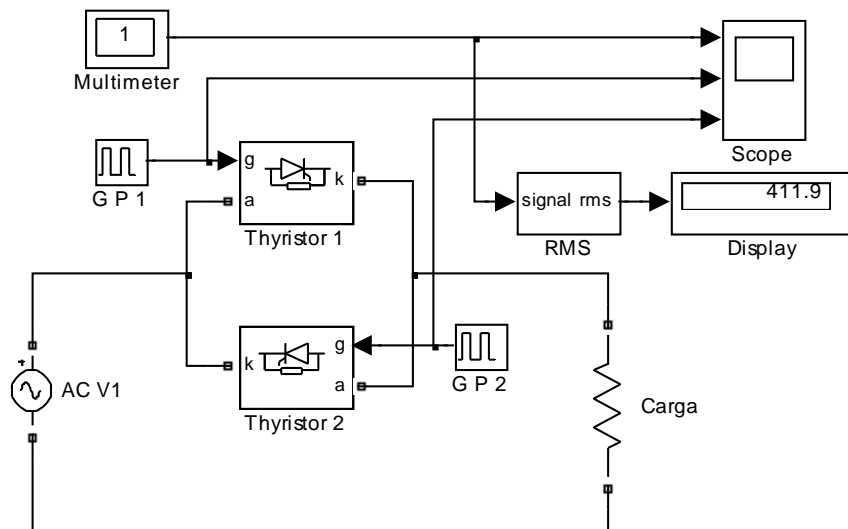
Después de haber definido el valor máximo, ahora corresponde describir el valor mínimo del voltaje eficaz, de acuerdo con la ecuación 5.2 y su gráfica el valor mínimo es cero, y este se obtiene cuando al ángulo de disparo  $\alpha$  se le asigna un valor igual a  $\pi$ . Esto significa que cada tiristor recibirá el pulso en su respectiva compuerta cuando la corriente a través de cátodo y el ánodo sea cero, bajo estas condiciones el tiristor no puede ser activado, y como consecuencia el voltaje resultante es cero.

### 5.1.1 Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase

El circuito completo para el control de voltaje de corriente alterna por medio del ángulo de fase que se usará en *Simulink* se muestra en la figura 71. Las características del circuito son las siguientes:

En la fuente de corriente alterna se tiene un voltaje pico de 650.54 voltios, es decir 460 voltios eficaces y una frecuencia de 60 hertzios, el tiristor 1 controla los semiciclos positivos, mientras que el tiristor 2 controla los semiciclos negativos, ambos tiristores son apagados por conmutación natural, la carga es netamente resistiva con un valor de 10 ohmios, el bloque Multimeter está midiendo el voltaje aplicado a la carga, su señal de salida es enviada al bloque visualizador y al bloque de cálculo del valor eficaz o RMS.

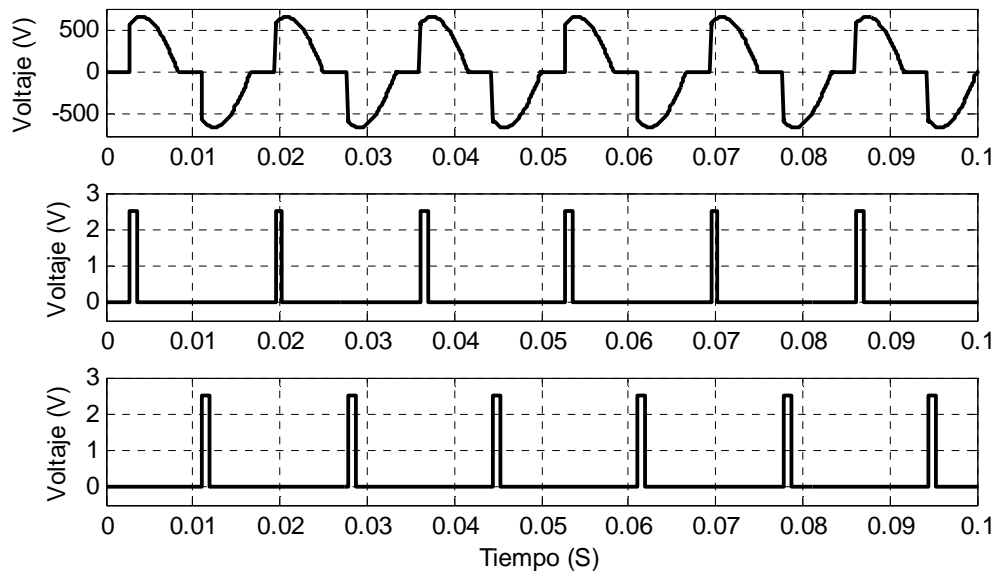
**Figura 71. Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por ángulo de fase**



GP1 y GP2 son los generadores de pulsos que envían las señales de disparo hacia las compuertas de los tiristores, el desfase entre las señales de GP1 y GP2 es igual a  $T/2$ , donde  $T$  es el período. El ángulo de retardo para la emisión de los pulsos en GP1 es igual a  $\alpha$ , y por consiguiente, el ángulo de retardo en GP2 será  $\pi + \alpha$ , el ángulo de disparo  $\alpha$  se comienza a contar desde que la corriente cruza por los puntos con valor cero.

Utilizando un tiempo de simulación igual a 100 milisegundos y un ángulo de disparo  $\alpha$  igual a  $\pi/3$ , se obtiene un valor eficaz del voltaje en la carga de 411.9 voltios, esta cantidad se muestra en el bloque Display de la figura 71. La gráfica resultante obtenida a través del bloque de visualización con tres entradas se presenta en la figura 72.

**Figura 72. Voltaje aplicado a la carga, pulsos de disparo en tiristor 1 y pulsos de disparo en tiristor 2**



El voltaje aplicado a la carga de 10 ohmios ya no es continuo. Como se puede apreciar en la figura 72, debido a las discontinuidades presentadas en la forma de onda resultante, el voltaje eficaz se verá reducido. Esta discontinuidad periódica, que aparece como pequeños intervalos donde el voltaje es cero, se debe principalmente al ángulo de retraso existente en los pulsos de disparo en el tiristor 1 y el tiristor 2.

Tomando la ecuación 5.2 para sustituir en ella el voltaje máximo por 650.54 voltios y el ángulo de retraso de disparo en los tiristores  $\alpha$  por  $\pi/3$  se obtiene:

$$V_{rms} = 650.54 \sqrt{\frac{\pi - \frac{\pi}{3}}{2\pi} + \frac{\text{sen}(2\frac{\pi}{3})}{4\pi}} \quad (5.3)$$

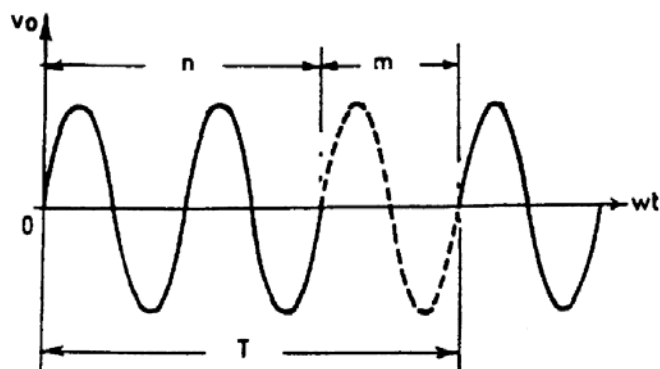
Resolviendo la ecuación 5.3 es posible encontrar el valor numérico del voltaje eficaz aplicado a la carga del circuito mostrado en la figura 71, este valor es igual a 412.59 voltios, obviamente es un valor menor al voltaje eficaz generado por la fuente de corriente alterna (460 voltios). Dentro de la figura 71 también se encuentra el voltaje eficaz calculado por el bloque RMS, este bloque despliega un valor de 411.9 voltios, siendo este muy cercano al obtenido a través de la ecuación 5.3, la diferencia se genera por los parámetros internos de cada tiristor, aunque dentro del modelo se ha intentado realizar la simulación con las aproximaciones necesarias para lograr que los tiristores se comportaran como elementos ideales.



## 5.2 Controladores de voltaje de corriente alterna por encendido y apagado

Este controlador utiliza un principio de funcionamiento diferente al explicado anteriormente para manejar el voltaje aplicado a la carga, el método también se conoce como control de ciclos completos. Para este caso, el interruptor es encendido durante un tiempo  $t_n$ , permitiendo el paso desde la fuente a la carga de  $n$  ciclos completos, luego se apaga el interruptor por un tiempo  $t_m$  limitando el paso de  $m$  ciclos completos durante este tiempo. La figura 71 ayuda a visualizar los diferentes tiempos y ciclos completos mencionados anteriormente.

**Figura 73. Ciclos completos que son permitidos ( $n$ ) y anulados ( $m$ ) por el interruptor**



Como el interruptor utilizado en este tipo de convertidores debe ser encendido y apagado exactamente en los puntos donde la onda de voltaje cruza el eje horizontal, las componentes armónicas y las posibles interferencias que puede generar el convertidor son muy bajas.

Con una fuente de corriente alterna y voltaje senoidal, representada por  $v_s = v_{\max} \text{sen}(\omega t)$ , Además de utilizar dos tiristores conectados en antiparalelo, para conducir y cortar la corriente desde la fuente hacia la carga. El voltaje eficaz controlado que se obtiene en la salida del conversor viene dado por:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} (v_{\max} \text{sen}(\omega t))^2 d(\omega t)} \quad (5.4)$$

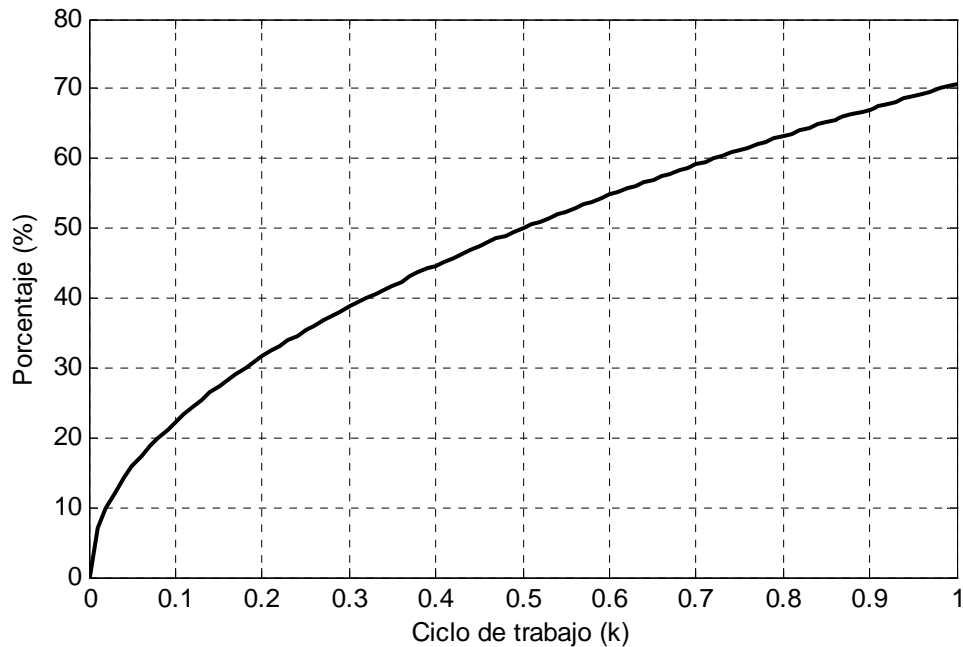
Con la ecuación 5.5 se presenta la solución de la ecuación 5.4:

$$V_{RMS} = v_{\max} \sqrt{\frac{n}{2(n+m)}} \quad (5.5)$$

$$V_{RMS} = \frac{v_{\max}}{\sqrt{2}} \sqrt{k} \quad (5.6)$$

El voltaje eficaz representado en la ecuación 5.5 queda en función de la cantidad de ciclos a los cuales se les ha permitido el paso hacia la carga (n) y la cantidad de los que no se les ha permitido el paso (m). Muchas veces el voltaje de salida se representa con la ecuación 5.6, para este caso k es un término comúnmente utilizado en la generación de ondas cuadradas, este es conocido como ciclo de trabajo. Este ciclo no es más que el resultado de dividir el tiempo de encendido dentro del período de la onda. Para nuestro caso en lugar de utilizar tiempos se usará la cantidad de ciclos completos permitidos y no permitidos. Otra característica importante es que la raíz cuadrada del ciclo de trabajo está modificando el valor del voltaje eficaz que la fuente de energía es capaz de entregar en sus terminales. Esto se puede apreciar de mejor manera en la gráfica de la figura 74, donde aparece el comportamiento del voltaje máximo cuando se hace variar k desde 0 hasta 1.

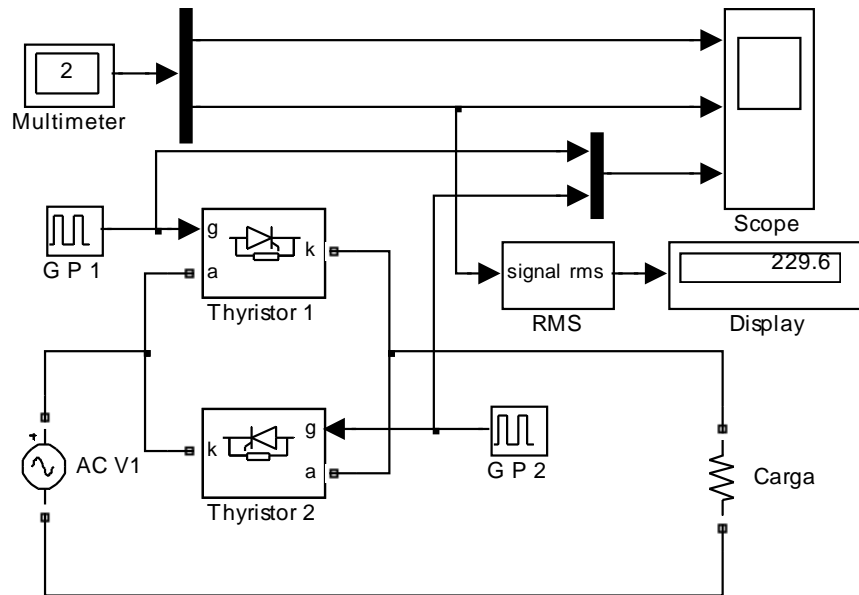
**Figura 74. Porcentaje del voltaje máximo contra el ciclo de trabajo**



### **5.2.1 Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por encendido y apagado**

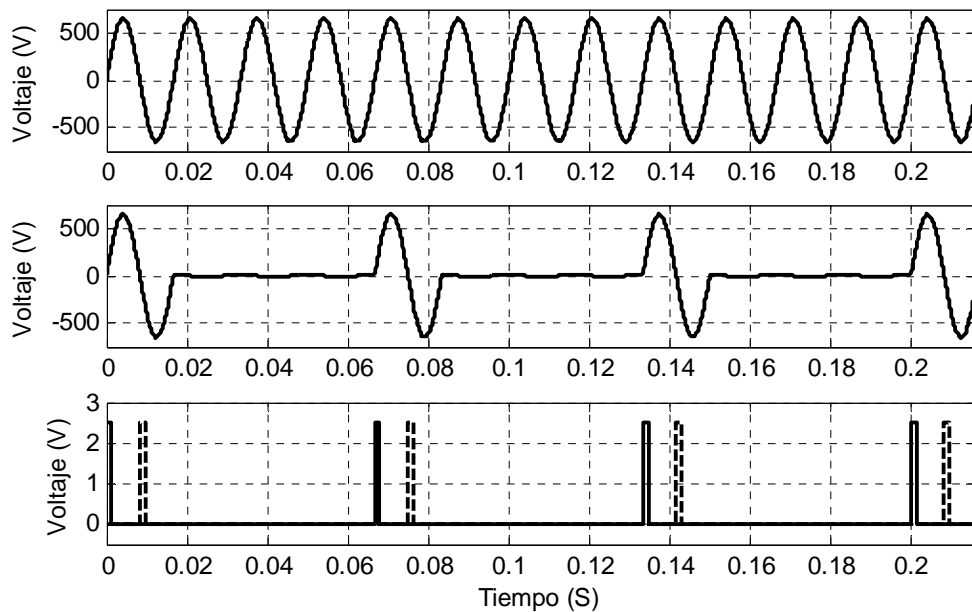
El modelo de este controlador se puede observar en la figura 75, los principales elementos y sus características son: una fuente de voltaje de corriente alterna con un valor eficaz de 460 voltios, el tiristor 1 y tiristor 2 conectados en antiparalelo, ambos se encargan de dar paso a la corriente o bloquearla siguiendo las señales aplicadas en sus respectivas compuertas. El tiristor 1 maneja los semiciclos positivos, y el tiristor 2 maneja los semiciclos negativos. La resistencia tiene un valor de 10 ohmios y representa la carga que recibe el voltaje regulado. GP1 y GP2 producen los pulsos de disparo necesarios para los tiristores 1 y 2 respectivamente, en esta ocasión la frecuencia de cada generador de pulsos ya no debe ser igual a la frecuencia nominal del sistema, más adelante se explicará el por qué.

**Figura 75. Modelo de un controlador de voltaje de corriente alterna por encendido y apagado**



Los demás componentes de la figura 75 ya se han descrito anteriormente, solamente dentro del bloque RMS se debe efectuar un pequeño cambio, pero muy importante. Este bloque calcula el valor eficaz de la señal aplicada en su entrada teniendo como base una frecuencia fundamental que el usuario puede definir. En esta simulación se permitirá el paso de un ciclo completo, para luego bloquear los tres ciclos siguientes, y de nuevo se repetirá la secuencia, permitir el paso de un ciclo y bloquear los tres ciclos siguientes.

**Figura 76. Voltaje entregado por la fuente de corriente alterna, voltaje aplicado a la carga, pulsos de disparo para el tiristor 1 y el tiristor 2.**



Después de simular el modelo de la figura 75 por 220 milisegundos las gráficas resultantes son expuestas en la figura 76, las curvas mostradas en la figura corresponden al voltaje entregado por la fuente de corriente alterna, el voltaje aplicado a la carga y los pulsos de disparo para el tiristor 1 y tiristor 2.

Como se describió anteriormente este conversor solo permite el paso de un ciclo completo para luego bloquear los tres ciclos que le suceden, después se repite de nuevo todo el proceso. Observando la figura 76 se puede comprender de mejor manera todo el funcionamiento que se está describiendo. Aunque la frecuencia de la fuente de voltaje es 60 hertzios, la frecuencia de la onda resultante es de 15 hertzios. Esta nueva frecuencia es el resultado de incluir cuatro ciclos completos dentro de la onda resultante, aún cuando solamente un ciclo está contribuyendo directamente con la carga.

Los 15 hertzios explicados anteriormente deben ser la frecuencia que se utilice en los generadores de pulsos, y por consiguiente, la frecuencia fundamental que necesita el bloque RMS para poder realizar el cálculo del voltaje eficaz. El generador de pulsos 2 o GP2 tiene un ángulo de desfase igual a  $\pi$  con respecto al generador de pulsos 1. El objetivo de este desfase es permitir el paso de la corriente negativa, exactamente en el momento que la corriente pasa de cero a un valor negativo, logrando así un ciclo completo y continuo.

Regresando a la figura 73, en este tipo de convertidores existen dos parámetros que modificarán el voltaje eficaz resultante, estos son, la cantidad de ciclos completos a los cuales se les permite el paso hacia la carga (n) y la cantidad a los cuales no se les permite el paso (m). Partiendo de esta característica, el modelo de la figura 75, que ya ha sido simulado y sus resultados ya fueron presentados en la figura 76, tiene un valor n igual a 1 y m igual a 3. Conociendo estos valores y un voltaje máximo igual a 650.54 voltios, ahora se puede calcular analíticamente el voltaje eficaz que el convertidor debería estar aplicando a la carga, para lograr esto, se recurre a la ecuación 5.5:

$$V_{RMS} = 650.54 \sqrt{\frac{1}{2(1+3)}} \quad (5.7)$$

Resolviendo la ecuación 5.7 se encuentra un voltaje eficaz aplicado a la carga igual 230 voltios. Este resultado también puede verse confirmado a través de la figura 75, donde el bloque RMS muestra un voltaje igual a 229.6 voltios, siendo este calculado por *Simulink* durante el proceso de simulación.

## 6 APLICACIONES

### 6.1 Conversores para el control de máquinas

Los conversores eléctricos para el control de máquinas eléctricas son de suma importancia en las diferentes aplicaciones industriales. Algunos ejemplos que se pueden mencionar son: molinos utilizados en la producción de cemento o papel, bombas para circulación de agua, combustible o desechos, compresores que permiten desplazar gases a través de los respectivos circuitos, propulsión de trenes subterráneos, etc.

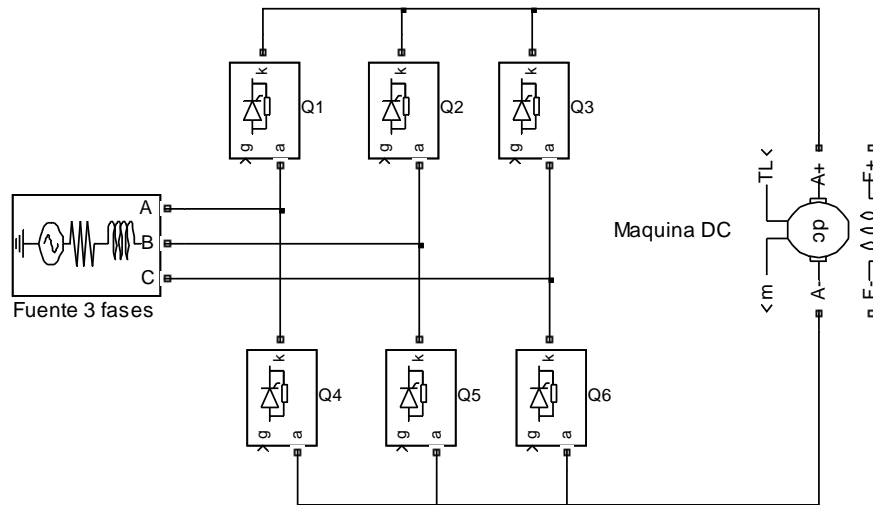
Los conversores normalmente proveen un voltaje variable en la conversión de corriente directa a corriente directa para el control de motores de corriente directa. Mientras un conversor de corriente alterna a corriente alterna puede proporcionar un voltaje variable y una frecuencia variable para el control de un motor de corriente alterna. Al utilizar interruptores de potencia basados en dispositivos semiconductores, se alcanzan altos niveles de eficiencia en la conversión.

Las variables controladas con mayor frecuencia en una máquina son el torque, velocidad o posición, aunque también puede ser usado como un arrancador suave en máquinas que así lo requieran debido a su alto consumo de corriente durante el arranque.

### 6.1.1 Conversor para el control de máquinas de corriente directa

La velocidad de un motor de corriente directa puede ser controlada por la manipulación del voltaje aplicado en las terminales de la armadura. Un conversor con control de fase en tiristores, es capaz de brindar esta fuente de voltaje variable. La figura 77 muestra el esquema de un conversor trifásico que alimenta un motor de corriente continua. La máquina puede ser de imán permanente o poseer un campo del tipo devanado. Las máquinas de campo devanado permitirán una variación e incluso la inversión del sentido en el campo, por esta razón este tipo de máquinas se usa cuando se requiere alta potencia.

**Figura 77. Esquema de un conversor trifásico con tiristores para el control de una máquina de corriente directa.**



El conversor de la figura 77 utiliza un puente de tiristores trifásico. El conversor rectifica la corriente alterna proporcionada por la fuente, obteniendo un voltaje variable de corriente directa controlando el ángulo de disparo en la compuerta de los tiristores. La velocidad máxima será obtenida cuando el ángulo de disparo sea igual a cero.



A cualquier velocidad de operación, la polaridad del campo puede ser invertida para obtener un frenado regenerativo. En este modo de operación el motor funciona como un generador, debido al voltaje negativo que es inducido, y el puente rectificador pasa a convertirse en un inversor, de esta manera la energía mecánica almacenada en la inercia es convertida en energía eléctrica y dirigida hacia la fuente. La velocidad de la máquina puede ser controlada con precisión por la retroalimentación de lazo cerrado, donde la velocidad de referencia es comparada a través de la medición realizada por un tacómetro.

### **6.1.2 Conversor para el control de máquinas de corriente alterna**

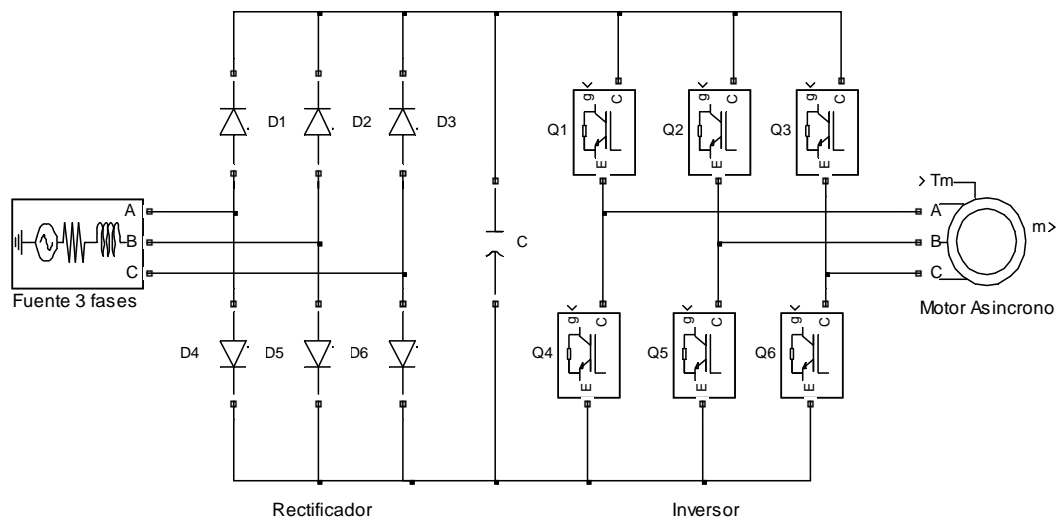
Aunque las aplicaciones de un controlador de máquinas de corriente continua son bastante comunes, estos motores tienen una limitante, su tamaño, precio y el mantenimiento frecuente requerido en las escobillas y el conmutador. De hecho las chispas producidas entre el conmutador y las escobillas también limitan su uso a lugares donde no existan gases inflamables.

Por otro lado las máquinas de corriente alterna, particularmente las de rotor tipo jaula de ardilla, tienen ventajas y un desempeño mucho más favorable que las máquinas de corriente directa. Pero una limitante que se puede encontrar es que el sistema de conversión, control y el procesamiento de señal, en controladores de corriente alterna es bastante complicado.

La evolución de la tecnología de estos controladores en las últimas dos décadas ha permitido el desarrollo de dispositivos más eficientes y económicos. Conllevando una expansión en sus aplicaciones y haciendo obsoletos los controladores de corriente directa.

Un sistema muy simple y popular para el control de la velocidad en un motor de inducción se muestra en la figura 78. El rectificador conectado en configuración puente convierte la corriente alterna de 60 o 50 hertzios en corriente directa, la cual pasa a través de un filtro para eliminar el rizado. Luego el voltaje de corriente directa es convertido a corriente alterna con una frecuencia y voltaje variable por medio de un inversor con modulación de ancho de pulso, para ser aplicado a la máquina de inducción.

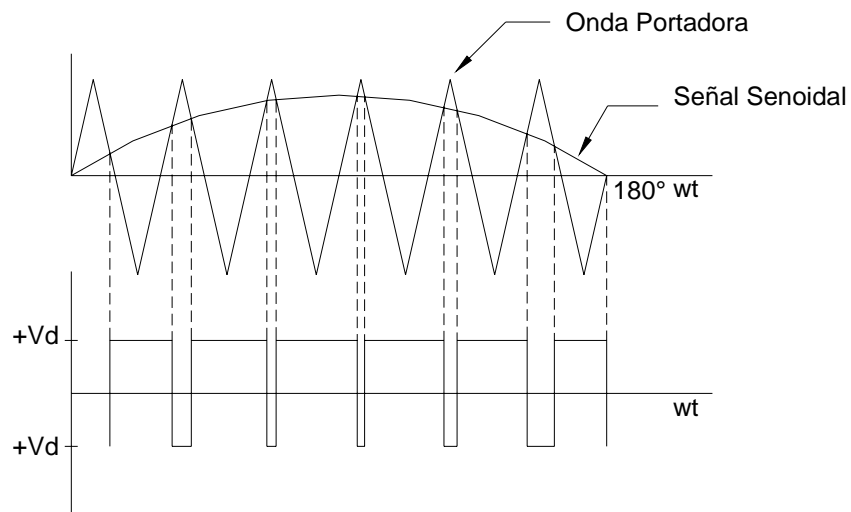
**Figura 78. Rectificador e inversor para el control de un motor de inducción**



Existen diferentes formas de obtener la modulación de ancho de pulso, pero en aplicaciones industriales se prefiere utilizar la modulación de ancho de pulso senoidal. Esta consiste en variar el ancho de cada pulso en proporción directa con la amplitud de una onda senoidal. Con esta técnica se reduce el factor de distorsión y la distorsión armónica total.

Las señales de control, como se ven en la figura 79, se generan comparando una señal senoidal de referencia con una onda portadora triangular. La frecuencia de la señal senoidal de referencia determina la frecuencia de la salida del inversor, y su amplitud pico controla el índice de modulación, y en consecuencia el voltaje eficaz de la salida. La relación entre voltaje y frecuencia debe mantenerse constante para producir un flujo también constante en el entrehierro de la máquina y mantener su operación dentro de los rangos aceptables.

**Figura 79. Señal senoidal de referencia y señal portadora para modulación por ancho de pulso**



## **6.2 Generación eólica**

Los sistemas de energía eólica están siendo desarrollados hacia una capacidad cada vez más grande. Por ejemplo, una planeación energética ambiciosa en Dinamarca ha programado un nivel del 50% de penetración de la energía eólica para el año 2030, específicamente cubierta por enormes parques eólicos instalados a lo largo de la costa. Estos parques representarán una contribución significativa a la red, por lo tanto, tendrán un papel muy importante en la calidad de la energía y el control de sistemas de potencia. Como consecuencia directa, habrá un incremento en la demanda de alta tecnología para satisfacer las demandas de estas unidades de producción de energía renovable.

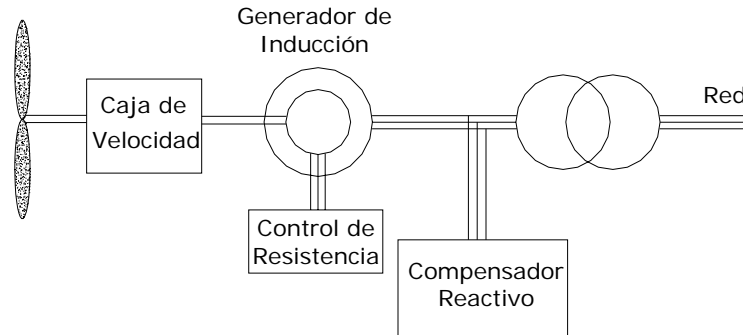
Las principales variables a controlar son frecuencia, voltaje, potencia activa, potencia reactiva y respuesta a transitorios y situaciones dinámicas dentro del sistema de potencia. La electrónica de potencia es de nuevo una parte importante en la configuración y el control de los parques eólicos para cumplir con las nuevas exigencias planteadas. Estos parques pueden ser conectados en diferentes formas y configuraciones, con varios arreglos para el control y la compensación.

El desarrollo de sistemas para turbinas eólicas ha sido constante por los últimos 25 años, dando lugar en la actualidad a la existencia de cuatro o cinco generaciones de turbinas eólicas. En esta sección se describirán básicamente dos categorías, los sistemas con un nivel parcial de electrónica de potencia y los sistemas completamente basados en electrónica de potencia.

### 6.2.1 Sistemas eólicos con un nivel parcial de electrónica de potencia

Estos sistemas eólicos tienen un mejor control, para obtener mayor rendimiento. La figura 80 representa una turbina eólica donde la energía se produce a través de un generador de inducción con rotor devanado. Las resistencias extra que son añadidas al rotor son controladas por un sistema electrónico de potencia, lo que provee de una amplitud en el rango de la velocidad de un 2 a 4%. El convertor que controla las resistencias del rotor es para un bajo voltaje pero alta corriente. Con la amplitud de la variación de velocidad, se obtiene más libertad de control a mayores velocidades del viento, con el objetivo de mantener una salida de potencia constante.

**Figura 80. Turbina eólica con generador de inducción con rotor devanado**

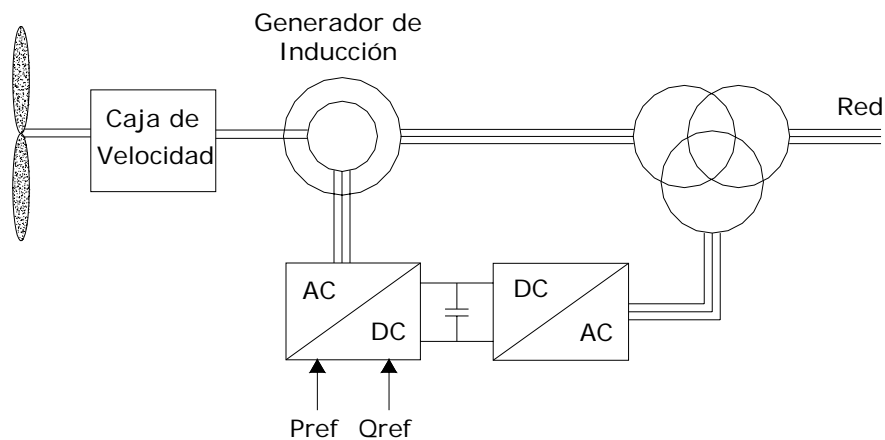


Otra opción posible para un sistema eólico con un nivel parcial de electrónica de potencia, con un generador de inducción con rotor devanado, tiene un convertor de potencia conectado al rotor a través de anillos rozantes para controlar la corriente del rotor. Si el generador está siendo movido a velocidades mayores que la velocidad sincrónica, la potencia eléctrica es entregada a través del rotor y el estator. Pero si el generador gira a velocidades inferiores que la velocidad sincrónica la potencia eléctrica solamente es absorbida desde la red hacia el rotor de la máquina.

Utilizando un conversor de potencia con un consumo del 30% de la potencia nominal, se puede alcanzar una variación de la velocidad sincrónica de aproximadamente un 60%. Pero la potencia requerida por el conversor puede ser mayor dependiendo de la capacidad de respuesta ante fallas y el control de potencia reactiva, lo cual brinda un mejor desempeño de la red.

Esta configuración es naturalmente más cara que la descrita anteriormente, pero se pueden obtener ahorros con una caja de velocidad más sencilla debido al control de velocidad. Debido a la producción y compensación de potencia reactiva habrá más energía capturada del viento. Este esquema es mostrado en la figura 81.

**Figura 81. Turbina eólica con generador de inducción con rotor devanado y convertidor conectado al rotor**

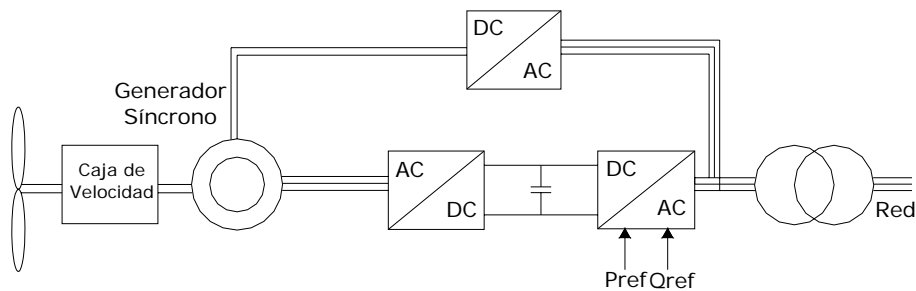


## 6.2.2 Sistemas eólicos completamente basados en electrónica de potencia

En esta categoría es necesaria la instalación de convertidores de potencia entre el generador y la red, pero esto implica un aumento de las pérdidas en la conversión de energía. A pesar del incremento de las pérdidas, el uso de equipo electrónico agrega un mejor rendimiento técnico del generador.

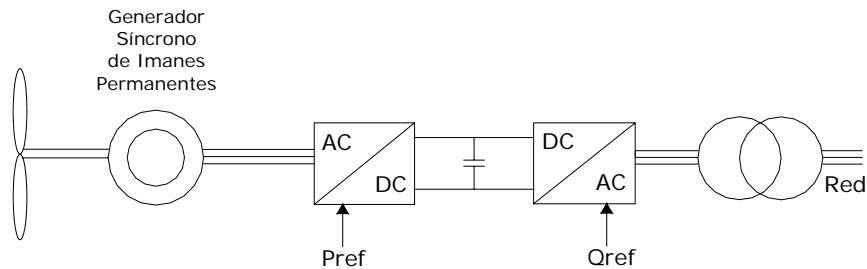
La solución representada en la figura 82, tiene como característica general el uso de una caja de velocidad. El generador síncrono necesita de un pequeño convertidor de corriente alterna a corriente directa para la excitación del campo.

**Figura 82. Generador síncrono con caja de velocidad**



Un sistema de generación multipolo, con un generador síncrono y sin caja de velocidad, es mostrado en la figura 83. Aquí se utilizan imanes permanentes para la producción del campo de excitación, aprovechando el hecho que en la actualidad estos elementos están bajando de precio.

**Figura 83. Generador síncrono sin caja de velocidad**



Los sistemas descritos anteriormente tienen el mismo nivel de control, debido a que el generador está aislado de la red por medio del enlace de corriente directa. Así, estos convertidores proveen a la red un rápido control de las potencias activa y reactiva. Por otro lado, el aspecto negativo, es la obtención de sistemas más complejos con la presencia de partes electrónicas de mayor sensibilidad a las condiciones de operación. Aunque el control sea más rápido y eficiente la generación de potencia activa dependerá de la disponibilidad de viento en el lugar, pero se puede aprovechar la generación de potencia reactiva para la compensación de la red del sistema de potencia.

### **6.3 Celdas de combustible**

Una celda de combustible es un dispositivo químico capaz de producir electricidad de forma directa, sin ninguna etapa intermedia. Sus mayores ventajas son la baja emisión de gases de efecto invernadero y la alta densidad de energía. Por ejemplo, una celda de combustible de hidrógeno solo emite gases no nocivos y agua, además de una baja emisión de ruido. La densidad de estas celdas es de 200 vatios-hora/litro, lo que equivale a diez veces la densidad de una batería convencional.

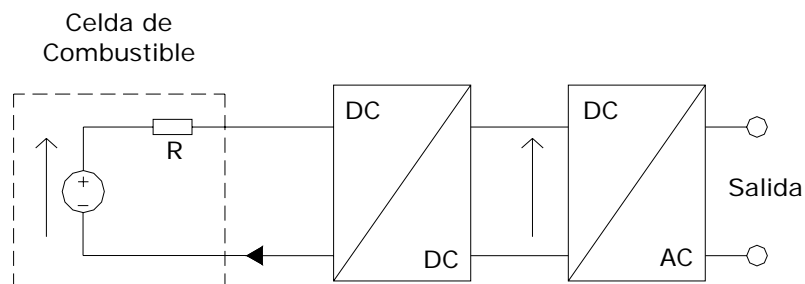


La eficiencia de una celda de combustible es bastante buena, entre 40 y 60%. Si a esto se agrega que el calor generado por el proceso puede ser usado para cogeneración con vapor o para calefacción, la eficiencia puede aumentar hasta un 80%. Aunque el voltaje de una celda de combustible es pequeño, con un valor máximo en teoría de 1.2 voltios, las celdas pueden ser conectadas en paralelo y/o serie para alcanzar los requerimientos de voltaje y potencia.

Las condiciones de la producción de energía por celdas de combustible, requieren el uso de inversores y convertidores de corriente directa a corriente directa, para poder satisfacer las demandas de potencia de los consumidores o para introducir la energía generada en la red.

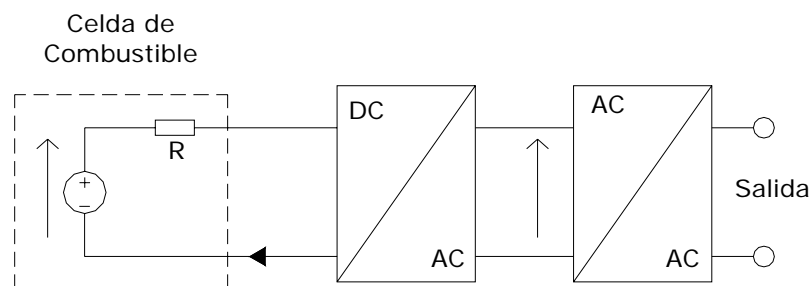
Los elementos necesarios para la producción de energía eléctrica por medio de celdas de combustible a menudo consisten en un convertidor de corriente directa a corriente directa y un inversor, como el mostrado en la figura 84. El convertidor de corriente directa a corriente directa es utilizado para aislamiento e incremento del voltaje producido por el generador, mientras que el inversor provee la corriente alterna necesaria en la salida.

**Figura 84. Celda de combustible con un convertidor de corriente directa a corriente directa y un inversor**



Otra configuración posible para este tipo de sistemas incluye un inversor que produce un voltaje de corriente alterna a alta frecuencia, luego un convertidor de corriente alterna a corriente alterna o cicloconvertidor es utilizado para bajar la frecuencia al valor nominal de la red. El esquema correspondiente aparece en la figura 85.

**Figura 85. Celda de combustible con un inversor y un convertidor de corriente alterna a corriente alterna**



Si se requiere de aislamiento en la conversión de voltaje, es común instalar un transformador dentro del sistema. Este transformador generalmente se instala en la sección de alta frecuencia del circuito, debido a que un transformador de baja frecuencia es más caro y voluminoso.

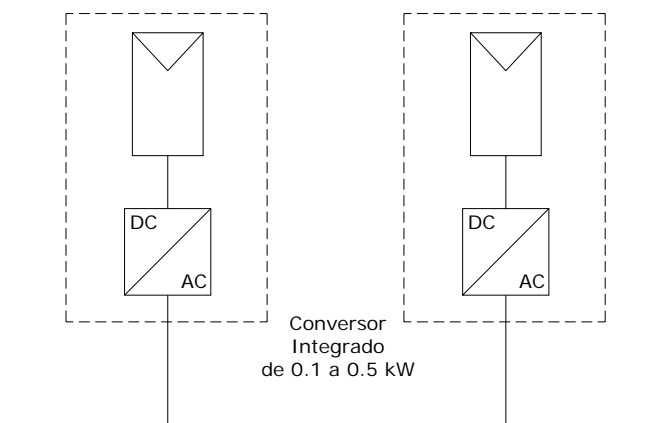
#### **6.4 Sistemas fotovoltaicos**

La tecnología fotovoltaica se ha desarrollado rápidamente, partiendo de modelos a pequeña escala, especialmente diseñados para el programa espacial de los Estados Unidos. Añadiendo el avance de la electrónica de potencia, las nuevas técnicas de fabricación de semiconductores, la reducción de costos en la producción de paneles solares y los incentivos que están ofreciendo muchos gobiernos, han impactado directamente en el uso de estos sistemas.

La generación fotovoltaica está siendo usada para modificar los valores pico, reducción de la demanda, y alimentación de cargas remotas. Además de los paneles solares, los inversores que conectan este tipo de generación con la red, se han vuelto los componentes más importantes dentro del sistema. La mayoría de inversores a mediados de los noventa, consistía de una central inversora con una potencia aproximada de 1000 vatios. Los paneles eran conectados en cadenas que luego eran conectadas en paralelo hacia un bus de corriente directa. Desafortunadamente este diseño no era muy eficiente, por las pérdidas en el proceso de inversión y el desacople de las cadenas.

Con la popularidad de los sistemas descentralizados, el concepto de módulos fue introducido en estos sistemas. Cada panel contaba con un módulo inversor integrado menor a 500 vatios. La integración de los inversores en cada panel permite una conexión directa a la red y brinda mayor flexibilidad y expansibilidad a la red. Esto también ofrece la posibilidad de resolver problemas relacionados con la conexión de altos niveles de voltaje de corriente directa, tales como, seguridad, pérdidas en los cables, riesgo de arcos de corriente directa. También se logra alcanzar la entrega de la máxima energía, en caso de la presencia de nubosidad, debido a la falta de influencia mutua de cada módulo en el punto de operación. La figura 86 ilustra un sistema fotovoltaico integrado.

**Figura 86. Sistema fotovoltaico integrado**



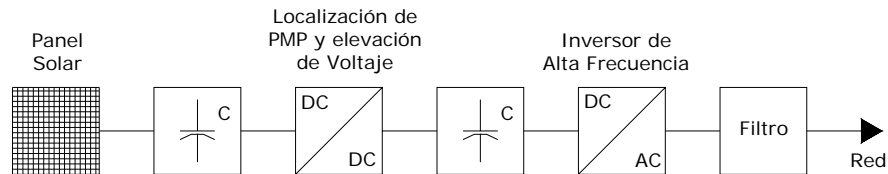
Una celda fotovoltaica es un dispositivo que produce energía eléctrica cuando es expuesto a la luz solar y conectado a una carga adecuada. Sin ninguna parte móvil dentro de los paneles el desgaste es bastante lento. Así la vida media es de más de 25 años, pero la capacidad de generación se ve reducida a un 75 u 80% de la capacidad nominal durante este periodo de envejecimiento.

Un módulo típico de celdas fotovoltaicas está conformado por 36 ó 72 celdas conectadas en serie, encapsuladas en una estructura de aluminio. Existen diferentes tecnologías para las celdas, como celdas de silicio cristalinas y multicristalinas que se producen por los procesos normales de manufactura en microelectrónica.

La conexión en serie de las celdas da como resultado la obtención de altos voltajes, alrededor de 25 a 45 voltios en terminales, pero la celda más débil definirá la máxima corriente que este arreglo puede entregar. Por lo tanto la potencia capturada es determinada por las condiciones de la carga, es decir voltaje y corriente requeridos, y como consecuencia de estas condiciones la electrónica de potencia es necesaria como interfase entre los módulos fotovoltaicos y las redes.

La estructura de un módulo fotovoltaico consiste de varias etapas de conversión. La tercera etapa contiene un módulo localizador del punto de máxima potencia o PMP, para maximizar la potencia de salida del panel, debido a que la potencia de salida varía con la temperatura y la posición del sol, también contiene un amplificador de voltaje para elevarlo al mismo nivel utilizado en la red. La etapa de conexión a la red usa un inversor de puente completo para generar voltaje de corriente alterna utilizando modulación por ancho de pulso. Seguidamente al inversor hay un filtro para eliminar las componentes de alta frecuencia presentes en la salida del inversor. Todo este esquema se muestra en la figura 87.

**Figura 87. Estructura básica de un sistema fotovoltaico**

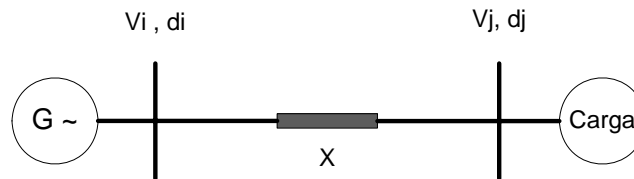


Dentro del esquema de la figura 87 también se encuentran capacitores para formar un enlace de corriente directa, estos capacitores son usados para compensar las diferencias de potencia de corriente directa generada por el panel y la potencia instantánea variante en el tiempo, absorbida por la red. El capacitor colocado antes del inversor determina la calidad armónica de la corriente de salida. Para inversores sin localización del punto de máxima potencia, el capacitor que recibe la energía del panel, generalmente se construye más grande para mantener el voltaje del panel constante y prevenir la introducción de disturbios en la red.

## **6.5 Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna**

Los sistemas de potencia tradicionales están formados básicamente por tres bloques principales, generación, transmisión y distribución. La transmisión de potencia se realiza a través de líneas de transmisión, que por definición son inflexibles, porque no se puede controlar el flujo de potencia que estas transportan. La falta de control es debida a que sus parámetros y configuración son fijos. A estas limitantes también debe agregarse que la respuesta de la red es lenta ante los disturbios, debido a que los sistemas de potencia son controlados por dispositivos mecánicos, que actúan lentamente y sufren desgaste por el uso.

**Figura 88. Línea de transmisión sin pérdidas**



Suponiendo una línea de transmisión sin pérdidas como la mostrada en la figura 88, la potencia activa transmitida a través de la línea que une los nodos i-j está descrita por la ecuación 6.1

$$P_{ij} = V_i V_j \frac{\text{sen}(\theta_{ij})}{X_{ij}} \quad (6.1)$$

De la ecuación 6.1 es evidente que la potencia transmitida dependerá de los parámetros físicos de la red, entre ellos se tienen los voltajes en los extremos de la línea, reactancia de la línea y la diferencia angular de los voltajes en ambos extremos. En sistemas convencionales la reactancia no se puede modificar, solamente los voltajes y el ángulo tienen un rango bastante reducido para controlar el flujo de potencia.

Los sistemas de transmisión de corriente alterna se basan en el uso de dispositivos electrónicos que utilizan diodos, tiristores y transistores de compuerta aislada para modificar en rangos más amplios y con mayor exactitud los parámetros descritos anteriormente, para poder controlar el flujo de potencia. Con este control las líneas pueden ser cargadas cerca de sus límites térmicos o forzar los flujos de potencia por rutas determinadas. El uso de tiristores tiene enormes ventajas sobre los equipos de conmutación mecánica debido a su alta velocidad de respuesta, y la inexistencia de desgaste mecánico a pesar de la cantidad de operaciones realizadas. Esto es un factor determinante en la estabilidad dinámica de los sistemas de potencia.

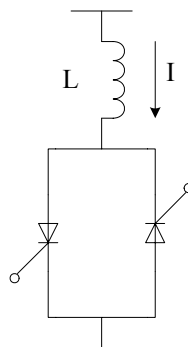
Las formas en que estos controladores modifican los parámetros de un sistema se detallan a continuación. Controlando la impedancia serie de la línea se puede regular la corriente, y la potencia activa. Al controlar el ángulo entre voltajes se regula el flujo de corriente. Inyectar un voltaje en serie con la línea, ortogonal a la corriente puede aumentar o disminuir la magnitud de la misma. Inyectando un voltaje en serie con la línea y con cualquier ángulo de fase se regulará la magnitud y el ángulo de la corriente logrando controlar la potencia real y reactiva.

### 6.5.1 Compensadores en derivación

En este tipo de compensación se inyecta una corriente al sistema en el punto de conexión del compensador. Esto se hace variando una impedancia, con una fuente de voltaje o una fuente de corriente, cualquiera que sea el método debe estar conectado en derivación. Si la corriente inyectada está en cuadratura de fase con el voltaje de la línea, el compensador por derivación sólo suministra o consume potencia reactiva variable.

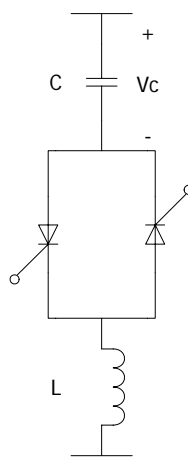
Un reactor controlado por tiristores posee un reactor de valor fijo, generalmente con núcleo de aire, y un interruptor bidireccional creado con dos tiristores conectados en antiparalelo. El reactor controlado por tiristores aparece en la figura 89.

**Figura 89. Reactor controlado por tiristores**



La corriente controlada por el reactor de la figura 89 puede hacerse variar desde cero, cuando el interruptor no es disparado, hasta su valor máximo, cuando el ángulo de retardo en el disparo es cero. Si en lugar de tener un inductor se coloca un capacitor se construirá un capacitor controlado por tiristores, este se muestra en la figura 90.

**Figura 90. Capacitor controlado por tiristores**



Al capacitor controlado por tiristores se le añade un inductor relativamente pequeño para limitar las sobre corrientes de los transitorios. De igual forma que en un reactor controlado, la corriente del capacitor es controlada por el ángulo de disparo en la compuerta de los tiristores, variando la magnitud de la corriente desde cero hasta su valor máximo.

Debido a que el capacitor almacena energía en forma de voltaje al ser desconectado, el momento de reconexión a la red es un parámetro crítico, pues si la diferencia entre el voltaje de la onda que está presente en la línea y el voltaje almacenado en el capacitor es muy diferente provocará perturbaciones transitorias en el sistema. Es muy común utilizar la conmutación a voltaje cero, esta se aplica cuando el voltaje en la línea es cero y el voltaje en el capacitor también es cero.

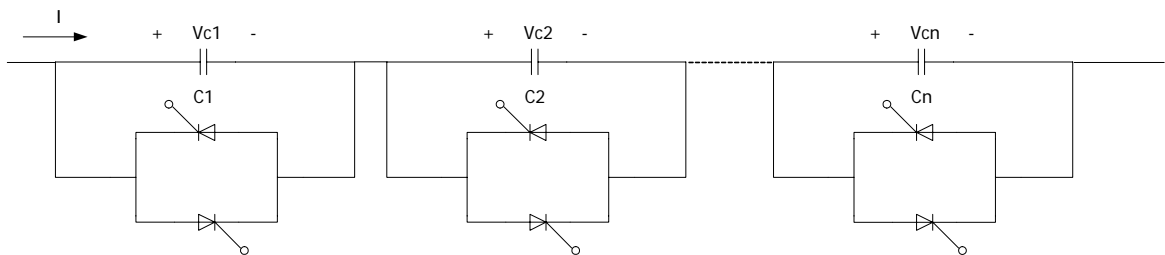


### 6.5.2 Compensadores en serie

Estos compensadores inyectan un voltaje en serie con la línea. Para lograrlo se puede hacer variar una impedancia que al ser multiplicada por su corriente genera un voltaje aplicado en serie en la línea. Cuando el voltaje aplicado está en cuadratura de fase con la corriente de línea, el compensador serie suministra o consume solamente potencia reactiva.

Esta fuente de voltaje en serie está conformada por capacitores en serie conmutados por tiristores, y básicamente son varios capacitores conectados en serie con un interruptor en paralelo a cada capacitor, el interruptor estático está formado por dos tiristores, estos en antiparalelo. La figura 91 ejemplifica el esquema de estos capacitores, cada uno es introducido a la línea cuando su interruptor asociado se abre y es excluido cuando el interruptor forma un corto circuito en sus terminales. La capacitancia total se irá reduciendo a medida que se van agregando más capacitores en serie, y se obtendrá el máximo valor capacitivo cuando solamente uno de ellos está conectado al sistema. Los tiristores se conmutan naturalmente, cuando la corriente cruza el cero. Así se podrá insertar un capacitor en la línea solamente durante los cruces por cero de la corriente y evitar la introducción de disturbios en la línea de transmisión.

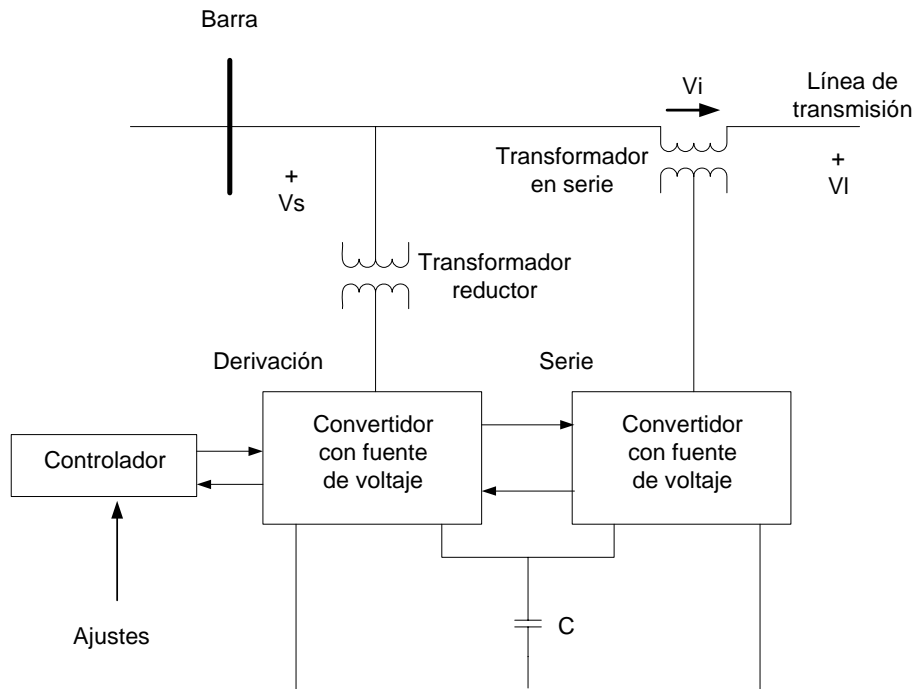
**Figura 91. Capacitores en serie controlados por tiristores**



### 6.5.3 Controlador unificado de flujo de potencia

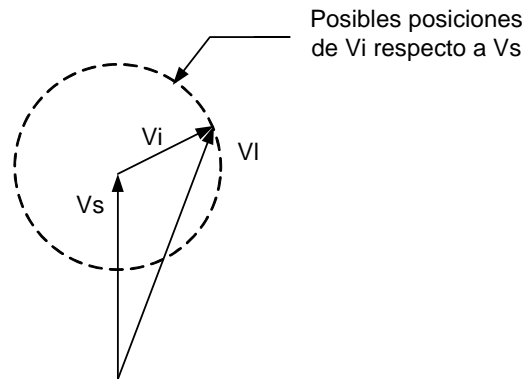
Un controlador unificado de flujo de potencia contiene un compensador en derivación y un compensador en serie con un enlace común de corriente directa. Su esquema es presentado en la figura 92. La energía, en corriente directa, almacenada por el capacitor es pequeña, esto significa que la potencia activa que genera o consume el conversor en derivación debe ser igual a la potencia consumida o generada por el conversor en serie respectivamente, para satisfacer el flujo de potencia entre ambos conversores. Los valores de la potencia reactiva en el compensador serie o derivación pueden ser seleccionados independientemente, obteniendo mayor flexibilidad en el control de flujo de potencia.

**Figura 92. Controlador unificado de flujo de potencia**



El control de la potencia se alcanza al sumar el voltaje serie  $V_i$  con el voltaje de barra  $V_s$ . El resultado de la suma es el voltaje de línea o  $V_l$ . El voltaje inyectado en serie  $V_i$  puede presentar cualquier ángulo con respecto a la corriente de línea, con esta característica el lugar geométrico de  $V_l$  es un círculo con centro en  $V_s$  y un radio máximo equivalente a la magnitud de  $V_i$ . El diagrama vectorial está en la figura 93.

**Figura 93. Diagrama vectorial de la suma de voltajes**



Este tipo de compensadores puede funcionar en cualquiera de los modos de compensación, serie o derivación, según sean las necesidades de cada caso. La única restricción es la dirección del flujo de potencia, esta debe ser de  $V_s$  a  $V_l$ , si la situación cambiara y el flujo fuera invertido, el compensador en derivación debe ser reubicado. Si se desea manejar un flujo bidireccional, es necesario instalar compensadores en derivación en la fuente y en la carga.

*(Esta página está en blanco intencionalmente)*

## CONCLUSIONES

1. Los dispositivos empleados en circuitos de electrónica de potencia fueron desarrollados a partir de los mismos dispositivos utilizados en la electrónica de pequeñas señales y su funcionamiento, también, guarda una gran relación. La mayor diferencia se encuentra en la cantidad de potencia que estos dispositivos pueden manejar.
2. Los convertidores que fueron desarrollados en el presente trabajo, utilizan dispositivos semiconductores para el control de la corriente. Sus principales aplicaciones son como interruptores controlados de potencia. Debido a su rápida respuesta, una caída de tensión despreciable cuando operan saturados y una corriente de fuga, también, despreciable, al estar en la región de corte, provoca que estos convertidores sean muy eficientes, en general arriba del 90%.
3. Tomando en cuenta que la mayoría de convertidores maneja altos niveles de corriente y voltaje, los circuitos de control deben ser ajustados de la mejor manera posible, de lo contrario cualquier variación o parámetro erróneo provocará problemas en el desempeño y funcionamiento de estos convertidores.

4. A pesar de todas las bondades que implica el uso de electrónica en sistemas de potencia, no todo puede ser perfecto. Hay un fenómeno que es bastante serio y debe ser analizado con mucho detenimiento al utilizar equipo electrónico de potencia. Este problema es la distorsión armónica, provocada por la manipulación de las formas de onda, especialmente de corriente, por parte de cualquier convertidor.
  
5. Cualquier programa computacional diseñado a la modelación y simulación, en especial *Matlab 7.0*, son una gran herramienta que debe ser explotada, tanto por catedráticos como por alumnos de cualquier área.

## RECOMENDACIONES

1. Es necesario que todo estudiante de ingeniería eléctrica, esté al menos familiarizado con la electrónica de potencia, aunque lo más indicado sería tener un curso dedicado a esta disciplina dentro de la carrera. Esta es una materia, que, a pesar de ser, relativamente nueva, está teniendo impacto en todas las áreas relacionadas con la ingeniería eléctrica, por ejemplo: optimización de la transmisión y distribución, generación de energía por medios eólicos y celdas de combustible.
2. No olvidar o restarle importancia a las herramientas aprendidas durante los cursos básicos e intermedios de matemáticas. Muchos fenómenos y comportamientos pueden ser entendidos al examinar funciones que los describen. Los medios visuales, tales como: gráficas de funciones o tendencias también son de gran ayuda cuando se desea comprender el funcionamiento de cualquier dispositivo
3. Muchos alumnos se quejan de la falta de aspectos prácticos en el desarrollo de su carrera y quizás encuentren la formulación de modelos y su simulación algo demasiado complicado y sin una aplicación real, pero, en realidad, no lo es, la simulación es una herramienta muy poderosa que debe ser aprovechada, y los modelos a utilizar serán tan complicados como el usuario decida hacerlos. Con la tecnología actual estas tareas se han vuelto mucho más fáciles de lo que uno puede imaginar.

*(Esta página está en blanco intencionalmente)*



## BIBLIOGRAFÍA

1. Rashid, Muhammad. **Electrónica de potencia, circuitos, dispositivos y aplicaciones**. México: Pearson Educación. 2004. 878 pp.
2. Müller, Wolfgang y otros. **Electrotecnia de potencia curso superior**. España: Editorial Reverté. 1980. 409 pp.
3. Morris, Noel. **Electrónica industrial avanzada**. España: Editorial Marcombo. 1980. 412 pp.
4. Gualda Gil, Juan Andrés y otros. 2ª ed. **Electrónica industrial: Técnicas de potencia**. España: Editorial Marcombo. 1992. 477 pp.
5. Paserba, John. **How FACTS controllers benefit AC transmission systems**. E.E.U.U., 2003
6. Blaabjerg, Frede y otros. *“Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems”*. **IEEE Transactions on power electronics**. E.E.U.U., Vol. 19, No. 5: 1184-1194. Septiembre 2004.
7. Wilson, Thomas. *“The evolution of power electronics”*. **IEEE Transactions on power electronics**. E.E.U.U., Vol. 15, No. 3: 439-446. Mayo 2000.
8. Ho, Billy y Shu-Hung Cheng, Henry. *“An integrated inverter with maximum power tracking for grid-connected PV systems”*. **IEEE Transactions on power electronics**. E.E.U.U., Vol. 20, No. 4: 953-962. Julio 2005.

9. Chapman, Stephen. **Máquinas eléctricas**. 3<sup>a</sup> ed. Colombia: Editorial Nomos. 2000. 768 pp.
10. Chattopadhyay, A.K. **Power electronics handbook**. E.E.U.U.: Academic Press. 2001.
11. Van Wyk, J.D. y Fred C. Lee. **Power electronics technology at the dawn of the new millenium – Status and Future**. E.E.U.U. 1999.
12. Martínez García, Salvador. **Prontuario para el diseño eléctrico y electrónico**. España: Editorial Marcombo. 1989. 495 pp.
13. **Switchmode power supplies reference manual and design guide**. 2<sup>a</sup> ed. E.E.U.U.: s.e. 2002. 63 pp.

#### Referencias electrónicas

14. **Interactive Power Electronics Seminar (iPES)**  
[www.ipes.ethz.ch](http://www.ipes.ethz.ch) Noviembre, 2005
15. **Power Designers**  
[www.powerdesigners.com](http://www.powerdesigners.com) Octubre, 2005

## APÉNDICES

### ***MATLAB 7.0***

*MATLAB 7.0* es un lenguaje de computación técnico de alto rendimiento. Este lenguaje integra cálculo, visualización y programación en una ambiente fácil de usar donde los problemas y las soluciones, son expresados en una notación matemática fácil de entender. Algunas aplicaciones son:

- desarrollo de algoritmos;
- adquisición de datos;
- modelación, simulación y creación de prototipos;
- análisis de datos, exploración y visualización;
- gráficas científicas y de ingeniería;
- desarrollo de aplicaciones con una interfase gráfica para su construcción.

El nombre *MATLAB 7.0* viene de las palabras *Matrix Laboratory*. Este es un sistema interactivo, donde el tipo de dato básico no requiere la definición de sus dimensiones. Esta característica permite resolver de forma rápida y eficiente muchos problemas, especialmente, aquellos que necesitan matrices y vectores.

Dentro de universidades *MATLAB 7.0* ha sido una gran herramienta para cursos introductorios y avanzados de matemática, ingeniería y ciencia. En la industria es una herramienta para investigación de alta productividad, desarrollo y análisis.

### ***Simulink 6.1***

Simulink 6.1 es un programa de computación diseñado para el modelado, simulación, y el análisis de sistemas dinámicos. Tiene la capacidad de soportar sistemas lineales y sistemas no lineales en tiempo continuo, con muestreo de tiempo, o una combinación de ambos.

Con *Simulink 6.1* se pueden crear modelos partiendo de un espacio en blanco, o utilizando otros modelos ya existentes, de la misma manera, se puede tener acceso a todas las herramientas de análisis que *MATLAB 7.0* posee para visualizar y analizar los resultados obtenidos, gracias a que ambos programas son totalmente integrados.

*Simulink 6.1* no es sólo una herramienta didáctica, pues miles de ingenieros alrededor del mundo lo utilizan para modelar y resolver problemas reales. Tiene la capacidad de explorar más allá de los modelos ideales, porque puede incluir diferentes factores, por ejemplo: fricción, resistencia del aire, pérdidas mecánicas, frenados repentinos, etc. Esto convierte a la computadora en todo un laboratorio para modelar y analizar sistemas que en la práctica resultarían muy complicados o incluso imposibles, tal sería el caso del comportamiento del sistema de embrague de un automóvil, las oscilaciones en el ala de un avión en pleno vuelo, análisis del tiempo de vida de los humanos, o, el efecto de las fuentes monetarias en la economía.

Después de definir un modelo, se puede realizar la simulación, utilizando métodos que resuelven el sistema, integrando las ecuaciones diferenciales. Al utilizar los bloques de visualización, se pueden observar los resultados de la simulación incluso al mismo tiempo que se está ejecutando la simulación,

## ***SimPowerSystems***

*SimPowerSystems* y *SimMechanics* son herramientas de la familia de modelación física, ambos trabajan en conjunto con *Simulink 6.1* para modelar sistemas eléctricos, sistemas mecánicos y sistemas de control.

Los sistemas eléctricos de potencia son una combinación de circuitos eléctricos y dispositivos electromecánicos –motores y generadores–. Los requerimientos para incrementar la eficiencia han forzado a los diseñadores de los sistemas de potencia a usar dispositivos de electrónica de potencia y sofisticados sistemas de control haciendo necesarias las técnicas y herramientas de análisis. El principal problema se presenta con el hecho de que a menudo los sistemas son no lineales, por lo tanto la mejor manera de entenderlos es a través de la simulación.

*SimPowerSystems* es una herramienta que permite a científicos e ingenieros construir modelos para simular sistemas de potencia, utilizando el ambiente de *Simulink 6.1*. El análisis de los circuitos puede incluir su interacción con la mecánica, termodinámica, y otras disciplinas. Esto se logra porque todas las partes eléctricas interactúan con las librerías de *Simulink 6.1* y utilizan *MATLAB 7.0* como motor computacional. Por esto, los diseñadores pueden usar las herramientas de *MATLAB 7.0* y los bloques de *Simulink 6.1* en sus modelos.

Las librerías de *SimPowerSystems* contienen modelos típicos de equipo de potencia, tales como, transformadores, líneas de transmisión, máquinas y electrónica de potencia. Estos modelos vienen de diversos libros de texto, y su validez está basada en la experiencia del Laboratorio de Pruebas y Simulación de Sistemas de Potencia de *Hydro-Quebec*, localizado en Canadá y la Escuela de Tecnología Superior y Universidad de Laval.