



**Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi**

## **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y  
APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**TESIS DE GRADO**

**TEMA:**

**“ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS  
DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS  
PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA  
LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD  
ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS  
DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

Tesis de grado presentada previo a la obtención del Título de Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos De Potencia

**Autores:**

Semanate Alvarez Doris Maribel  
Zapata Arias Jorge Eduardo

**Director:**

Ing. Edwin Moreano Mg.C.

Latacunga – Ecuador  
Septiembre 2015

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS  
INGENIERÍA ELÉCTRICA

---

## AUTORÍA

Los criterios emitidos en el presente trabajo de investigación “ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI” son de exclusiva responsabilidad de los autores.

.....  
Semanate Alvarez Doris Maribel  
C.I.050322029-5

.....  
Zapata Arias Jorge Eduardo  
C.I. 050242820-4



## AVAL DE DIRECTOR DE TESIS

En calidad de Director del Trabajo de Investigación sobre el tema: “ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, de los señores estudiantes, Semanate Alvarez Doris Maribel y Zapata Arias Jorge Eduardo, postulantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica,

### **CERTIFICO QUE:**

Una vez revisado el documento entregado a mi persona, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos- técnicos necesarios para ser sometidos a la **Evaluación del Tribunal de Validación de Tesis** que el Honorable Consejo Académico de la Unidad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Septiembre del 2015

EL DIRECTOR

.....  
Ing. Edwin Moreano Mg.C.

**DIRECTOR DE TESIS**



## AVAL DE ASESOR METODOLÓGICO

En calidad de **Asesor Metodológico** del trabajo de Investigación sobre el tema: “ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”, de los señores estudiantes, Semanate Alvarez Doris Maribel y Zapata Arias Jorge Eduardo, postulantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica,

### **CERTIFICO QUE:**

Una vez revisado el documento entregado a mi persona, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científicos- técnicos necesarios para ser sometidos a la **Evaluación del Tribunal de Validación de Tesis** que el Honorable Consejo Académico de la Unidad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Septiembre del 2015

.....

Dr. Marcelo Bautista

**ASESOR METODOLÓGICO**

## AVAL DE IMPLEMENTACION

Latacunga, septiembre del 2015

En calidad de coordinador de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, me permito certificar que la señorita Semanate Alvarez Doris Maribel con C.I. 050322029-5 y el señor Zapata Arias Jorge Eduardo con C.I. 050242820-4, han desarrollado la Tesis de Grado con el tema: **“ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, bajo la supervisión del Ing. Edwin Moreano, en la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Es todo cuanto puedo certificar, facultando a los interesados, hacer uso de este documento en forma que estimen conveniente.

Atentamente:

-----  
Ing. Xavier Proaño. Mg. C  
Coordinador de Ingeniería Eléctrica

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi Dios quién supo guiarme por el buen camino, a mis padres por su apoyo, consejos, comprensión, a mi esposa por la ayuda condicional que me brinda todos los días con su amor, a mis hijas quienes son una motivación, inspiración y felicidad, a mi hermana por el apoyo que me brinda cada día, a mi tío Hugo por la ayuda que me ha brindado durante todos estos años A mi familia quienes por ellos soy lo que soy.

*Jorge Eduardo Zapata Arias*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por guiarme en cada momento de mi vida y mostrarme que con humildad y perseverancia todo es posible.

A mis padres, mi hija y mis hermanas por su amor incondicional y su apoyo constante a lo largo de toda mi vida.

Agradezco de manera especial y sincera al Ing. Edwin Moreano Director de Tesis, quien con su sabiduría y capacidad para guiar ha sido un aporte invaluable en el desarrollo y culminación de esta tesis

*Doris Maribel Semanate Alvarez*

## **DEDICATORIA**

El esfuerzo alcanzado en el presente trabajo se la dedico a mi Dios quién supo darme fuerzas para seguir adelante y no desmayar en los problemas que se presentaban, para mis padres Jorge y Carmen que me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi carácter, mi empeño, mi perseverancia, mi coraje para conseguir mis objetivos., a mi esposa por la ayuda condicional que me brinda todos los días a mis hijas Gianangella, Danita, Jaretsy quienes son una motivación, inspiración y felicidad, a mi hermana por el apoyo que me brinda cada día, a Jhonatan por estar siempre presente a mi sobrino Alexis, a mi suegrita, y como olvidar a mi familia quienes por ellos he cumplido mi meta.

*Jorge Eduardo Zapata Arias*

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo principalmente a Dios por haberme permitido alcanzar esta meta tan anhelada y regalarme una familia tan maravillosa.

A mis padres René y Cecilia porque siempre estuvieron a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona, a mis hermanas Yoli, Arita y Leo, que son quienes me hacen sentir que puedo contar con alguien incondicional y que en momentos de tristeza o alegría siempre están conmigo, a la persona más importante de mi vida, Luisita Analy, tu amor y tu ternura son los motivos de mi felicidad, de mi esfuerzo, de mis ganas de buscar lo mejor para ti, soy muy dichosa porque en la vida me han sucedido cosas muy buenas, pero lo mejor que pudo pasarme es convertirme en madre de una pequeña tan bella como tú, te amo mi princesa.

*Doris Maribel Semanate Alvarez*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
AUTORIA.....	ii
AVAL DE DIRECTOR DE TESIS.....	iii
AVAL ASESOR METODOLOGICO.....	iv
CERTIFICADO DE IMPLEMENTACION.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
DEDICATORIA.....	viii
INDICE DE CONTENIDOS .....	x
INDICE DE TABLAS .....	xiv
INDICE DE FIGURAS .....	xv
RESUMEN .....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
AVAL DE DOCENTE DE INGLES .....	xix
INTRODUCCION .....	xx
CAPÍTULO I.....	22
1.FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	22
1.1. Antecedentes Investigativos.....	22
1.2 Electrónica de Potencia.....	24
1.2.1 Historia de la Electrónica de Potencia .....	24
1.2.2 Definiciones.....	25
1.2.3 Dispositivos Semiconductores de Potencia.....	26
1.2.3.1 Diodos semiconductores de Potencia.....	28
1.2.3.1.1 Características del diodo .....	29
1.2.3.1.2 Características de Recuperación Inversa.....	29
1.2.4. Tipos de diodos de potencia.....	10
1.2.4.1. Diodos de propósito general .....	31
1.2.4.2. Diodos de recuperación rápida.....	31
1.2.4.3. Diodos Schottky .....	32
1.3 Tiristores.....	12

1.3.1. Características de los Tiristores .....	35
1.3.2. Activación del Tiristor .....	36
1.3.3. Apagado del Tiristor .....	38
1.3.4. Tipos de Tiristores.....	40
1.3.4.1 Tiristores controlados por fase .....	41
1.3.4.2 Tiristores de triodo bidireccional (TRIAC) .....	42
1.4 Convertidores electrónica de potencia .....	43
1.4.1 Tipos de convertidores .....	44
1.4.2 Representación en el dominio del tiempo .....	47
1.4.3 Representación en el dominio de la frecuencia.....	48
1.5. Sistemas Electrónicos de Potencia .....	28
1.5.1 Importancia.....	49

CAPÍTULO II..... **¡Error! Marcador no definido.**

2. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS;**¡Error! Marcador no definido.**

2.1 Objetivos de la Carrera de Ingeniería Eléctrica;**¡Error! Marcador no definido.**

2.1.1 General..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.1.2 Específicos..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.2 Misión..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.3 Análisis del Macro de la Carrera de Ingeniería Eléctrica;**¡Error! Marcador no definido.**

2.4. Diseño Metodológico..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.1. Tipo de investigación..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.1.1. Investigación Descriptiva..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.1.2. Explicativa..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.2 Métodos..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.2.1. Método Inductivo..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.2.2. Método Deductivo..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.3. Técnicas..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.4.3.1. Encuesta..... **¡Error! Marcador no definido.**

2.5 Unidad de Estudio .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.1 Población o universo .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.2 Muestra.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.5.3 Posibles alternativas de interpretación de los resultados;	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6. Análisis e Interpretación de Resultados .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.6.1. Encuesta aplicada a los estudiantes de Ingeniería Eléctrica de Universidad Técnica de Cotopaxi.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.7. Prueba de Hipótesis con CHI Cuadrado.....	48
CONCLUSIONES .....	54
RECOMENDACIONES .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
CAPITULO III.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
DISEÑO DE LA PROPUESTA.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.1. Proyecto factible.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.1.1. Factibilidad .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.1.2. Factibilidad Económica.....	59
3.1.2.1. Práctica de Transistores.....	59
3.1.2.1.1. Fuente de voltaje transistorizada.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
3.1.2.1.2. Control de velocidad de un Motor a pasos bipolar con transistores. ....	61
3.1.2.1.3. Generador de voltaje negativo a partir de una fuente de voltaje DC positiva.....	62
3.1.2.1.4. Inversor de voltaje.....	62
3.1.2.1.5. Conversor BOOST o elevador STEP-UP. ....	63
3.1.2.2. Práctica de SCR.....	64
3.1.2.2.1. Fuente de Voltaje. ....	64
3.1.2.2.2. Conmutación de Luces con SCR. ....	66
3.1.2.2.3. Alarma temperatura con SCR. ....	67
3.1.2.2.4. Control ON / OFF de onda completa con SCR.....	68
3.1.2.2.5. Control de onda completa por ángulo de fase con SCR.....	69
3.1.2.2.6. Control de media onda por ángulo de fase y salida con SCR.....	70
3.1.2.3 Práctica de Diodos.....	71

3.1.2.3.1. Rectificador Monofásico de Media Onda. ....	71
3.1.2.3.2. Rectificador Monofásico de Onda Completa. ....	72
3.1.2.3.3. Rectificador Trifásico de Media Onda. ....	73
3.1.2.3.4. Duplicador de voltaje. ....	73
3.1.2.3.5. Rectificador Trifásico de Onda Completa. ....	74
3.1.2.4. Presupuesto general. ....	75
3.2. Desarrollo del proyecto. ....	75
3.2.1. Elaboración del Módulo. ....	76
3.3. Desarrollo de la Propuesta. ....	77
3.3.1. Práctica de transistores. ....	77
3.3.2. Práctica de SCR. ....	81
3.3.3. Práctica de Diodos. ....	84
3.3.4. Diseño de Nomenclatura de Placas. ....	86
3.3.5. Conclusiones. ....	87
3.3.6 Recomendaciones. ....	88
3.3.7. Glosario de Términos. ....	89
3.3.8. Referencias Bibliográficas. ....	90
3.3.9. Anexos. ....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA No. 1. 1	PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES .....	27
TABLA No. 1.2	DOMINIO DE FRECUENCIAS .....	49
TABLA N° 2.1.	POBLACIÓN Y MUESTRA;Error! Marcador no definido.	
TABLA N° 2.2.	LABORATORIOS .....	;Error! Marcador no definido.
TABLA N° 2.3.	IMPLEMENTAR MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA .....	;Error! Marcador no definido.
TABLA No. 2.4.	INFORMACIÓN DE DISPOSITIVOS;Error! Marcador no definido.	
TABLA N° 2.5.	IMPORTANCIA DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA .....	;Error! Marcador no definido.
TABLA N° 2.6.	ELABORACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA.....	;Error! Marcador no definido.
TABLA N° 2.7.	INVESTIGACIÓN PRÁCTICA;Error! Marcador no definido.	
TABLA N° 2.8.	MEJORAR CONOCIMIENTOS TEÓRICOS .....	;Error! Marcador no definido.
TABLA N° 2.9.	ESTRATEGIAS INNOVADORAS;Error! Marcador no definido.	
TABLA N° 2.10.	MANEJO DE MÓDULOS DE POTENCIA .....	;Error! Marcador no definido.
TABLA N° 2.11.	PRÁCTICAS EN TIEMPO REAL.;Error! Marcador no definido.	

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA No 1.1	DISPOSITIVOS SEMICONDUCTORES DE POTENCIA	27
FIGURA No 1.2	SÍMBOLO DEL DIODO .....	28
FIGURA No 1.3	RECUPERACIÓN INVERSA.....	30
FIGURA No 1.4	CONFIGURACIÓN DE TIRISTORES.....	34
FIGURA No 1.5	CONFIGURACIONES DE TIRISTORES.....	34
FIGURA No 1.6	SIMBOLO DEL TIRISTOR Y SUS UNIONES .....	35
FIGURA No 1.7	EFECTOS DE LA CORRIENTE DE COMPUERTA .....	37
FIGURA No 1.8	CARACTERISTICAS DE ENCENDIDO.....	37
FIGURA No 1.9	APAGADO DEL TIRISTOR .....	39
FIGURA No 1.10	EQUIVALENTE Y SIMBOLO DEL TRIAC .....	43
FIGURA No 1.11	CARACTERISTICAS DE UN TRIAC .....	43
FIGURA No 1.12	ESQUEMA ELÉCTRICO .....	47
FIGURA N° 2.1	LABORATORIOS .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
FIGURA N° 2.2.	IMPLEMENTAR MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
FIGURA No 2.3.	INFORMACIÓN DE DISPOSITIVOS;	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
FIGURA N° 2.4.	IMPORTANCIA DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

FIGURA N° 2.5.	ELABORACIÓN DE DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA.....	¡Error! Marcador no definido.
FIGURA N°. 2.6	INVESTIGACIÓN PRÁCTICA.¡Error!	Marcador no definido.
FIGURA No. 2.7	MEJORAR CONOCIMIENTOS TEÓRICOS .....	¡Error! Marcador no definido.
FIGURA No. 2.8	ESTRATEGIAS INNOVADORAS¡Error!	Marcador no definido.
FIGURA N°. 2.9	MANEJO DE MÓDULOS DE POTENCIA .....	¡Error! Marcador no definido.
FIGURA N°. 2.10	PRÁCTICAS EN TIEMPO REAL¡Error!	Marcador no definido.
GRÁFICO No 3.1.	MÓDULO PRÁCTICA DE TRANSISTORES .....	56
GRÁFICO N° 3.2	MÓDULO PRÁCTICA DE SCR .....	57
GRÁFICO No 3.3.	MÓDULO PRÁCTICA DE DIODOS .....	57
GRÁFICO No 3.4.	FUENTE VOLTAJE TRANSISTORIZADA CON PROTECCIÓN DE CORTOCIRCUITO .....	77
GRÁFICO No 3.5.	DIAGRAMA DE BLOQUES DE UNA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	78
GRÁFICO No 3.6.	DIAGRAMA DE BLOQUE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR A PASOS BIPOLAR CON TRANSISTORES .....	78
GRÁFICO No 3.7.	DIAGRAMA DE CONTROL DE VELOCIDAD DE UN MOTOR A PASOS BIPOLAR CON TRANSISTORES....	79
GRÁFICO No 3.8.	DIAGRAMA DE BLOQUES INVERSOR DE VOLTAJE.	80
GRÁFICO N° 3.9	INVERSOR DE VOLTAJE.....	80
GRÁFICO N° 3.10	DIAGRAMA DE BLOQUES CONMUTACIÓN DE LUCES CON SCR.....	81
GRÁFICO No 3.11	CONMUTACIÓN DE LUCES CON SCR.....	82
GRÁFICO N° 3.12	ALARMA DE TEMPERATURA CON SCR .....	83
GRÁFICO N° 3.13.	DIAGRAMA DE TEMPERATURA CON SCR.....	83
GRÁFICO N°. 3.14	RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE MEDIA ONDA....	84

GRÁFICO No.3.15 RECTIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA .....	84
GRÁFICO No. 3.16 FORMA DE ONDA DEL DIODO.....	85
GRÁFICO N°. 3.17 MEDIA ONDA RECTIFICADA.....	85
GRÁFICO N°. 3.18 ONDA COMPLETA RECTIFICADA .....	86

## **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

**UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS**  
**Latacunga – Ecuador**

---

**TEMA: “ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

**Autores:** Doris Maribel Semanate Alvarez  
Jorge Eduardo Zapata Arias.

### **RESUMEN**

La investigación tiene como finalidad elaborar e implementar Módulos Electrónicos de Potencia básica en el laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, los mismos que ayudarán a la formación académica de los estudiantes de las carreras técnicas de la Institución. Los Módulos Electrónicos de Potencia están distribuidos en tres temas que son: Práctica de Transistores, práctica de SCR y práctica de Diodos de tal forma que permitan a los estudiantes realizar prácticas y complementar los conocimientos adquiridos en el aula, para que de esta manera tanto docentes como estudiantes puedan visualizar en tiempo real las formas y magnitudes de las ondas eléctricas. El creciente avance de la Electrónica de Potencia ha permitido que estos dispositivos sean utilizados en procesos industriales, comerciales y residenciales, siendo ésta una materia importante en las carreras técnicas que la Universidad Oferta.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**  
**ACADEMIC UNIT OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE**  
**Latacunga – Ecuador**

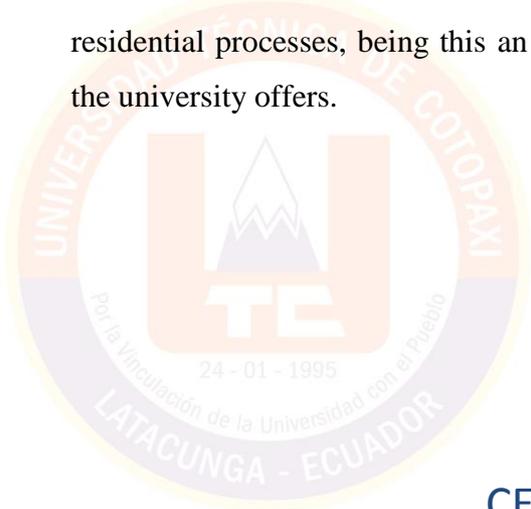
---

**THEME: "DEVELOPMENT AND APPLICATION OF POWER ELECTRONIC MODULES WITH THEIR RESPECTIVE PRACTICAL GUIDE FOR ELECTRICAL ENGINEERING LABORATORY FOR TEACHING OF THE STUDENTS OF THE ACADEMIC UNIT OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCE OF THE TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI"**

**Authors:** Doris Maribel Semanate Alvarez  
Jorge Eduardo Zapata Arias.

## ABSTRACT

The project has as aim to develop and implement power Electronic Modules in the laboratory of Electrical Engineering of the Technical University of Cotopaxi, the same which will help to the academic training of students of the technical careers of the institution. Electronic Power Modules are divided into three themes are: Practice Transistors, practice of SCR and practice of diodes so as to enable students to do internships and complement the knowledge acquired in the classroom, so that in this way both teachers and students can visualize in real time the forms and magnitudes of electrical waves. The rising tide of the power electronic has allowed that these devices to be used in industrial, commercial and residential processes, being this an important matter in the technical courses that the university offers.



Universidad  
Técnica de  
Cotopaxi

CENTRO CULTURAL DE IDIOMAS

## *AVAL DE TRADUCCIÓN*

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro Cultural de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal CERTIFICO que: La traducción del resumen de tesis al Idioma Inglés presentado por los Señores Egresados de la Carrera de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas: **Doris Maribel Semanate Alvarez y Jorge Eduardo Zapata Arias** , cuyo título versa “**ELABORACIÓN Y APLICACIÓN DE MÓDULOS ELECTRÓNICOS DE POTENCIA CON SU RESPECTIVO MANUAL DE PRÁCTICAS PARA EL LABORATORIO**

**DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PARA LA ENSEÑANZA DE LOS ALUMNOS DE LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI".** lo realizó bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo al peticionario hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, septiembre del 2015

Atentamente,

Lic. M. Sc. Erika Cecilia Borja Salazar  
**DOCENTE CENTRO CULTURAL DE IDIOMAS**  
C.C. 0502161094

[www.utc.edu.ec](http://www.utc.edu.ec)

Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido / San Felipe. Tel: (03) 2252346 – 2252307 - 2252205

## **INTRODUCCIÓN**

Muchos autores coinciden en que la historia de la electrónica de potencia empezó en 1900, cuando el rectificador de arco de mercurio fue introducido, a partir de ahí se desarrollaron grandes dispositivos como el transistor de germanio o silicio, desarrollado en los Laboratorios Bell por Bardeen, Brattain y Shockley, este fue el inicio de la Electrónica de Potencia. Para 1958, se había desarrollado el tiristor por General Electric. A partir de ahí todos los rectificadores de arco de mercurio fueron reemplazados por rectificadores de silicio controlados.

La revolución de la electrónica de potencia está dando la capacidad de dar forma y controlar grandes cantidades de energía con una eficiencia cada vez mejor. Así gracias a la fusión que existe entre la electrónica de potencia y la digital se tienen

muchas aplicaciones tanto a nivel residencial como a nivel comercial, así como aplicaciones industriales, este último incluyen computadoras, transportación, procesamiento de información, telecomunicaciones, aplicaciones aéreas y/o espaciales.

El presente proyecto de tesis de un Módulo de Electrónica de Potencia y su respectivo manual de prácticas, permite el aprendizaje para el trabajo de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, estos dispositivos son utilizados en procesos industriales, y es de gran importancia que las Carreras Técnicas en sus cátedras de Instalaciones Industriales, Laboratorios de Maquinas Eléctricas, Centrales de Generación, Electrónica de Potencia entre otras asignaturas puedan permitir realizar prácticas de laboratorio ya que la distribución de los dispositivos electrónicos permiten que el estudiante verifique los conocimientos adquiridos en el aula.

Se realiza la Implementación, Diseño y Construcción de un Módulo de Electrónica de Potencia básica para aportar con material didáctico al laboratorio de electrónica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, para que de esta manera los docentes y estudiantes puedan visualizar en tiempo real las formas y magnitudes de ondas eléctricas.

Consideramos que el Módulo Electrónico de Potencia trabajará bajo los parámetros y especificaciones técnicas necesarias para enriquecer el aprendizaje de los estudiantes, además este módulo contara con los equipos y elementos eléctricos necesarios para su operación.

**CAPITULO 1: FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA:** Antecedentes Investigativos, Marco teórico, para sustentar la investigación.

**CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO:** En donde se desarrollan aspectos inherentes a los antecedentes investigativos como son las Fundamentaciones, las Variables y su desarrollo, Tipos, Población y Muestra, las Técnicas e

Instrumentos utilizados, Plan de Recolección de la Información, Análisis e Interpretación de resultados.

**CAPÍTULO III: LA PROPUESTA:** Se encuentra el tema, los datos informativos, antecedentes de la propuesta, la justificación, los objetivos generales y específicos, el análisis de factibilidad, conclusiones y recomendaciones

**BIBLIOGRAFÍA:** Se detalla los datos bibliográficos citados y consultados en la presente investigación.

**ANEXOS:** Se encuentran las fotografías y diagramas referentes al presente proyecto.

# CAPÍTULO I

## 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 1.1. Antecedentes Investigativos

Revisados los archivos de la Escuela Politécnica Nacional, se encontró el tema “Construcción de un módulo didáctico para el control electrónico de potencia utilizando un GTO”, sustentada por los señores Muñoz Jaramillo, Wladimir Alexander, Revelo Terán, Tayra Gicela (09-ene-2013), el cual dice que el proyecto consiste en el diseño e implementación de un módulo didáctico para el laboratorio de Electrónica, el mismo que permite controlar la potencia suministrada en una carga mediante el tiristor GTO(Gate Turn-Off).

La finalidad de este proyecto de titulación es realizar el diseño y construcción de un módulo didáctico para el Laboratorio de Electrónica, el mismo que permita controlar la potencia suministrada a una carga, para lo cual se diseñó un circuito conformado por un micro controlador AVR (Advanced Virtual Risc) que controle un tiristor GTO; este módulo permitirá a los estudiantes interactuar y comprender de una forma más sencilla el funcionamiento del mencionado tiristor.

En consecuencia, la elaboración de los módulos de electrónica de potencia permitirá que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica y Electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, tengan un aprendizaje teórico-práctico, ya que se aplicará los conocimientos teóricos adquiridos en la carrera para el desarrollo de las diferentes prácticas.

El presente estudio del tema Elaboración y aplicación de módulos electrónicos de potencia básica con su respectivo manual de prácticas para el laboratorio de ingeniería eléctrica, para la enseñanza de los alumnos de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; es una forma de analizar las formas de onda y las magnitudes eléctricas de cada uno de los dispositivos electrónicos.

Según CANTELI MAÑANA, Mario [en línea], considera que el desarrollo espectacular de la electrónica de estado sólido en los últimos años ha posibilitado la evolución de todas las ramas de la electrónica, y entre ellas la electrónica de potencia, que se ha beneficiado de la aparición de conmutadores de estado sólido que permiten reducir el volumen y prestaciones de los equipos de conversión de energía, imprescindibles en la mayoría de las aplicaciones domésticas e industriales actuales.

Como resulta de sobra conocido, el más maduro, eficiente y fiable de todos los convertidores existentes es el transformador, que presenta como inconvenientes más importantes su escasa adaptabilidad a sistemas automáticos de control, excepto en el caso del autotransformador servomotorizado, que con una velocidad de respuesta en el rango de las centenas de milisegundos (no hay que olvidar que se trata de sistemas electromecánicos) no puede competir en este aspecto con la electrónica de potencia.

No hay duda de que la energía eléctrica constituye la fuente básica de energía de los sistemas electrónicos. Sin embargo, esta energía no se produce ni se consume de una forma unificada, esto es, está disponible con diferentes formatos: corriente continua, alterna en formato monofásico o trifásico, pulsada, etc. Es necesario, por tanto, disponer de elementos de conversión que permitan transformar la energía entre los diferentes formatos, con el máximo rendimiento posible.

Uno de los problemas que aparecen cuando se diseñan convertidores de elevado rendimiento es la generación de subproductos no deseados. Sirva como ejemplo el

caso de los convertidores CA/CC (Corriente alterna/corriente continua) o rectificadores que transforman la corriente alterna en continua. Este tipo de convertidores generan a su salida componentes alternas no deseadas que se suman a la componente continua. En otras ocasiones, la conmutación de corrientes elevadas necesaria para completar el proceso de conversión de energía genera radiación electromagnética que puede producir interferencias en equipos electrónicos sensibles próximos. Existe, por tanto, una antítesis eficiencia energética – calidad de la conversión que debe tenerse en cuenta para un correcto diseño y utilización de los convertidores.

## **1.2 Electrónica de Potencia**

### ***1.2.1 Historia de la Electrónica de Potencia***

La historia de la electrónica de potencia se inicia en 1900 con la introducción del rectificador de arco de mercurio. Después se introdujeron en forma gradual el rectificador de tanque metálico, el de tubo al vacío controlado por la rejilla, el ignitrón, el fanotrón y el tiratrón. Estos dispositivos se aplicaban para el control de potencia hasta la década de 1950.

La primera revolución electrónica comenzó en 1948, con la invención del transistor de silicio en los Bell Telephone Laboratories, por Bardeen, Brattain y Schockley. La mayor parte de las tecnologías modernas de electrónica avanzada se pueden rastrear a partir de ese invento. La micro electrónica moderna ha evolucionado a través de los años a partir de los semiconductores de silicio. El siguiente adelanto, en 1956, también fue logrado en los Bell Laboratories, o sea la invención del transistor de disparo PNP, que se definió como tiristor, o rectificador controlado de silicio (SCR).

La segunda revolución electrónica comenzó en 1958, con el desarrollo del tiristor comercial, por la General Electric Company. Fue el principio de una nueva era de la electrónica de potencia.

Desde entonces se han introducido muchas clases distintas de dispositivos semiconductores de potencia y de técnicas de conversión. La revolución microelectrónica nos permitió tener la capacidad de procesar una cantidad gigantesca de información con una rapidez increíble. La revolución en la electrónica de potencia nos está permitiendo conformar y controlar grandes cantidades de potencia con una eficiencia siempre creciente.

Debido al enlace entre la electrónica de potencia, el músculo, con la microelectrónica, el cerebro, están surgiendo hoy muchas aplicaciones potenciales de la electrónica de potencia, y esta tendencia va a continuar. Dentro de los siguientes 30 años, la electrónica de potencia conformará y acondicionará la electricidad en algún lugar de la red de transmisión entre su generación y todos los usuarios. La revolución de la electrónica de potencia ha adquirido impulso desde fines de la década de 1980 y a principios de 1990.

### ***1.2.2 Definiciones***

Según NICOLA, Tesla (1885, Pág. 113) define la expresión electrónica de potencia se utiliza para diferenciar el tipo de aplicación que se le da a dispositivos electrónicos, en este caso para transformar y controlar voltajes y corrientes de niveles significativos. Se diferencia así este tipo de aplicación de otras de la electrónica denominadas de baja potencia o también de corrientes débiles.

Según GUALDA, Juan Andrés (1997, pág. 53), dice que se denomina electrónica de potencia a la rama de la ingeniería eléctrica que consigue adaptar y transformar la electricidad, con la finalidad de alimentar otros equipos, transportar energía, controlar el funcionamiento de máquinas eléctricas.

MUHAMMAD, Rashid (1995, pág 1), define como las aplicaciones de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica.

De tal manera se define a la electrónica de potencia como una alternativa para adaptar y convertir la energía eléctrica, con el objetivo de controlar máquinas eléctricas.

### ***1.2.3 Dispositivos Semiconductores de Potencia***

Desde que se desarrolló el primer tiristor de SCR a finales de 1957, ha habido progresos impresionantes en los dispositivos semiconductores de potencia. Hasta 1970, los tiristores convencionales se habían usado exclusivamente para el control de potencia en aplicaciones industriales. A partir de 1970 se desarrollaron varios tipos de dispositivos semiconductores de potencia, que entraron al comercio, los que se fabrican, ya sea con silicio o con carburo de silicio. Sin embargo, los dispositivos de carburo de silicio todavía están en desarrollo, y la mayor parte de los dispositivos se fabrican con silicio. Estos dispositivos se pueden dividir en forma general en tres clases:

- Diodos de potencia,
- Transistores y
- Tiristores.

También se pueden dividir en general en cinco tipos:

- Diodos de potencia
- Tiristores
- Transistores de unión bipolar (BJT, de sus siglas en inglés bipolar junction transistors)
- Transistores de efecto de campo de óxido de metal semiconductor (MOSFET, de sus siglas en inglés Metal oxide semiconductor field-effect transistors) y
- Transistores bipolares de compuerta aislada (IGBT, de sus siglas en inglés insulated-gate bipolar transistors), como se muestra en el figura 1.1



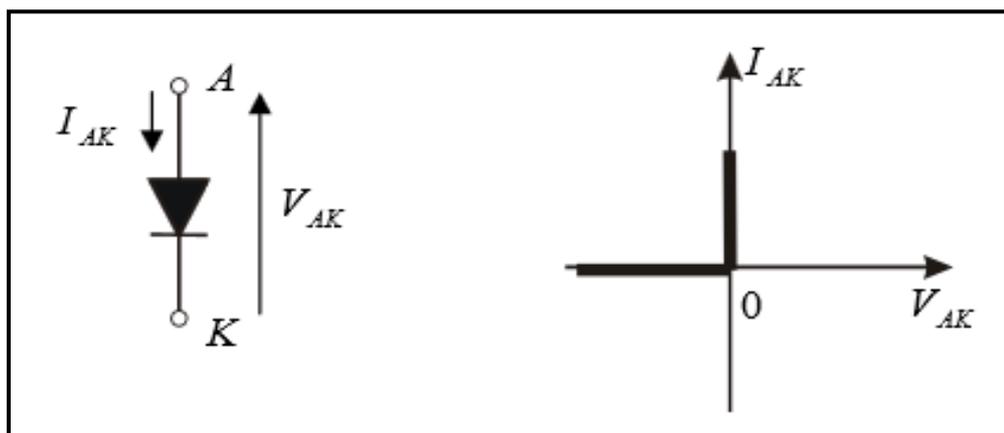
### 1.2.3.1 Diodos semiconductores de Potencia

Según MUHAMMAD, Rashid (1995, pág. 31) manifiesta que “Un diodo funciona como interruptor que efectúa diversas funciones, como por ejemplo, conmutadores en rectificadores, corrida libre en reguladores conmutados, inversión de carga de capacitor y transferencia de energía entre componentes, aislamiento de voltaje, regreso de energía, de la carga a la fuente de alimentación, y recuperación de la energía atrapada”.

Según Diodos de Potencia [en línea] dice que, los diodos semiconductores de potencia “Son dispositivos unidireccionales, no pudiendo circular la corriente en sentido contrario al de conducción”

Es decir, los diodos semiconductores de potencia son elementos unidireccionales cuyo procedimiento de control es invertir el voltaje entre ánodo y cátodo, soportando en un estado de conducción una alta intensidad con una pequeña caída de tensión. En la figura No. 1.2 se muestra el símbolo correspondiente al diodo, así como su curva v-i.

**FIGURA No. 1.2 SÍMBOLO DEL DIODO**



**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
**Elaborado:** Grupo de Tesistas

#### ***1.2.3.1.1 Características del diodo***

MUHAMMAD, Rashid (1995, pág. 20-21) Un diodo de potencia es un dispositivo de unión pn con dos terminales. Una unión pn se forma, en el caso normal, por aleación, difusión y crecimiento epitaxial. Las técnicas modernas de control de los procesos de difusión y epitaxiales permiten obtener las características deseadas en el dispositivo. Muestra un corte de una unión y el símbolo del diodo.

Cuando el potencial es positivo con respecto al cátodo, se dice que el diodo está polarizado directo, y conduce electricidad. Un diodo conductor tiene una caída directa de voltaje a través de él relativamente pequeña; la magnitud de esta caída depende del proceso de manufactura y de la temperatura de la unión. Cuando el potencial del cátodo es positivo con respecto al del ánodo, se dice que el diodo está polarizado inverso.

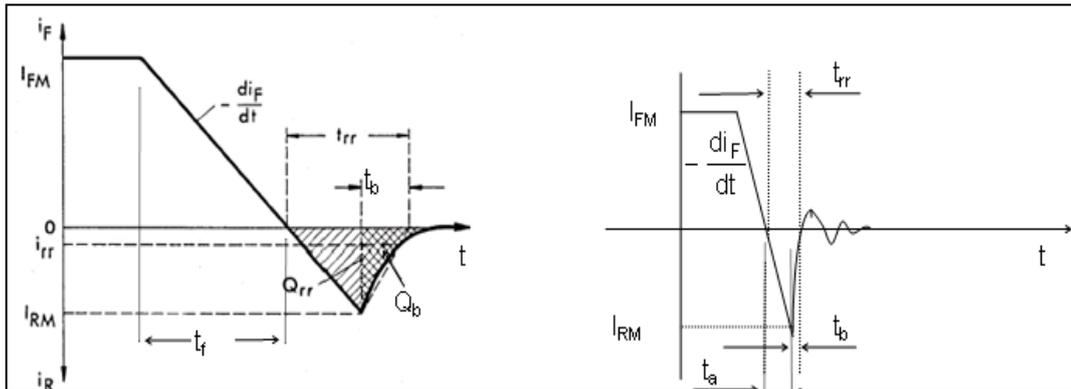
Bajo condiciones de polarización inversa; pasa una corriente pequeña inversa (que también se llama corriente de fuga o corriente de pérdida), en del orden de micro o mili amperes; esta corriente de fuga aumenta de magnitud en forma paulatina hasta que se llega al voltaje de avalancha o de Zener. Muestra las características  $v-i$  de estado permanente para un diodo. Para la mayor parte de los fines prácticos, se puede considerar que un diodo es un interruptor ideal.

#### ***1.2.3.1.2 Características de Recuperación Inversa***

MUHAMMAD, Rashid (1995, pág. 23) La corriente, en un diodo de unión con polarización directa, se debe al efecto neto de los portadores de mayoría y de minoría. Una vez que un diodo está en modo de conducción directa, ya continuación su corriente en sentido directo se reduce a cero (por el comportamiento natural del circuito del diodo, o por la aplicación de un voltaje en sentido inverso), el diodo continúa conduciendo, por los portadores de minoría que quedan almacenados en la unión pn y en la masa del material semi conductor.

Los portadores de minoría requieren determinado tiempo para recombinarse con cargas opuestas y quedar neutralizados. A este tiempo se le llama tiempo de recuperación en sentido inverso, o tiempo de recuperación inversa del diodo, como se ve en la figura 1.3.

**FIGURA No. 1.3 RECUPERACIÓN INVERSA**



**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
**Elaborado:** Grupo de Tesistas

El tiempo de recuperación inversa  $t_{rr}$ ; se puede definir como el intervalo de tiempo entre el instante en que la corriente pasa por cero durante el cambio de conducción directa a la condición de bloqueo inverso, y el momento en que la corriente en sentido inverso ha bajado hasta el 25% de su valor pico  $I_{RR}$ . La variable  $t_{rr}$ ; depende de la temperatura de la unión, de la velocidad de caída de la corriente en sentido directo, así como la corriente en sentido directo antes de la conmutación,  $I_F$ .

La carga de recuperación inversa  $Q_{RR}$  es la cantidad de portadores de carga que atraviesa al diodo en el sentido dirección inversa, debida a un cambio de conducción directa a una condición de bloqueo inverso. Su valor se determina con el área encerrada por la trayectoria de la corriente de recuperación inversa.

### ***1.2.4. Tipos de diodos de potencia***

Según MUHAMMAD, Rashid (1995, pág. 25) En el caso ideal, un diodo no debería tener tiempo de recuperación inversa. Sin embargo, el costo de fabricación de ese diodo podría aumentar. En muchas aplicaciones no son importantes los efectos del tiempo de recuperación inversa y se pueden usar diodos poco costosos. Dependiendo de las características de recuperación y de las técnicas de manufactura, los diodos de potencia se pueden clasificar en las tres categorías siguientes:

- Diodos normales, de propósito general
- Diodos de recuperación rápida
- Diodos de Schottky

#### ***1.2.4.1. Diodos de propósito general***

Los diodos rectificadores de propósito (o uso) general tienen un tiempo de recuperación inversa relativamente grande, en el caso típico de unos 25 $\mu$ s, y se usan en aplicaciones de baja velocidad, donde no es crítico el tiempo de recuperación (por ejemplo, en rectificadores y convertidores de diodo, para aplicaciones con una frecuencia de entrada baja, hasta de 1kHz, y para convertidores conmutados por línea). Esos diodos cubren especificaciones de corriente desde menos de 1A y hasta varios miles de amperes, y las especificaciones de voltaje van de 50 V hasta 5 kV. En general, esos diodos se fabrican por difusión. Sin embargo, los tipos de rectificadores de aleación que se usan en las fuentes de poder para soldar, son lo más económicos y robustos, y sus capacidades pueden llegar hasta 1500 V, 400 A.

#### ***1.2.4.2. Diodos de recuperación rápida***

Los diodos de recuperación rápida tienen tiempo de recuperación corto, en el caso normal menor que 5  $\mu$ s. Se usan en circuitos convertidores de CC a CC y de CC a

CA, donde con frecuencia la velocidad de conmutación tiene importancia crítica. Esos diodos abarcan especificaciones actuales de voltaje desde 50 V hasta unos 3 kV, y de menos de 1A hasta cientos de amperes. Para voltajes nominales mayores que 400 V, los diodos de recuperación rápida se suelen fabricar por difusión, y el tiempo de recuperación se controla por difusión de platino o de oro. Para especificaciones de voltaje menores que 400 V, los diodos epitaxiales proporcionan velocidades mayores de conmutación que las de los diodos por difusión.

#### ***1.2.4.3. Diodos Schottky***

El problema de almacenamiento de carga de una unión pn se puede eliminar o minimizar en un diodo de Schottky. Esto se logra estableciendo un "potencial de barrera" (o "barrera de potencial") con un contacto entre un metal y un semiconductor. Se deposita una capa de metal sobre una capa delgada epitaxial de silicio tipo n. La barrera de potencial simula el comportamiento de una unión pn. La acción rectificadora sólo depende de los portadores de mayoría, y en consecuencia no queda exceso de portadores de minoría que se recombinen. El efecto de recuperación sólo se debe a la capacitancia propia de la unión del semiconductor.

La carga recuperada de un diodo Schottky es mucho menor que la de un diodo equivalente de unión pn. Ya que eso sólo se debe a la capacitancia de la unión, es bastante independiente de  $di/dt$  inversa (pico negativo de la intensidad). Un diodo de Schottky tiene una caída de voltaje relativamente baja en sentido directo. La corriente de fuga de un diodo Schottky es mayor que la de un diodo de unión pn. Un diodo Schottky con voltaje de conducción relativamente bajo tiene una corriente algo alta, y viceversa. El resultado es que el voltaje máximo admisible para este diodo se limita en general a 100 V. Las especificaciones de corriente de los diodos Schottky varían de 1 a 400 A. Son ideales para fuentes de alimentación de gran corriente y alto voltaje de CC. Sin embargo, esos diodos también se usan en fuentes de poder de poca corriente, para tener mayor eficiencia.

### ***1.3 Tiristores***

Según la Universidad de Guadalajara (2011, Pág. 1) define como “Uno de los tipos más importantes de los dispositivos semiconductores de potencia. Los tiristores se utilizan en forma extensa en los circuitos electrónicos de potencia. Se operan como conmutadores biestables, pasando de un estado no conductor a un estado conductor. Para muchas aplicaciones se puede suponer que los Tiristores son interruptores o conmutadores ideales, aunque los tiristores prácticos exhiben ciertas características y limitaciones”.

Según MUHAMMAD, Rashid (1995, pág. 304) dice que “Los tiristores son una familia de dispositivos semiconductores de potencia. Se usan mucho en circuitos electrónicos de potencia. Se manejan como interruptores biestables, que funcionan de un estado no conductor a un estado conductor.

Se concluye que los Tiristores son semiconductores esenciales para los módulos de potencia llamados comúnmente interruptores los cuales dan paso a la energía con características específicas y limitaciones.

Un tiristor tiene tres terminales: un ánodo, un cátodo y una compuerta. Cuando se hace pasar una corriente pequeña por la terminal de la compuerta, hacia el cátodo, el tiristor conduce siempre que la terminal del ánodo tenga mayor potencial que el cátodo. Una vez que un tiristor está en modo de conducción, el circuito de la compuerta no tiene control, y el tiristor continúa conduciendo.

Cuando un tiristor está en modo de conducción, la caída de voltaje directo es muy pequeña, en forma característica de 0.5 a 2 V. Un tiristor que conduce se puede apagar haciendo que el potencial del ánodo sea igualo menor que el potencial del cátodo.

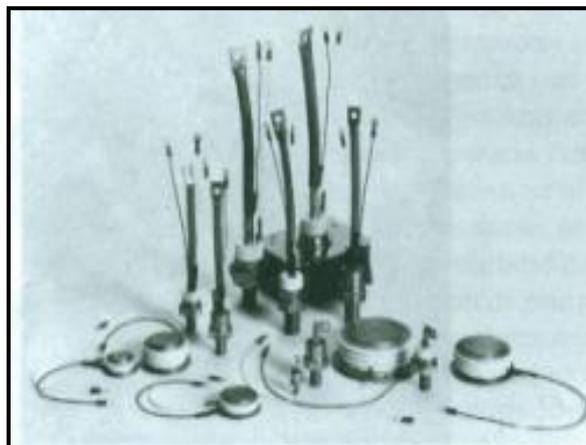
## FIGURA No. 1.4 CONFIGURACIÓN DE TIRISTORES



**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
**Elaborado:** Grupo de Tesistas

Los tiristores conmutados por línea se apagan (o desactivan o bloquean) debido a la naturaleza senoidal del voltaje de entrada, y los tiristores de conmutación forzada se apagan con un circuito adicional, llamado circuito de conmutación. En la figura # 1.5 muestra diversas configuraciones de tiristores con control de fase (o conmutados por línea): borne, disco, plano y clavija. Los tiristores naturales, o conmutados por línea se consiguen con capacidades hasta 6000 V, 4500 A. El tiempo de abertura de los tiristores de alta velocidad y bloqueo inverso ha mejorado bastante, y es posible tener de 10 a 20  $\mu$ s en un tiristor para 3000 V y 3600 A. El tiempo de abertura se define como el intervalo de tiempo entre el instante en el que la corriente principal baja a cero después de una interrupción externa del circuito de voltaje principal, y el instante cuando el tiristor es capaz de sostener un voltaje principal de respaldo especificado sin encenderse.

## FIGURA No. 1.5 CONFIGURACIONES DE TIRISTORES

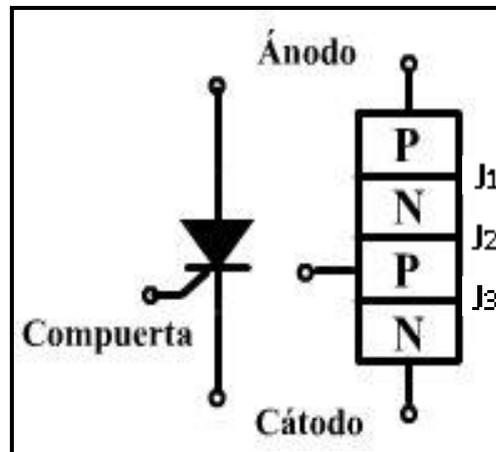


**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
**Elaborado:** Grupo de Tesistas

### 1.3.1. Características de los Tiristores

GONZÁLES URQUIZA, Arturo [en línea] indica que, un tiristor es un dispositivo semiconductor con cuatro capas, de estructura pnpn, con tres uniones pn. Tiene tres terminales: ánodo, cátodo y compuerta. La figura No. 1.6 muestra el símbolo del tiristor y el corte de las tres uniones pn. Los tiristores se fabrican por dispersión difusión.

FIGURA No. 1.6 SIMBOLO DEL TIRISTOR Y SUS UNIONES



Fuente: Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
Elaborado: Grupo de Tesistas

La caída de voltaje se debe a la caída óhmica en las cuatro capas, y es pequeña, normalmente de 1V. En el estado de conducción, la corriente anódica se limita por una impedancia externa, o una resistencia  $R_L$ . La corriente anódica debe ser mayor que un valor llamado corriente de retención  $I_L$  para mantener el flujo necesario a través de la unión caso contrario el dispositivo regresa a la condición de bloqueo, cuando se reduce el voltaje de ánodo a cátodo. La corriente de retención  $I_L$  es la corriente anódica mínima necesaria para mantener al tiristor en estado de encendido, inmediatamente después de haberse activado y retirar la señal de la compuerta, se ve una característica  $v-i$  típica de un tiristor. Una vez que un tiristor conduce, se comporta como diodo conductor y no hay control sobre el dispositivo y éste continúa conduciendo porque no hay capa de transición en la

unión  $J_2$  debido a los movimientos libres de las portadoras. Sin embargo, si la corriente en sentido directo del ánodo se reduce por debajo de un nivel conocido como corriente de retención  $I_H$ , se desarrolla una región de transición alrededor de la unión  $J_2$  debido al número reducido de portadoras y el tiristor está en el estado de bloqueo. La corriente de retención está en el orden de mili amperes y es menor que la corriente de mantenimiento  $I_L$ . Es decir,  $I_L > I_H$ . La corriente de retención  $I_H$  es la corriente mínima de ánodo para mantener al tiristor en el estado de encendido. La corriente de retención es menor que la corriente de mantenimiento.

### ***1.3.2. Activación del Tiristor***

Según Electrónica, Activación del Tiristor [en línea] Un tiristor se enciende, aumentando la corriente anódica. Esto se hace de una de las siguientes maneras.

**Térmica.** Si la temperatura de un tiristor es alta, hay un aumento en la cantidad de pares electrón-hueco, que aumenta las corrientes de fuga. Este aumento en las corrientes hace aumentara  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  Debido a la acción regenerativa,  $\alpha_1 + \alpha_2$  puede tender a la unidad, y el tiristor se puede activar. Este tipo de activación puede causar avalancha térmica, y en el caso normal se evita.

**Luz.** Si se deja incidir luz en las uniones de un tiristor, aumentan los pares electrón-hueco y el tiristor puede activarse. Los tiristores activados con luz se encienden dejando que la luz incida sobre la lámina de silicio.

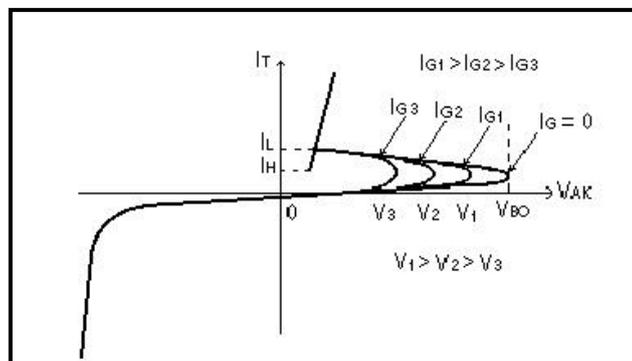
**Alto voltaje.** Si el voltaje en sentido directo, de ánodo a cátodo, es mayor que el voltaje de ruptura en sentido directo  $V_{BO}$ , pasa una corriente de fuga suficiente para iniciar la activación regenerativa. Esta clase de activación es destructiva, y se debe evitar.

**dv/dt.** La rapidez de aumento del voltaje ánodo-cátodo es alta, la corriente de carga de las uniones capacitivas puede bastar para activar el tiristor. Un valor alto de la corriente de carga puede dañar al tiristor, y se debe proteger contra una alta

tasa  $dv/dt$ . Los fabricantes especifican la tasa  $dv/dt$  máxima admisible en sus tiristores.

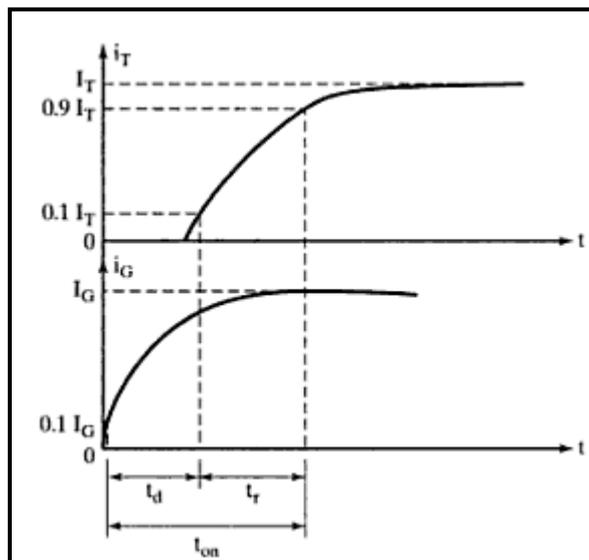
**Corriente de compuerta.** Si un tiristor está polarizado en sentido directo, la inyección de corriente de compuerta al aplicar voltaje de compuerta positivo, enciende al tiristor. Al aumentar la corriente de compuerta, disminuye el voltaje de bloqueo en sentido directo como se ve en la figura 1.7.

**FIGURA No. 1.7 EFECTOS DE LA CORRIENTE DE COMPUERTA**



Fuente: Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
Elaborado: Grupo de Tesistas

**FIGURA No. 1.8 CARACTERÍSTICAS DE ENCENDIDO**



Fuente: Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
Elaborado: Grupo de Tesistas

Como se muestra en la figura No. 1.8 la forma de onda de la corriente anódica, que sigue a la aplicación de la señal de compuerta. Hay un retardo llamado tiempo de encendido,  $t_{on}$ , entre la aplicación de la señal a la compuerta y la conducción de un tiristor. Se define a  $t_{on}$  como el intervalo de tiempo entre el 10% de la corriente de compuerta en estado estable ( $0.1I_G$ ) y 90% de la corriente en el tiristor, en estado de encendido ( $0.9I_T$ ).  $t_{on}$  es la suma del tiempo de retardo  $t_d$  y el tiempo de  $t$ , se define a  $t_d$  como el intervalo de tiempo entre 10% de la corriente de compuerta ( $0.1I_G$ ) y 10% de la corriente en el estado de encendido ( $0.1I_T$ ) Es el tiempo necesario para que la corriente del ánodo suba de 10% de la corriente de estado de encendido ( $0.1I_T$ ) al 90% de la corriente de estado de encendido ( $0.9I_T$ ).

Se deben tener en cuenta los siguientes puntos para diseñar el circuito de control de compuerta.

- La señal de compuerta debe retirarse después que haya encendido el tiristor. Una señal de control continua aumentaría la pérdida de potencia en la unión de la compuerta.
- Aunque el tiristor está polarizado en sentido inverso, no debe haber señal de compuerta, porque de lo contrario puede fallar a causa de un aumento en la corriente de fuga.
- El ancho del pulso en la compuerta  $t_G$  puede ser mayor que el tiempo necesario para que la corriente anódica aumente hasta el valor de la corriente de retención  $I_H$ . En la práctica, el ancho  $t_G$  del pulso se hace, en el caso normal, mayor que el tiempo de activación  $t_{on}$  del tiristor.

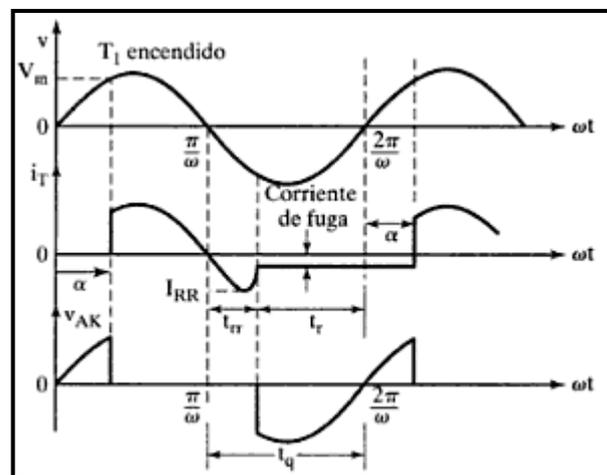
### ***1.3.3. Apagado del Tiristor***

Un tiristor que está en el estado encendido puede apagarse reduciendo la corriente en sentido directo hasta un valor inferior al de la corriente de retención  $I_H$ . Hay

varias técnicas para apagar un tiristor. En todas las técnicas de conmutación, la corriente anódica se mantiene inferior a la corriente de retención durante un tiempo suficientemente largo para que todo el exceso de portadores en las cuatro capas fluyan o se recombinen.

Debido a las dos uniones pn exteriores,  $J_1$  y  $J_3$ , las características de apagado serían semejantes a las de un diodo, con un tiempo  $t_{rr}$ , de recuperación inverso y una corriente pico  $I_{RR}$  de recuperación inversa.  $I_{RR}$  puede ser mucho mayor que la corriente normal de bloqueo inverso  $I_R$ . En un circuito convertidor conmutado en línea, donde el voltaje de entrada es alterno, como se ve en el figura No. 1.9, aparece un voltaje en sentido inverso a través del tiristor inmediatamente después que la corriente en sentido directo pasa por el valor cero. Este voltaje en sentido inverso acelera el proceso de apagado, arrastrando el exceso de portadores de las uniones pn,  $J_1$  y  $J_3$ .

**FIGURA No. 1.9 APAGADO DEL TIRISTOR**



**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
**Elaborado:** Grupo de Tesistas

El tiempo de apagado  $t_q$  es la suma del tiempo de recuperación inverso  $t_{tr}$ ; y el tiempo de recombinación  $t_{rc}$ . Al final del apagado se forma una capa de agotamiento a través de la unión  $J_2$ , y el tiristor recupera su capacidad de oponerse

al voltaje en sentido directo. En todas las técnicas de conmutación, se aplica un voltaje en sentido inverso a través del tiristor, durante el proceso de apagado.

El tiempo de apagado,  $t_q$ , es el valor mínimo del intervalo entre el momento en que la corriente en estado de encendido ha bajado a cero, y el momento en que el tiristor es capaz de resistir el voltaje en sentido directo, sin encenderse. El tiempo  $t_q$  depende del valor pico de la corriente en estado encendido y el voltaje instantáneo de encendido.

La carga de recuperación inversa,  $Q_{RR}$ , es la cantidad de carga que se debe recuperar durante el proceso de apagado. Su valor lo determina el área de la trayectoria de la corriente de recuperación inversa. El valor de  $Q_{RR}$  depende de la rapidez de bajada de la corriente de encendido y el valor pico de la corriente de encendido, antes de apagar.  $Q_{RR}$  es causa de la pérdida correspondiente de energía en el interior del dispositivo.

#### ***1.3.4. Tipos de Tiristores***

Los tiristores se fabrican por difusión, casi en forma exclusiva. La corriente anódica requiere un tiempo finito para propagarse hasta toda el área de la unión, desde el punto cercano a la compuerta, cuando se inicia la señal de compuerta para encender el tiristor. Los fabricantes usan diversas estructuras de compuerta para controlar la  $di/dt$ , el tiempo de encendido y el tiempo de apagado.

Los tiristores pueden encenderse con facilidad con un impulso corto. Para apagarlos, requieren circuitos especiales de control, o estructuras internas especiales para auxiliar en el proceso de apagado. Hay varias versiones de tiristores con capacidad de apagado, y el objetivo de todo dispositivo nuevo es mejorar la posibilidad de apagado. Con el advenimiento de nuevos dispositivos con posibilidades tanto de encender como de apagar, el dispositivo que sólo tiene posibilidad de encenderse llama "tiristor convencional" o sólo "tiristor". Otros miembros de la familia de tiristor, o rectificadores controlados de silicio (SCR, de silicon-controlled rectifier) han adquirido otros nombres, basados en acrónimos.

Dependiendo de la construcción física y el comportamiento en el encendido y el apagado, se pueden clasificar los tiristores, en forma amplia, en 13 categorías:

- Tiristores controlados por fase (o SCR).
- Tiristores bidireccionales controlados por fase (BCT, de bidirectional phase-controlled thyristors).
- Tiristores de conmutación rápida (o SCR).
- Rectificadores controlados de silicio foto activados (LASCR, light-activated silicon-controlled rectifier).
- Tiristores de triodo bidireccional (TRIAC).
- Tiristores de conducción en sentido inverso (RCT, de reverse-conducting thyristor).
- Tiristores apagados por compuerta (GTO).
- Tiristores controlados por FET (FET-CTH, de FET-controlled thyristor).
- Tiristores de apagado por MOS (MTO, de MOS turn-off).
- Tiristores de apagado (control) por emisor (ETO, de emitter turn-off).
- Tiristores conmutados por compuerta integrada (IGCT, de integrated gate-commutated thyristors).
- Tiristores controlados por MOS (MCT, de MOS-controlled thyristor).
- Tiristores de inducción estática (SITR, de static induction thyristor).

#### ***1.3.4.1 Tiristores controlados por fase***

Esta clase de tiristores suele funcionar a la frecuencia de línea, y se apagan por conmutación natural. Un tiristor inicia la conducción en sentido directo, cuando se aplica un pulso de disparo de corriente de la compuerta al cátodo, y se llega y se mantiene con rapidez a la conducción total, con una caída pequeña de voltaje en sentido directo. No puede hacer que su corriente regrese a cero mediante una señal en su compuerta; en lugar de ello, se basa en el comportamiento natural del circuito para que la corriente llegue a cero. Cuando la corriente anódica baja a cero, el tiristor recupera su capacidad en unas pocas decenas de microsegundos de voltaje de bloqueo en sentido inverso, y puede bloquear la corriente en sentido

directo hasta que se aplique el siguiente pulso de encendido. El tiempo de apagado  $t_q$  es del orden de 50 a 100  $\mu$ s. Es más adecuado para aplicaciones con conmutación de baja velocidad, y también se le llama tiristor convertidor.

Como un tiristor es básicamente un dispositivo controlado hecho de silicio, también se le llama rectificador controlado de silicio (SCR).

Debido a su bajo costo, alta eficiencia, robustez y especificación de alto voltaje y corriente, esos tiristores se usan mucho en los convertidores de cd - ca, con suministro de 50 o 60 Hz, y en aplicaciones económicas, donde la capacidad de apagado no es un factor importante.

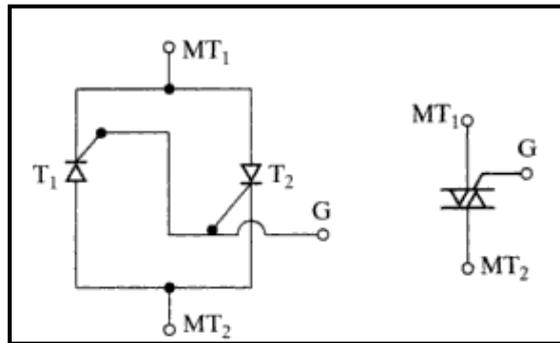
Con frecuencia esa capacidad no ofrece ventajas suficientes para justificar los mayores costos y pérdidas de los dispositivos. Se usan en casi todas las transmisiones de cd en alto voltaje (RVDC) y en un gran porcentaje de aplicaciones industriales

#### ***1.3.4.2 Tiristores de triodo bidireccional (TRIAC)***

Como un TRIAC es un dispositivo bidireccional, no se puede decir que sus terminales sean ánodo y cátodo. Si la terminal  $MT_2$  es positiva con respecto a la terminal  $MT_1$ , el TRIAC se puede encender aplicando una señal positiva entre la compuerta G y la terminal  $MT_1$ . Si la terminal  $MT_2$  es negativa con respecto a la terminal  $MT_1$ , se enciende aplicando una señal negativa entre la compuerta G y la terminal  $MT_1$ . No es necesario tener las dos polaridades de señal de compuerta, y un TRIAC se puede encender con una señal de compuerta que puede ser positiva o negativa. En la práctica, las sensibilidades varían de uno a otro cuadrante, y los TRIAC se suelen operar en el cuadrante  $I^+$  (voltaje de compuerta y corriente de compuerta positivos), o en el cuadrante  $III^-$  (voltaje y corriente de compuerta negativos).

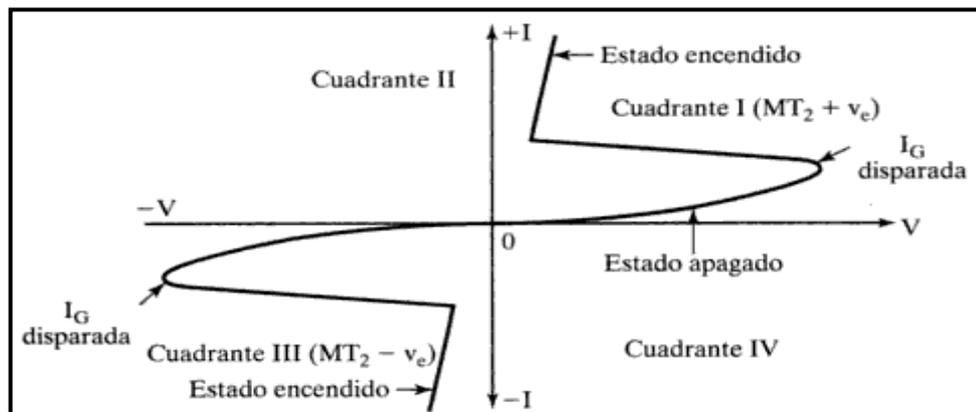
Un TRIAC se lo puede considerar como dos SCR conectados en anti paralelo con una conexión de compuerta común, como se ve en la figura No. 1.10, las características  $v-i$  se ven en la figura No. 1.11

**FIGURA No. 1.10 EQUIVALENTE Y SIMBOLO DEL TRIAC**



Fuente: Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
Elaborado: Grupo de Tesistas

**FIGURA No. 1.11 CARACTERISTICAS DE UN TRIAC**



Fuente: Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
Elaborado: Grupo de Tesistas

## 1.4 Convertidores Electrónica de Potencia

De acuerdo a MOHAN, Ned (2010; Pág. 71), menciona que “Estos rectificadores consumen corriente muy distorsionada de la fuente de alimentación principal. Hoy en día, e incluso más en el futuro, las normas y lineamientos sobre armónicos limitarán la cantidad de distorsión de corriente que se permiten entrar en la

electricidad suministrada por las compañías generadoras, y quizá no se permitan los rectificadores de diodo sencillo.

Según CONVERTIDORES [en línea] dice que los convertidores de corriente alterna, en forma genérica, “Acepta la energía eléctrica de un sistema y la convierte para su entrega a otro sistema de corriente alterna con formas de onda de amplitud diferente, frecuencia y fase. Pueden ser de una o tres fases, en función de sus clasificaciones de poder”.

CANTELI, Mañana Mario [en línea], Un convertidor de energía es un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes. Por ejemplo, obtener corriente continua a partir de corriente alterna. El concepto inicial de convertidor puede extenderse para incluir aspectos como: eficiencia, reversibilidad, grado de idealidad, fiabilidad, volumen o tecnología por citar las más importantes.

En consecuencia los convertidores de electrónica de potencia son los circuitos que transforman la energía entre su entrada y salida con la finalidad de alimentar controladamente otros equipos, transformar la energía eléctrica de continua a alterna o viceversa y controlar la velocidad.

#### ***1.4.1. Tipos de convertidores***

Los convertidores pueden clasificarse según diferentes criterios. Uno de los más comúnmente utilizados es agruparlos según el formato de las energías de entrada y salida. Básicamente y según este criterio pueden establecerse cuatro grandes grupos:

Convertidores CA/CC o rectificadores. Este tipo de convertidores transforman corriente alterna, monofásica o trifásica, en continua. Desde el punto de vista de los accionamientos, presentan una importancia fundamental, ya que se utilizan de forma general en las máquinas siguientes:

- Máquina de corriente continua. Alimentación tanto del circuito de excitación como del inducido.
- Máquina asíncrona. El control, tanto escalar como vectorial de velocidad en la máquina asíncrona se realiza mediante algún tipo de convertidor CC/CA que necesita como fuente de alimentación una tensión continua. Otra aplicación de este tipo de convertidores es el frenado de los motores asíncronos.
- Máquina síncrona. La utilización de los convertidores CA/CC en la máquina síncrona se dirigen a dos grandes grupos de aplicación. En el caso de los generadores síncronos, es necesario contar con una corriente continua para la excitación de la máquina. Desde el punto de vista de su utilización como motor, es necesario contar con un convertidor CA/CC para el control de la excitación, y en aquellos casos en que se realice un control de velocidad de la máquina, será necesario contar con una etapa rectificadora como paso previo para atacar el convertidor CC/CA que alimentará la máquina a tensión y frecuencia variables. Destacar asimismo el campo de los generadores síncronos de pequeña y media potencia que funcionan en un régimen de velocidad muy variable, como pueden ser los generadores eólicos. En este tipo de aplicaciones es común utilizar un convertidor CA/CC para transformar la energía generada en continua como paso previo a la transformación CC/CA de la misma para su acoplamiento a un sistema eléctrico de frecuencia y tensión fijas.
- Motores especiales. Algunas máquinas como los motores paso a paso necesitan una fuente de corriente continua que debe conmutarse adecuadamente para conseguir su control. Lo mismo sucede con algunas máquinas de tipo brushless (sin escobillas) que requieren una fuente de corriente continua como paso previo para alimentar un convertidor CC/CA.
- Convertidores CC/CC. Este tipo de convertidores transforman un determinado valor de corriente continua de entrada en uno distinto de salida, con la

posibilidad de incluir, además, aislamiento galvánico entre entrada y salida. Desde el punto de vista de los accionamiento su campo de aplicación es el mismo que el de los convertidores CA/CC, con la diferencia de que la fuente de energía no es alterna, sino continua. Su utilización se restringe a sistemas embarcados, donde la distribución de energía se realiza en corriente continua, o en algunas situaciones especiales, su utilización combinada con los rectificadores no controlados permite diseñar convertidores CA/CC con un mejor factor de potencia.

### **Elemento ideal**

Como se ha visto al principio del tema, la idea básica de un convertidor de potencia es transformar el flujo de energía entre su entrada y salida. Para poder realizar dicha transformación, es necesario contar con interruptores controlados que tengan las siguientes características:

$R = (off) = \infty$ . Presenta una resistencia infinita entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de bloqueo.

$R = (on) = 0$ . Presenta una resistencia nula entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de conducción.

$t_{off \rightarrow on} = 0$ . El tiempo para la conmutación del estado de bloqueo al estado de conducción es nulo.

$t_{on \rightarrow off} = 0$ . El tiempo para la conmutación del estado de conducción al estado de bloqueo es nulo.

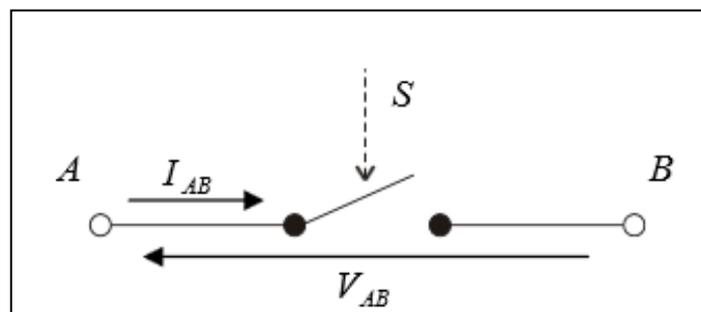
$v_{off,max} = \infty$ . Soporta una tensión infinita entre sus terminales cuando se encuentra en el estado de bloqueo.

$I_{off,max} = \infty$ . Soporta una intensidad de paso infinita cuando se encuentra en el estado de conducción.

$I_{on,max} = \infty$ . La potencia consumida por el circuito de control es nula.

Desde un punto de vista circuital, el elemento ideal se caracteriza por un interruptor controlado, tal como muestra la figura 1.12. Como puede observarse, presenta tres terminales: dos terminales de conexión y un tercero de control.

**FIGURA No. 1.12 ESQUEMA ELÉCTRICO**



Fuente: Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
Elaborado: Grupo de Tesistas

Eléctricamente, los dispositivos se caracterizan por una curva que relaciona la intensidad de conducción con la tensión entre terminales de conexión. Tal como se han definido los terminales en la figura anterior, las curvas v-i del elemento ideal para los dos estados de conducción son las que se muestran a continuación, donde se ha considerado como positiva la circulación de la intensidad en el sentido AB. Se considera positiva la tensión AB.

#### **1.4.2 Representación en el dominio del tiempo**

Según CANTELI, Mañana Mario [en línea], La representación de señales periódicas en el dominio del tiempo hace alusión a su caracterización mediante parámetros que se obtienen de expresiones que utilizan la formulación temporal de la señal o muestras instantáneas de la misma obtenida según el teorema de muestreo de Nyquist. Se trata, en general, de parámetros con una interpretación

geométrica directa, existen parámetros que pueden calcularse mediante procedimientos distintos, aunque equivalentes.

En la tabla 1.1 se resumen los parámetros más importantes que pueden obtenerse utilizando la representación temporal de la señal. Las expresiones que utilizan la integral para su evaluación pueden aplicarse también sobre secuencias de muestras cambiando la integral por un sumatorio.

**TABLA No. 1. 1 PARÁMETROS MÁS IMPORTANTES**

Parámetro	Formulación
Valor medio $x_{\text{medio}}$	$x_{\text{medio}} = \frac{1}{T_0} \int_{T_0} x(t) dt$
Valor eficaz $x_{\text{rms}}$	$x_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \int_{T_0} x^2(t) dt}$
Valor pico $x_p$	$x_p = \max\{x(t)\}$
Valor pico a pico $x_{pp}$	$x_{pp} = \max\{x(t)\} - \min\{x(t)\}$
Valor pico distorsión $d_p$	$d_p = \max\{x(t) - \sqrt{2} \ X_1\  \cos(\omega t + \varphi_1)\}$
Derivada máxima ( $x'_{\text{max}}$ )	$x'_{\text{max}} = \max\left\{\frac{dx(t)}{dt}\right\}$
Factor de cresta FC	$FC = \frac{x_p}{x_{\text{rms}}}$
Máximo desequilibrio de amplitud	$DAM = \frac{x_{pp}}{x_p}$
Factor de forma (FF)	$FF = \frac{x_{\text{rms}}}{x_{\text{medio}}}$

**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia  
**Elaborado:** Grupo de Tesistas

### 1.4.3 Representación en el dominio de la frecuencia

La utilización de los parámetros presentados anteriormente, para caracterizar señales en el dominio del tiempo resulta útil en muchas aplicaciones.

Sin embargo, cuando la señal presenta un elevado nivel de distorsión, resulta más adecuado utilizar otros parámetros calculados a partir de la representación de la misma en el dominio de la frecuencia.

La representación de la señal en el dominio de la frecuencia se realiza empleando parámetros que se obtienen a partir del espectro de la señal, es decir, de los armónicos de la señal, que se obtienen mediante el desarrollo de la señal mediante

series de Fourier. En la tabla 1.2 se muestra un resumen de los parámetros más importantes, junto con su formulación.

**TABLA No. 1.2 DOMINIO DE FRECUENCIAS**

Parámetro	Formulación
Valor medio $X_{medio}$	$x_{medio} = \ X_0\ $
Valor eficaz $X_{rms}$	$X_{rms} = \sqrt{\sum_{h=0}^{\infty} \ X_h\ ^2}$

**Fuente:** Libro Introducción a la Electrónica de Potencia

**Elaborado:** Grupo de Tesistas

## 1.5. Sistemas Electrónicos de Potencia

Para ION, Etxeberria (2013; Pág. 15), define como “La energía eléctrica es esencial en nuestra sociedad, pero para que la podamos utilizar necesitamos controlarla y transformarla. La electrónica de potencia permite hacerlo de manera eficiente, segura y flexible, gracias a los convertidores de potencia que permiten adaptar la energía a las necesidades de las distintas aplicaciones.”.

JON ANDONI, Barrena (2010; Pág. 18), expresa que: “es un Sistema de suministro eléctrico cuyos niveles de tensión son iguales o superiores a los 132 kV”.

Es decir, los sistemas electrónicos de potencia pueden transformar y controlar voltajes y corrientes de niveles significativos, mediante la utilización de dispositivos electrónicos.

### 1.5.1 Importancia

Para el control de sistemas de potencia, es necesario realizar la conversión de potencia de una a otra forma, y que las características de conmutación de los dispositivos permitan estas conversiones. La mayoría de los sistemas de potencia consiste en 2 partes o módulos principales.

- Módulo de potencias
- Módulo de control

La parte de potencia maneja la transferencia de energía de la entrada hasta la salida, y los circuitos de control regulan la cantidad de energía (potencia) deseada a la salida. Los circuitos electrónicos de potencia se pueden clasificar en 4 tipos y sus diferentes aplicaciones.

### **Dispositivos de control para sistemas de potencia**

La mayoría de los sistemas como lámparas fluorescentes con balastos, motores con drivers de estado sólido, PCs, y aparatos electrodomésticos utilizan dispositivos de control, los cuales les ayuda a controlar el flujo de energía que se transfiere a la carga.

Estos tipos de dispositivos nos entregan alta eficiencia y variando el ciclo de trabajo del dispositivo de control se puede regular el voltaje de salida. Para realizar la parte de conmutación, existen varios dispositivos semiconductores.