



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa  
Dr. Antonio Núñez Jiménez  
Facultad Metalurgia-Electromecánica

## **Accionamiento eléctrico a través de un Rectificador monofásico semicontrolado, para el simulador de desgaste CMT2070-1.**

Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero eléctrico

**Autor:** Rajiv Hernández Labañino

**Tutor(es):** Dr: Luis Delfín Rojas Purón

M.Sc: José Miguel Mendoza Sierra

M.Sc: Maikel López Labañino

Moa – 2011  
“Año 53 de la revolución”



## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

**En decisión conjunta, el autor Rajiv Hernández Labañino y los tutores Dr.C Luis Delfín Rojas Purón, el M.Sc José Miguel Mendoza Sierra y el M.Sc Maikel López Labañino, certificamos nuestra propiedad intelectual en esta tesis con el título “Accionamiento eléctrico a través de un Rectificador monofásico semicontrolado, para el simulador de desgaste CMT2070-1” a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.**

Rajiv Hernández Labañino

Dr Luis Delfín Rojas Purón

M.Sc José Miguel Mendoza Sierra

Ms.C. Maikel López Labañino

## PENSAMIENTO

---

*Presencia de ánimo y valor en la adversidad valen para conquistar el éxito más que un ejército.*

*John Dryden*



## *Dedicatoria*

---

*Quiero dedicar este trabajo a mis familiares. A mis padres Ramón Gómez Pelier y Dignora Labañino Terrero. Mi querida hermana Dailín Gómez Pelier y muy especial A mí querida y estimada esposa. Felipa Canaviri Cayo a mis amigos Ronny y Robertico, A nuestra Revolución, por las posibilidades que me ofrece.*

## *Agradecimientos*

*A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.*

*A todos*

*Muchas Gracias.*

## *AGRADECIMIENTOS*

---

*Ante todo y de manera muy especial a mi madre Dignora por haber estado presente en toda las etapas de mi vida, a mi padre Ramón, a todos mis amigos que estuvieron cerca y al tanto de cuantos sucesos atravesé y en general a todos mis familiares incluyendo a aquellos que ya no están y que hubiesen querido verme graduado.*

*Además a mis tutores Dr.C: Luis Delfín Rojas Purón Msc. José Miguel Mendoza Sierra y el Msc: Maiquel López Labañino por su paciencia, apoyo y comprensión mostrada en el trayecto de estos seis años de formación como profesional.*

*Al Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz por posibilitarme estudiar en una revolución socialista donde el estudio es prioridad de toda persona y sin pedir nada más a cambio que el compromiso de ser cultos cada día más.*

*Y a Dios por abrirme cada puerta que se interpuso en mi camino.*

*A todos ustedes mis Agradecimientos;*

*Muchas Gracias*



## RESUMEN

---

En el presente trabajo, se diseña, se fabrica e instala un circuito rectificador semicontrolado para el accionamiento y control de la velocidad del motor de Corriente Directa de la máquina para experimentos tribológicos CMT2070-1 que se encuentra ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, la cual ha estado fuera de servicio por un largo periodo de tiempo, limitando los ensayos y pruebas de desgaste por fricción a materiales sólidos.

Con la aplicación de un conjunto de métodos de investigación científica se logra la consolidación de la investigación, se realiza la comprobación del circuito diseñado con la utilización del software Multisim 11, con el cual se obtienen las simulaciones evidenciando resultados satisfactorios, finalmente se procedió a la instalación del circuito fabricado obteniéndose el cumplimiento de las expectativas propuestas y el logro de los objetivos del trabajo.

## SUMMARY

---

In the present work, is designed, it is manufactured and it installs a circuit rectificador semicontrolado for the working and control the speed of the Direct Current motor to the machine for experiments tribológicos CMT2070-1 that is located in the laboratory of technical mensurations of the ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, which has been outside of service for a long period of time, limiting the rehearsals and waste tests for friction to solid materials.

With the application of a group of methods of scientific investigation the consolidation of the investigation is achieved, is carried out the confirmation of the circuit designed with the use of the software Multisim 11, with which the simulations are obtained evidencing satisfactory results, finally it proceeded to the installation of the manufactured circuit being obtained the execution of the proposed expectations and the achievement of the objectives of the work.

Contenido	PAG
<b>Introducción</b> .....	1
Capítulo I. Marco Teórico Conceptual.....	5
<hr/>	
<b>1.</b> Introducción.....	5
<b>I.1</b> Tribómetros para desgaste.....	5
<b>I.1.1</b> Caracterización del simulador de desgaste CMT 2070-1.....	6
<b>I.2</b> Características de la rectificación monofásica controlada.....	7
<b>I.2.1</b> Familia de convertidores estáticos.....	7
<b>I.2.2</b> Principios y antecedentes de la electrónica de potencia.....	8
<b>I.2.3</b> Tipos de rectificadores controlados.....	9
<b>I.2.4</b> Rectificadores a los que les bastan breves impulsos.....	13
<b>I.2.5</b> Aplicaciones de los convertidores electrónicos de potencia.....	14
<b>I.3</b> Criterios para la implementación de los accionamientos de M – CD...	16
<b>I.3.1</b> Finalidad del circuito de accionamiento.....	16
<b>I.3.2</b> Principales métodos de cálculo en rectificadores controlados.....	17
<b>I.4</b> Motor de CD como caso de estudio.....	21
<b>I.4.1</b> Principio de funcionamiento de las máquinas de CD.....	21
<b>I.4.2</b> Aspectos constructivos de las máquinas de CD.....	21
<b>I.4.3</b> Esquemas de conexión de las máquinas de CD.....	22
<b>I.4.4</b> Aplicación de las máquinas de CD referida al caso de estudio.....	25
<b>I.5</b> Metodología para la evaluación económica.....	26
<b>I.5.1</b> Métodos generales para evaluar inversiones.....	26
<b>I.5.2</b> Elementos de análisis para definir las ventajas y desventajas de los rectificadores.....	30
<b>I.6</b> Conclusiones Parciales Capítulo I.....	31
<b>Capítulo II. Materiales y métodos</b> .....	32
<b>II.1</b> Introducción.....	32
<b>II.1.1</b> Análisis del control de velocidad de un motor de CD.....	32
<b>II.1.2</b> Realimentación de velocidad o voltaje de armadura.....	33
<b>II.2.</b> Diseño de circuito de mando.....	34
<b>II.2.1</b> Partes componentes del esquema en bloque del rectificador.....	34
<b>II.2.2</b> Metodologías de cálculo para rectificadores monofásicos semicontrolado .....	42
<b>II.3</b> Simulación referida al caso de estudio.....	47
<b>II.3.1</b> Software utilizado en el caso de estudio.....	47
<b>II.3.2</b> Características de entrada y salida.....	50



II.4	Conclusiones Parciales.....	51
	<b>Capítulo III. Análisis de los Resultados Generales.....</b>	<b>52</b>
III.1	Introducción.....	52
III.1.1	Esquema de control y fuerza del circuito rectificador.....	53
III.1.2	Simulación del circuito rectificador semicontrolado.....	54
III.1.3	Funcionamiento del mando en marcha en vacío.....	55
III.1.4	Análisis de las condiciones con la carga.....	56
III.2	Disposición y montaje.....	56
III.2.1	Medidas de seguridad.....	56
III.2.2	Preparación para el trabajo.....	57
III.2.3	Mantenimiento técnico.....	57
III.3	Evaluación económica.....	58
III.3.1	Impacto económico.....	62
III.4	<b>Conclusiones Capítulo III.....</b>	<b>62</b>
	<b>CONCLUSIONES GENERALES.....</b>	<b>63</b>
	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>64</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>64</b>
	<b>ANEXOS</b>	

## **INTRODUCCIÓN GENERAL**

Durante muchos años ha existido la necesidad de controlar la potencia eléctrica de los sistemas de tracción y de los controles industriales impulsados por motores eléctricos; esto ha llevado a un temprano desarrollo del sistema Ward-Leonard con el objeto de obtener un voltaje de corriente directa variable para el control de los motores e impulsores. La electrónica de potencia ha revolucionado la idea del control para la conversión de potencia y para el control de los motores eléctricos (Rashid 1995).

La electrónica de potencia combina la energía, la electrónica y el control. El control se encarga del régimen permanente y de las características dinámicas de los sistemas de lazo cerrado. La energía tiene que ver con el equipo de potencia estática y rotativa o giratoria, para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. La electrónica se ocupa de los dispositivos y circuitos de estado sólido requeridos en el procesamiento de señales para cumplir con los objetivos de control deseados. La electrónica de potencia se puede definir como la aplicación de la electrónica de estado sólido para el control y la conversión de la energía eléctrica (Hart 2004 ).

La electrónica de potencia se basa, en primer término, en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia. Con el desarrollo de la tecnología de los semiconductores de potencia, las capacidades del manejo de la energía y la velocidad de conmutación de los dispositivos de potencia han mejorado tremendamente. El desarrollo de la tecnología de los microprocesadores-micro-computadoras tiene un gran impacto sobre el control y la síntesis de la estrategia de control para los dispositivos semiconductores de potencia. Los equipos de electrónica de potencia modernos utilizan semiconductores de potencia, que pueden compararse con el músculo, y micro-electrónica, que tiene el poder y la inteligencia del cerebro (Mohan 2003 ). Para la realización de la presente investigación partimos de la **Situación problemática** existente en la máquina para los experimentos tribológicos que se encuentra ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, la misma carecía de un circuito rectificador semicontrolado que controlara la velocidad del motor de Corriente Directa (CD), destinado a accionar el mecanismo de desgaste por fricción a materiales sólidos.

Se define como el **Problema de la investigación** la necesidad de tener un accionamiento eléctrico que ofrezca una buena regulación de velocidad al motor de CD de la máquina de ensayos para determinar el grado de desgaste y fricción de elementos mecánicos, debido a encontrarse fuera de servicio la de diseño.

**Objeto:**

Maquina simulador de desgaste CMT 2071-1.

**Campo de acción:**

Accionamiento eléctrico de la maquina CMT 2071-1.

**Objetivo general:**

Diseñar un accionamiento eléctrico que garantice la explotación eficiente de la máquina de ensayo CMT 2070-1.

**Objetivos Específicos**

1. Identificar los tipos de rectificadores controlados existentes.
2. Diseñar y simular un rectificador del tipo controlado o semicontrolado que logre dar solución al problema planteado.
3. Instalar el rectificador diseñado y simulado al mecanismo de control de la máquina de CD destinada a accionar el mecanismo de desgaste por fricción a materiales sólidos.

**Hipótesis**

Si se diseña correctamente un circuito rectificador semicontrolado que demuestre a través de simulaciones que es capaz de controlar la velocidad del motor de CD destinado a accionar el mecanismo de desgaste por fricción de elementos mecánicos con sus diferentes acciones de control de manera fiable, es posible entonces devolver la funcionalidad de la máquina para experimentos tribológicos que se encuentra ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez.

### **Tareas de investigación**

1. Realizar un estudio del arte sobre los principios y antecedentes de la electrónica de potencia.
2. Mostrar de manera específica los tipos de rectificadores controlados existentes.
3. Investigar y hacer referencia acerca de las aplicaciones de los rectificadores controlados de potencia.
4. Mostrar un breve argumento sobre las máquinas de CD.
  - a. Principio de funcionamiento.
  - b. Aspectos constructivos de las máquinas de CD.
  - c. Posibles esquemas de conexión de las máquinas de CD.
5. Teniendo en cuenta el gran uso hoy en día de los rectificadores controlados, buscar las ventajas y desventajas de los mismos.
6. Diseñar un circuito de mando basado en un rectificador controlado.
  - a) Rectificador monofásico semicontrolado o mixto. (Caso de La investigación).
7. Simular el circuito rectificador monofásico semicontrolado diseñado.
  - a) Mostrar gráficos.
8. Considerar aspectos a tener en cuenta para evaluación económica.

### **Métodos teóricos y empíricos utilizados en la investigación:**

1. Método de investigación bibliográfica: En este método se desarrolla todo un estudio de la bibliografía encontrada, analizando los antecedentes de los trabajos precedentes en el tema y la situación actual de este para el alcance de los objetivos propuestos en la investigación.
2. Método Experimental: Se realizó un análisis integral del equipo simulador de desgaste CMT2070-1.
3. Método de investigación teórica para la caracterización el objeto de estudio así como sus principales características.
4. Sistémico – estructural: Este método permitió describir la estructura y su interrelación de forma sistémica.
5. Métodos empíricos están relacionados con la observación científica para el diagnóstico del circuito con la correcta simulación del mismo para la obtención y desarrollo de la función deseada.
6. Técnicas computacionales con el software.

## **Aportes principales del trabajo**

1. Diseñar, fabricar e instalar el circuito rectificador semicontrolado que se encargará de controlar la velocidad del motor de CD destinado a accionar el mecanismo de desgaste por fricción a materiales sólidos.
2. Devolver la funcionalidad de la máquina para experimentos tribológicos que se encuentra ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez.

## **Capítulo I. Marco Teórico Conceptual**

### **1 Introducción.**

---

Existe una gran variedad de instalaciones, máquinas y aparatos destinados a la investigación de las propiedades químico - físicas de los materiales, en particular para la realización de ensayos de desgaste. Sin embargo en la instalación el material abrasivo no es renovable en forma constante y no es factible la determinación de la fuerza de fricción actuante entre el medio friccionante y la superficie de las probetas.

La máquina para la investigación de materiales al desgaste abrasivo permite realizar ensayos de desgaste mediante el suministro de abrasivo suelto en forma de granos, el cual se alimenta entre un disco-probeta que rota y un soporte que acciona perpendicularmente sobre dicho disco comprimiendo el abrasivo que fluye constantemente contra el disco-probeta.

En el presente capítulo se establece como objetivo.

Realizar un análisis de la bibliografía existente que permita definir el estado del arte en la temática abordada y sustentar los resultados alcanzados en la investigación.

#### **I.1 Tribómetros para desgaste.**

---

La Ingeniería Mecánica, ayuda al diseño y construcción de equipo que permite caracterizar materiales o simular las condiciones de desgaste o fricción. Esta disciplina, hace uso de las ventajas tribológicas, para ser aplicadas en el diseño y construcción de dispositivos mecánicos con la finalidad de seleccionar el material óptimo que tenga una vida útil predeterminada, así como proponer medios menos agresivos para los materiales.

Cuando se logra consolidar y utilizar todos estos conocimientos científicos en un fin específico, se puede estar seguro de que no solo se está desarrollando un par cinemática último, sino que también se impacta positivamente en el aspecto económico, donde es utilizado y el par al que pertenece. Lo anterior lo respalda el hecho de los países industrializados, que han tenido un ahorro económico considerable, del orden de 7 y 8% del PIB al aplicar adecuadamente sus conocimientos tribológicos. (Peña, 2002)

Carrillo, 2001 realizó un diseño y prototipo de un puente de carga para una máquina reciprocante de esfera sobre placa. Posteriormente Peña, (2002), caracterizó en forma mecánica y tribológica al aluminio 6061T651 base y con un recubrimiento de fosfato de

cromo. Mientras Aguilar, (2002) desarrolló una máquina tribológica para realizar pruebas de desgaste abrasivo en un tribosistema acuoso. En febrero Gallardo, (2003) desarrolló una máquina de configuración perno sobre disco, para medir el desgaste adhesivo en condiciones seca y húmeda. En forma paralela, Márquez, (2003) presentó el diseño de una maquina de desgaste abrasivo severo. Herrera, (2003) en agosto del mismo, expuso el desarrollo de un prototipo para evaluar el desgaste por fatiga por contacto de rodadura. Finalmente en septiembre Luna, (2003) desarrolló un prototipo erosionador que emplea aire y partículas de carburo de Silicio.

En los países industrializados se han desarrollado una gran cantidad de equipos y de pruebas tribológicas, sin embargo, esta información no está dispuesta a la mano, resultando, además muy cara. Cabe mencionar que en algunos países se desconoce casi por completo la experimentación referente a la abrasión.

Asimismo, se han presentado varios trabajos en congresos nacionales e internacionales, Un precedente de suma importancia para este trabajo, fue el realizado por el Hindú Wirojanupatump, (1999), quien hizo pruebas de desgaste, donde compara el fenómeno de abrasión en condiciones seca y húmeda, en un acero de medio contenido de carbono. Donde el objetivo fundamental es determinar el comportamiento de este material cuando se varían los parámetros operaciones, tales como: carga, tamaño, forma y dureza del abrasivo. Deuis et al, (1998) realiza una comparación entre el comportamiento del desgaste abrasivo en un medio ambiente seco y un húmedo, para recubrimientos sobre aluminio, observando que el desgaste en un ambiente húmedo es menor que en el seco, esto lo justifica debido a la generación de calor y consideraciones hidrodinámicas, así como a diferencias en la arena abrasiva.

### **I.1.1 Caracterización del simulador de desgaste CMT 2070-1.**

El simulador de desgaste CMT 2070-1, es un potente laboratorio para realizar ensayos de desgaste en condiciones de abrasión y sus posibilidades tecnológicas abarcan gran campo de aplicación. Esta es una máquina mixta, es decir máquina del tipo PIN-DISCO-DISCO-DISCO, se encuentra ubicada en el grupo de máquinas de fricción circunferencial. El campo de aplicación es para simular desgastes de piezas que trabajan en condiciones de lubricación, así como piezas que trabajan en ambiente seco.

El empleo del sistema PIN-DISCO se realiza en una cámara hermética, en la cual va situada la probeta (DISCO), se le suministra aceite y abrasivo (según las condiciones de trabajo de la pieza y la simulación del desgaste que se quiere lograr) para accionar el PIN es necesario aplicar una fuerza a un brazo el cual está acoplado a un resorte por un sistema de rosca, a través de este mecanismo se puede determinar la fuerza aplicada al material dentro de la cámara.

El sistema DISCO-DISCO se emplea para las piezas que trabajan en condiciones de fricción seca. Para ello será necesario retirar la tapa de la cámara y hacer coincidir las dos probetas, en este caso DISCO-DISCO para ambos casos la frecuencia de rotación (rev/min). Se tomara según los cálculos de relación de transmisión. La máquina es robusta, de estructura rígida construida de hierro fundido para evitar las vibraciones. Esta armazón presenta una cavidad inferior donde se aloja un motor eléctrico de CD, él cual es el encargado de transmitir el movimiento a través de una relación de transmisión por polea-correa (dentada) (Oscar 2010)

## I.2 Características de la rectificación monofásica controlada.

### I.2.1 Familia de convertidores estático.

En la Figura 1 se muestran los diferentes tipos de clasificación. Para el caso de estudio estaremos utilizando el circuito representado en (a) referido a un rectificador.

Clasificación según la forma de la energía.

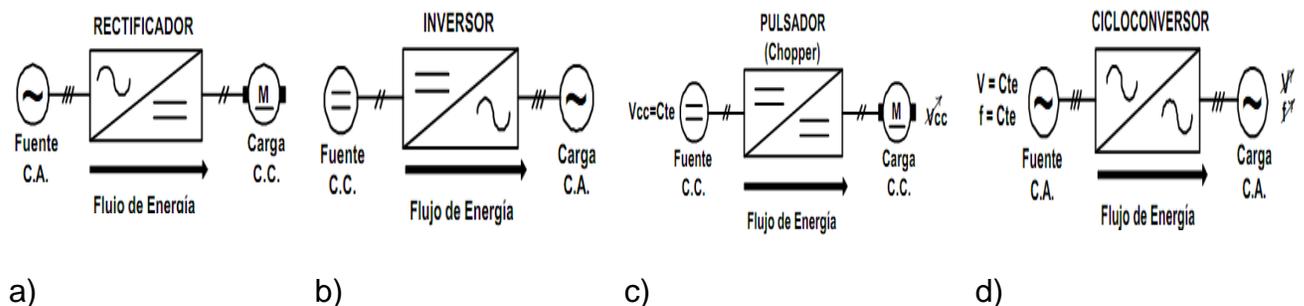


Figura 1.1. Diferentes familias de convertidores de potencia. a) Rectificador. b) Inversor. c) Pulsador. d) Cicloconvertor.

## **I.2.2 Principios y antecedentes de la electrónica de potencia.**

Se considera que la electrónica comenzó con el diodo de vacío inventado por John Ambrose Fleming en 1904. El funcionamiento de este dispositivo está basado en el efecto Edison. Edison fue el primero que observó en 1883 la emisión termoiónica, al colocar una lámina dentro de una bombilla para evitar el ennegrecimiento que producía en la ampolla de vidrio el filamento de carbón. Cuando se polarizaba positivamente la lámina metálica respecto al filamento, se producía una pequeña corriente entre el filamento y la lámina. Este hecho se producía porque los electrones de los átomos del filamento, al recibir una gran cantidad de energía en forma de calor, escapaban de la atracción del núcleo (emisión termoiónica) y, atravesando el espacio vacío dentro de la bombilla, eran atraídos por la polaridad positiva de la lámina.

El otro gran paso lo dio Lee De Forest cuando inventó el tríodo en 1906. Este dispositivo es básicamente como el diodo de vacío, pero se le añadió una rejilla de control situada entre el cátodo y la placa, con el objeto de modificar la nube electrónica del cátodo, variando así la corriente de placa. Este fue un paso muy importante para la fabricación de los primeros amplificadores de sonido, receptores de radio, televisores, etc.

Conforme pasaba el tiempo, las válvulas de vacío se fueron perfeccionando y mejorando, apareciendo otros tipos, como los tetrodos (válvulas de cuatro electrodos), los pentodos (cinco electrodos), otras válvulas para aplicaciones de alta potencia, etc. Dentro de los perfeccionamientos de las válvulas se encontraba su miniaturización.

Pero fue definitivamente con el transistor, aparecido de la mano de Bardeen y Brattain, de la Bell Telephone, en 1948, cuando se permitió aún una mayor miniaturización de aparatos tales como las radios. El transistor de unión apareció algo más tarde, en 1949. Este es el dispositivo utilizado actualmente para la mayoría de las aplicaciones de la electrónica. Sus ventajas respecto a las válvulas son entre otras: menor tamaño y fragilidad, mayor rendimiento energético, menores tensiones de alimentación, etc.

El transistor no funciona en vacío como las válvulas, sino en un estado sólido semiconductor (silicio), razón por la que no necesita centenares de voltios de tensión para funcionar. A pesar de la expansión de los semiconductores, todavía se siguen utilizando

las válvulas en pequeños círculos audiófilos, porque constituyen uno de sus mitos más extendidos. El transistor tiene tres terminales (el emisor, la base y el colector) y se asemeja a un triodo: la base sería la rejilla de control, el emisor el cátodo, y el colector la placa. Polarizando adecuadamente estos tres terminales se consigue controlar una gran corriente de colector a partir de una pequeña corriente de base.

En 1958 se desarrolló el primer circuito integrado, que alojaba seis transistores en un único chip. En 1970 se desarrolló el primer microprocesador, Intel 4004. En la actualidad, los campos de desarrollo de la electrónica son tan vastos que se ha dividido en varias disciplinas especializadas. La mayor división es la que distingue la electrónica analógica de la electrónica digital. La electrónica es, por tanto, una de las ramas de la ingeniería con mayor proyección en el futuro, junto con la informática.

### **1.2.3 Tipos de rectificadores monofásicos controlados.**

#### **Rectificador controlado monofásico de media onda.**

Los rectificadores controlados reciben este nombre por que utilizan un dispositivo de control, en este caso el tiristor. Utilizan los mismos montajes que se usan para los no controlados pero sustituyendo los diodos por tiristores parcial o totalmente. La ventaja de colocar tiristores viene dada por la capacidad de estos de retardar su entrada en conducción, sucediendo esta cuando la tensión en sus bornes sea positiva y además reciba un impulso en su puerta.

El ángulo de retardo  $\alpha$  es un parámetro fundamental, ya que actuando sobre él es posible hacer variar la relación entre el valor de la tensión rectificadora de salida y el valor de las tensiones alternas de la entrada, de ahí el calificativo de “controlados”. En los rectificadores controlados, por lo tanto, se controla el cebado del tiristor y el bloqueo será natural (Daniel W. Hart 2005).

#### **Rectificador controlado media onda: Carga resistiva.**

En este montaje de la Figura 2, con el cambio del diodo por un tiristor podremos tener un control sobre el valor medio de la tensión en la carga cuando se tenga una tensión de ánodo positiva respecto al cátodo y se le proporcione a la puerta un impulso de cebado.

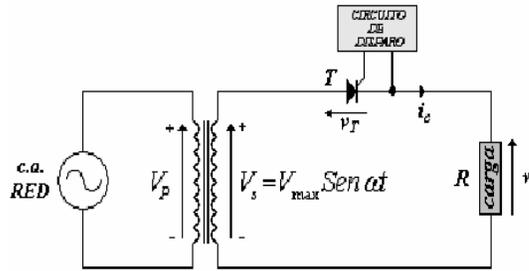


Figura 1.2. Circuito rectificador controlado monofásico de media onda.

**Rectificador controlado monofásico de media onda con carga inductiva.**

En este rectificador el tiristor empieza a conducir para  $\omega t = \alpha$ , que será el retardo que introduzca el circuito de disparo. Esto provoca la circulación de corriente y un voltaje en la bobina y en la resistencia  $v_L$  y  $v_R$  respectivamente: Ver Figura 3.

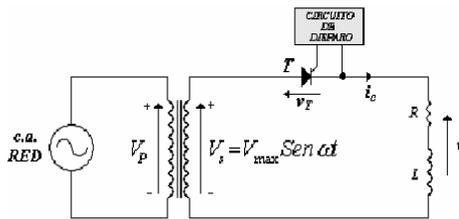


Figura 1.3. Rectificador controlado monofásico de media onda con carga RL.

**Rectificador controlado monofásico de media onda con diodo volante y carga inductiva.**

En el circuito de la Figura 4 cuando la tensión del secundario se haga negativa, en la carga la tensión se anulará y la corriente decrecerá exponencialmente. Cuando la carga es muy inductiva, conviene poner un diodo en paralelo con la carga, el cual evita la presencia de tensiones inversas en la carga.

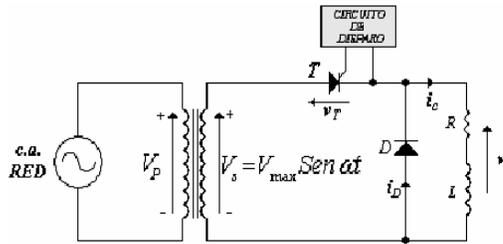


Figura 1.4. Rectificador controlado monofásico de media onda con diodo volante y carga inductiva.

**Rectificador controlado monofásico de media onda: Carga RLE**

En el momento en que la tensión alterna en el secundario, menos la tensión E de la batería, tenga un valor positivo se le aplicará un impulso a la puerta del tiristor y que este pase a conducir. Esto significará que el disparo se ha de producir entre  $\lambda$  y  $\lambda'$  para que  $V_{ak} > 0$ . El circuito aparece en la Figura 5.

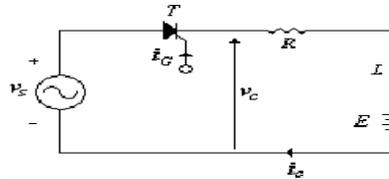


Figura 1.5. Montaje para el rectificador controlado monofásico de media onda: Carga RLE.

**Puente rectificador monofásico totalmente controlado.**

En el circuito de la Figura 6 los tiristores T1 y T4 conducirán durante el semiciclo positivo de la entrada, y los T2 y T3 en el negativo. Eso quiere decir que los tiristores se dispararán de dos en dos con un ángulo de retardo  $\alpha$ .

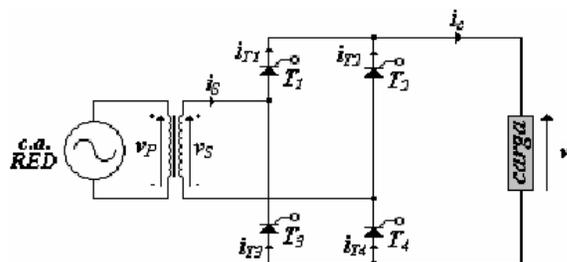


Figura 1.6. Montaje para el puente rectificador monofásico totalmente controlado.

En este montaje, los diodos que formaban el puente rectificador no controlado se sustituyen por tiristores, haciendo posible el control de fase de una onda completa de la señal de entrada. (Aguilar Peña 1995)

**Puente rectificador monofásico semicontrolado o mixto. Caso de estudio.**

También se suele usar una configuración en la que el ánodo de un diodo está unido al cátodo del otro, y los tiristores también irán conectados así entre ellos, pero ocasiona problemas para controlar a los tiristores porque ambos tienen distinta referencia.

En el circuito de la Figura 7, durante el semiciclo positivo el tiristor T1 estará en directo, y cuando  $\omega t = \alpha$  conducirán T1 y D2 en el intervalo  $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ . Cuando  $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$  en el secundario habrá una tensión negativa, provocando el bloqueo de T1 y que este y D2 dejen de conducir, provocando la entrada en conducción del diodo volante D3, que se encargará de transferir la corriente a la carga. En el semiciclo negativo tendremos a T2 en directo y su conducción comenzará para  $\omega t = \pi + \alpha$  hasta  $\omega t = 2\pi$ , conduciendo también D2.

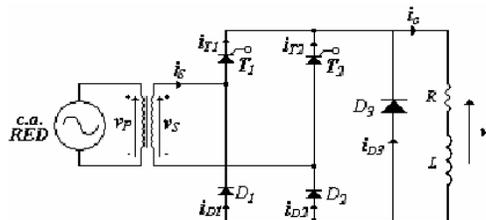


Figura 1.7. Montaje para el rectificador monofásico semicontrolado.

Se reemplazan por diodos uno de los grupos de conmutación que formaban el puente totalmente controlado. En este montaje no hay posibilidad de obtener tensión negativa en la carga, así que solo trabajará en el primer cuadrante del diagrama tensión-corriente (Aguilar Peña 1995).

### **I.2.4 Rectificadores a los que les bastan breves impulsos.**

Los rectificadores a los que les bastan breves impulsos son esencialmente tres:

- Rectificadores de conmutación paralela.
- Rectificadores mixtos.
- Rectificadores con tiristores con un número par de fases.

Las características principales son:

En los rectificadores de conmutación paralela, la corriente que atraviesa el tiristor en estado de conducción se cierra por la carga y el conductor neutro. El cebado sólo requiere la existencia de tensión anódica positiva en el momento del envío del impulso de cebado. De igual forma, en el caso de los rectificadores mixtos de conmutación paralela doble o serie, el retorno de la corriente que circula por el tiristor que conduce hace por un semiconductor del conmutador más negativo (Parte inferior del puente rectificador).

Los rectificadores con tiristores con un número par de fases necesitan el cebado simultáneo de los dos tiristores correspondientes a las dos tensiones directamente en oposición. Para ambos tiristores se utiliza el mismo generador de impulsos, el cual los transmite simultáneamente a los dos, mediante un transformador con dos secundarios.

El único problema que plantean los impulsos en los tres tipos de rectificadores precedentes es la necesidad de evitar el envío de impulsos prematuros funcionando en régimen de conducción discontinua. Si la carga presenta una fuerza electromotriz y si la corriente rectificada es nula de forma intermitente, el envío de impulsos con un ángulo de retardo a próximo a cero puede encontrar a los tiristores con tensión anódica negativa.

Si no se desea reducir el margen de regulación se puede recurrir a señales de gobierno de gran duración (duración que va desde el instante correspondiente a un ángulo de disparo nulo al instante en que la tensión a rectificar es máxima).

Rectificadores con tiristores con un número impar de fases.

En los rectificadores con tiristores de conmutación paralela doble o serie con un número que impar de fases, los tiristores se ceban individualmente cada  $T/2q$ . La entrada en conducción de un tiristor supone que otro de la segunda serie de semiconductores ya conduce.

Si no hemos asegurado que la conducción será continua, para garantizar el arranque del rectificador podemos poner una resistencia elevada en paralelo con cada uno de los tiristores de una serie (Mohan 2003).

#### 1. Gobierno mediante señales de gran duración.

Se da a las señales enviadas a las puertas una longitud superior a  $p/q$ . De esta forma, cuando se ceba un tiristor, el circuito de gobierno del tiristor de la otra serie está todavía alimentando su puerta, de forma que si no conduce, se cebará al mismo tiempo que el primero. Esta solución se rechaza a menudo debido a:

- Disipación excesiva del circuito de control.
- Dificultad de transmitir señales cuadradas de gran duración a través de los transformadores.
- Inconvenientes ligados a las señales demasiado largas en el funcionamiento como ondulator.

#### 2. Método del impulso de confirmación.

Cuando se genera un impulso breve para cebar un tiristor, al mismo tiempo se envía un impulso al tiristor que debiera haber empezado a conducir precedentemente. Si este último ya estaba conduciendo, el impulso de confirmación habrá resultado inútil, en el caso de no haber entrado en conducción provocará el cebado del semiconductor al mismo tiempo que el primero.

### **I.2.5 Aplicaciones de los convertidores electrónicos de potencia.**

#### **Transporte:**

Trenes, funiculares, trolebuses, automóviles, camiones, metros, barcos, ascensores,

#### **Comercio:**

Refrigeración, aire acondicionado, iluminación, computadores, fuentes de alimentación interrumpibles (UPS), escalas mecánicas,...

#### **Energía:**

Transmisión de corriente continua, enlaces de frecuencia, control de potencia reactiva, compensación de armónicas,

**Industrias:**

Bombas, ventiladores, grúas, palas, refinadoras, molinos, correas transportadoras, máquinas herramientas, robots, hornos, láseres, bobinadoras, laminadoras,...

**Residencial:**

Televisión, estufas, cocinas, electrodomésticos, herramientas, iluminación,...

Las principales aplicaciones de los convertidores electrónicos de potencia son las siguientes:

- *Fuentes de alimentación:* En la actualidad han cobrado gran importancia un subtipo de fuentes de alimentación electrónicas, denominadas fuentes de alimentación conmutadas. Estas fuentes se caracterizan por su elevado rendimiento y reducción de volumen necesario. El ejemplo más claro de aplicación se encuentra en la fuente de alimentación de los ordenadores.
- *Control de motores eléctricos:* La utilización de convertidores electrónicos permite controlar parámetros tales como la posición, velocidad o par suministrado por un motor. Este tipo de control se utiliza en la actualidad en los sistemas de aire acondicionado. Esta técnica, denominada comercialmente como "inverter" sustituye el antiguo control encendido/apagado por una regulación de velocidad que permite ahorrar energía.

Asimismo, se ha utilizado ampliamente en tracción ferroviaria, principalmente en vehículos aptos para corriente continua (C.C.) durante las décadas de los años 70 y 80, ya que permite ajustar el consumo de energía a las necesidades reales del motor de tracción, en contraposición con el consumo que tenían los vehículos controlados por resistencias de arranque y frenado. Actualmente el sistema chopper sigue siendo válido, pero ya no se emplea en la fabricación de nuevos vehículos, puesto que actualmente se utilizan equipos basados en el motor trifásico, mucho más potente y fiable que el motor de colector.

- *Calentamiento por inducción:* Consiste en el calentamiento de un material conductor a través del campo generado por un inductor. La alimentación del inductor se

realiza a alta frecuencia, generalmente en el rango de los kHz, de manera que se hacen necesarios convertidores electrónicos de frecuencia. La aplicación más vistosa se encuentra en las cocinas de inducción actuales.

- Otras: Como se ha comentado anteriormente son innumerables las aplicaciones de la electrónica de potencia. Además de las ya comentadas destacan: sistemas de alimentación interrumpida, sistemas de control del factor de potencia, balastos electrónicos para iluminación a alta frecuencia, interface entre fuentes de energía renovables y la red eléctrica, etc.

Las líneas de investigación actuales buscan la integración de dispositivos de potencia y control en un único chip, reduciendo costes y multiplicando sus potenciales aplicaciones. No obstante existen dificultades a salvar como el aislamiento entre zonas trabajando a altas tensiones y circuitería de control, así como la disipación de la potencia perdida.

### **I.3 Criterio para la Implementación de los accionamientos de Máquinas - CD.**

---

El control de velocidad de motores desde hace tiempo dejó de ser exclusivo de motores de corriente directa y se aplicó a motores de corriente alterna. Sin embargo, la aparición de rectificadores controlados ha hecho que adquiera una mayor importancia en motores de corriente alterna; en motores de inducción se ha obtenido mediante el control de voltaje aplicado al estator o variando la resistencia en el rotor cuando es de tipo devanado, ambos procedimientos pueden ser logrados con el rectificador controlado.

#### **I.3.1 Finalidad del circuito de accionamiento.**

Con el montaje de un circuito rectificador monofásico semicontrolado se pretende lograr el control de la velocidad de una máquina de CD, destinada a realizar ensayos de desgaste y fricción a materiales sólidos, a través de la regulación del voltaje de alimentación de la misma. El control de procesos, la eficiencia energética y la rapidez de acción, son algunas de las principales razones para el empleo de variadores de velocidad, a través de la implementación de técnicas modernas como son el uso de rectificadores controlados y semicontrolados. Históricamente, los variadores de velocidad fueron desarrollados

originalmente para el control de procesos, pero la eficiencia energética y la velocidad de acción de estos han surgido como un objetivo tan importante como el primero.

### I.3.2 Principales métodos de cálculo en rectificadores monofásicos controlados.

Rectificador controlado media onda: Carga resistiva.

Tensión media en la carga: Si  $V_{m\acute{a}x}$  es la tensión en el secundario, tenemos que:

$$V_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{max} \text{Sen}\omega t \, d\omega t = \frac{V_{max}}{2\pi} [-\cos\omega t]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{max}}{2\pi} (1 + \cos\alpha) \quad (1.1)$$

Para  $\alpha = 0^\circ$ , la tensión media en la carga será  $V_{dc}$  y su valor:

$$V_{dc} = \frac{V_{max}}{\pi}$$

(1.2)

Y el valor normalizado valdrá:

$$V_{n(dc)} = \frac{V'_{dc}}{V_{dc}} = \frac{1}{2} (1 + \cos\alpha) \quad (1.3)$$

Tensión eficaz en la carga:

$$\begin{aligned} V'_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (V_{max} \text{Sen}\omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\int_{\alpha}^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, d\omega t} = \\ &= \frac{V_{max}}{\sqrt{2\pi}} \left[ \frac{1}{2} \omega t - \frac{1}{4} \text{Sen} 2\omega t \right]_{\alpha}^{\pi} = \frac{V_{max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{Sen}(2\alpha)} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Para  $\alpha = 0^\circ$ , la tensión eficaz será  $V_{rms}$  y su valor:

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\pi} = \frac{V_{max}}{2} \quad (1.5)$$

y el valor normalizado valdrá:

$$V_{n(rms)} = \frac{V'_{rms}}{V_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{(\pi - \alpha) + \frac{1}{2} \text{Sen}(2\alpha)} \quad (1.6)$$

Tensión inversa de pico soportada por el tiristor: Esta tensión será la máxima de entrada para  $\alpha \leq$

$\pi/2$ , por lo tanto:  $PIV = V_{max}$

Corriente media en la carga:

$$I'_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} I_{\max} \text{Sen} \omega t \, d\omega t = \left( \frac{I_{\max}}{2\pi} \right) (1 + \text{Cos} \alpha) \rightarrow I'_{dc} = \frac{V'_{dc}}{R} \quad (1.7)$$

Corriente eficaz en la carga:

$$I'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (I_{\max} \text{Sen} \omega t)^2 \, d\omega t} = \left( \frac{I_{\max}}{2} \right) \sqrt{1 - \left( \frac{\alpha}{\pi} \right) + \left( \frac{\text{Sen} 2\alpha}{2\pi} \right)} \rightarrow I'_{rms} = \frac{V'_{rms}}{R} \quad (1.8)$$

### Rectificador controlado monofásico de media onda con carga inductiva.

Expresión de la corriente instantánea en la carga: A partir del disparo del tiristor se cumple en el circuito la siguiente ecuación:

$$R i_c + L \frac{di_c}{dt} = V_{\max} \text{Sen} \omega t \quad \text{Para } i_c(\omega t = \alpha) = 0: \quad (1.9)$$

$$i_c = \frac{V_{\max}}{Z} \left[ \text{Sen}(\omega t - \varphi) - \text{Sen}(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t}{Q}} \right] \quad (1.10)$$

donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (1.11) ; \quad \varphi = \arcsen \left( \frac{L \omega}{Z} \right) \quad (1.12)$$

$$Q = \text{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R} \quad (1.13)$$

La corriente se anulará para un  $\omega t_2$  que cumpla:

$$\text{Sen}(\omega t_2 - \varphi) = \text{Sen}(\alpha - \varphi) e^{\frac{\alpha - \omega t_2}{Q}} \quad (1.14)$$

### Rectificador controlado monofásico de media onda con diodo volante y carga inductiva.

Mientras el tiristor está conduciendo, la intensidad en la carga viene dada por la ecuación:

$$v_c = R i_c + L \left( \frac{di_c}{dt} \right) \quad (1.15)$$

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{\max} \text{Sen} \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{2\pi} (1 + \text{Cos} \alpha) \quad (1.16)$$

Por lo tanto, cuando se dispara el tiristor con  $\alpha$  elevado, menor será el valor de la tensión media en la carga, siendo cero para  $\alpha = 180^\circ$ .

### Rectificador controlado monofásico de media onda: Carga RLE

Vamos a definir los siguientes parámetros:

- m: relación entre la F.E.M. y la  $V_{\max}$  del secundario  $\rightarrow m = E/V_{\max}$
- $\lambda$  y  $\lambda'$ : ángulos para los que la tensión en el secundario es igual al valor de la F.E.M.  $\rightarrow (V_{\max} \text{ Sen} \lambda = E; V_{\max} \text{ Sen} \lambda' = E)$

$$\lambda = \arcsen\left(\frac{E}{V_{\max}}\right) = \arcsen m \quad ; \quad \lambda' = \pi - \lambda \quad (1.17)$$

Debemos aprovechar el momento en que la tensión alterna en el secundario, menos la tensión  $E$  de la batería, tenga un valor positivo para aplicar un impulso a la puerta del tiristor y que este pase a conducir. Esto significa que el disparo se ha de producir entre  $\lambda$  y  $\lambda'$  para que  $V_{ak} > 0$ .

$$V_{\max} \text{ Sen} \alpha - E \geq 0 \rightarrow V_{\max} \text{ Sen} \alpha \geq E \rightarrow \text{Sen} \alpha \geq \frac{E}{V_{\max}} \rightarrow \alpha \geq \arcsen\left(\frac{E}{V_{\max}}\right) \quad (1.18)$$

Si el disparo se produce antes de que se cumpla esta condición para  $\alpha$ , y el impulso fuera de corta duración, el tiristor no conduciría.

Si el disparo se produce para un ángulo de retardo  $\alpha$ , tal que  $\lambda \leq \alpha \leq \lambda'$ , se cumplirá que:

$$V_{\max} \text{ Sen} \omega t - E = R i_C + L \left( \frac{di_C}{dt} \right) \quad (1.19)$$

Y de esta ecuación, para  $i_C (\omega t = \alpha) = 0$  obtenemos:

$$i_C = -\frac{E}{R} + \frac{V_{\max}}{Z} \left[ \text{Sen}(\omega t - \varphi) + \left[ \frac{E}{R} \frac{Z}{V_{\max}} - \text{Sen}(\alpha - \varphi) \right] e^{\frac{\alpha - \omega t}{Q}} \right] \quad (1.20)$$

Sabiendo que:

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \quad (1.21); \quad \text{Sen} \varphi = \frac{L \omega}{Z} \rightarrow \varphi = \arcsen\left(\frac{L \omega}{Z}\right) \quad (1.22)$$

$$Q = \text{tg} \varphi = \frac{L \omega}{R} \quad (1.23)$$

Si  $\theta$  es el ángulo de conducción, la corriente se anulará para un ángulo  $\omega t = \alpha + \theta = \omega t_1$ , y así se

Cumplirá que:

$$\text{Sen } \omega t_1 - Q \text{Cos } \omega t_1 = m + mQ^2 - (mQ^2 + Q\sqrt{1-m^2})e^{\frac{\alpha - \omega t_1}{Q}} \quad (1.24)$$

**Puente rectificador monofásico totalmente controlado.**

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \text{Sen } \omega t \, d\omega t = \frac{1}{\pi} V_{\max} (-\text{Cos } \pi + \text{Cos } \alpha) = \frac{V_{\max}}{\pi} (1 + \text{Cos } \alpha) \quad (1.25)$$

Para  $\alpha = 0^\circ$  (actuando como diodos), la tensión media en la carga será Vdc y su valor:

$$V_{dc} = \frac{2V_{\max}}{\pi} \quad (1.26)$$

Intensidad eficaz en la carga:

$$I'_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} (I_{\max} \text{Sen } \omega t)^2 \, d\omega t} = \frac{I_{\max}}{\sqrt{2}} \sqrt{\left[1 - \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + \left(\frac{\text{Sen } 2\alpha}{2\pi}\right)\right]} \quad (1.27)$$

Potencia eficaz en la carga:

$$P'_{ac} = (I'_{rms})^2 \cdot R \quad (1.28)$$

**Puente rectificador monofásico semicontrolado o mixto.**

Tensión media en la carga:

$$V'_{dc} = \frac{2}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{\max} \text{Sen } \omega t \, d\omega t = \frac{V_{\max}}{\pi} (-\text{Cos } \pi + \text{Cos } \alpha) = \frac{V_{\max}}{\pi} (1 + \text{Cos } \alpha) \quad (1.29)$$

Como la tensión máxima de salida se da para  $\alpha = 0$ , donde  $V_{dc} = (2V_{\max}/\pi)$ , el valor normalizado de la tensión en la carga es:

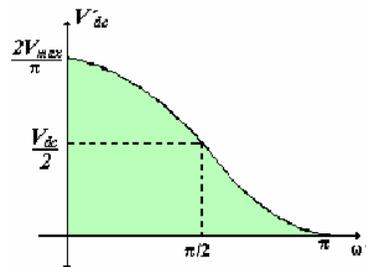


Figura 1.8. Característica de control del puente rectificador semicontrolado.

La tensión media en la carga puede variar desde  $(2V_{\max}/\pi)$  hasta 0, con la regulación del ángulo de disparo  $\alpha$ , desde 0 hasta  $\pi$ .

#### I.4 Motor de CD como objeto de estudio.

##### I.4.1 Principio de funcionamiento de las máquinas de CD.

Según la Ley de Lorentz, cuando un conductor por el que pasa una corriente eléctrica se sumerge en un campo magnético, el conductor sufre una fuerza perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente, siguiendo la regla de la mano derecha, como se muestra en la ecuación 1.31

$$F = B \cdot l \cdot I \quad (1.31)$$

- **F:** Fuerza en newtons.
- **I:** Intensidad que recorre el conductor en amperios.
- **l:** Longitud del conductor en metros lineales.
- **B:** Densidad de campo magnético o densidad de flujo teslas.

El rotor no solo tiene un conductor, sino varios repartidos por la periferia. A medida que gira, la corriente se activa en el conductor apropiado. Normalmente se aplica una corriente con sentido contrario en el extremo opuesto del rotor, para compensar la fuerza neta y aumentar el momento.

##### I.4.2 Aspectos constructivos de las máquinas de CD.

Partes de las que se compone:

Las partes de un motor de CD se pueden dividir en dos grupos: Para mayor entendimiento refiérase a la Figura 9.- **La parte mecánica:** compuesta por la carcasa que como es evidente es la parte estática de la máquina, las tapas laterales también llamados escudos, las fijaciones de la máquina, el inducido que es la parte móvil de la máquina que gira apoyada sobre rodamientos (como se conoce comúnmente con el nombre de cojinetes) solidarios a las tapas laterales antes mencionadas.

- **La parte electromagnética:** formada principalmente por un circuito magnético formado por un empilado de chapas magnéticas formando las masas polares del inductor, dos circuitos eléctricos formados por dos devanados diferentes; el devanado inductor que va alojado alrededor de las masas polares, el otro circuito es el devanado inducido que va alojado en las ranuras en la parte que gira (llamada rotor) que pueden estar formados por hilos o pletinas dependiendo de la potencia del motor.

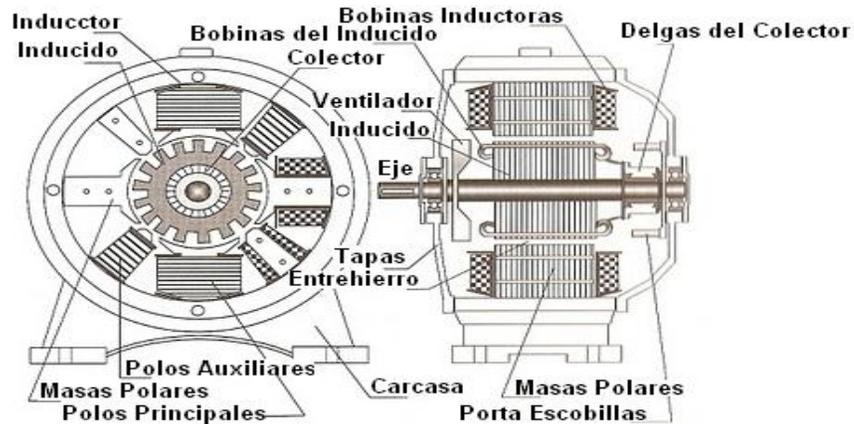
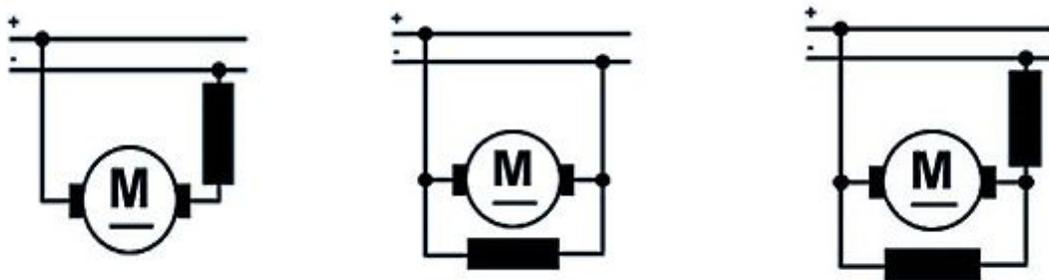


Figura 9. Partes constructivas de un motor de CD.

### I.4.3 Esquemas de conexión de las máquinas de CD.

En la Figura 10, se refiere a las variantes de conexión de los motores de CD.



a) Conexión serie.

b) Conexión shunt.

c) Conexión compuesta.

Figura 10. Esquema de conexión de las máquinas de CD.

Motor serie:

El **motor serie** o **motor de excitación en serie**, es un tipo de motor eléctrico de corriente continua en el cual el inducido y el devanado inductor o de excitación van conectados en serie. Por lo tanto, la corriente de excitación o del inductor es también la corriente del inducido absorbida por el motor.

Las principales características de este motor son:

- Se embala cuando funciona en vacío, debido a que la velocidad de un motor de corriente directa aumenta al disminuir el flujo inductor y, en el motor serie, este disminuye al aumentar la velocidad, puesto que la intensidad en el inductor es la misma que en el inducido.
- La potencia es casi constante a cualquier velocidad.
- Le afectan poco las variaciones bruscas de la tensión de alimentación, ya que un aumento de esta provoca un aumento de la intensidad y, por lo tanto, del flujo y de la fuerza contra-electromotriz, estabilizándose la intensidad absorbida.

Motor shunt:

El **motor shunt** o **motor de excitación en paralelo** es un motor eléctrico de corriente continua cuyo bobinado inductor principal está conectado en derivación o paralelo con el circuito formado por los bobinados inducido e inductor auxiliar.

Al igual que en los dinamos shunt, las bobinas principales están constituidas por muchas espiras y con hilo de poca sección, por lo que la resistencia del bobinado inductor principal es muy grande. En el instante del arranque, el par motor que se desarrolla es menor que el motor serie, (también uno de los componentes del motor de corriente continua). Al disminuir la intensidad absorbida, el régimen de giro apenas sufre variación.

Es el tipo de motor de corriente continua cuya velocidad no disminuye más que ligeramente cuando el par aumenta. Los motores de corriente continua en derivación son adecuados para aplicaciones en donde se necesita velocidad constante a cualquier ajuste

del control o en los casos en que es necesario un rango apreciable de velocidades (por medio del control del campo).

El motor en derivación se utiliza en aplicaciones de velocidad constante, como en los accionamientos para los generadores de corriente continua en los grupos moto generadores de corriente continua.

Motor compound:

Un **motor compound** (o **motor de excitación compuesta**) es un Motor eléctrico de corriente continua cuya excitación es originada por dos bobinados inductores independientes; uno dispuesto en serie con el bobinado inducido y otro conectado en derivación con el circuito formado por los bobinados: inducido, inductor serie e inductor auxiliar. Los motores compuestos tienen un campo serie sobre el tope del bobinado del campo shunt. Este campo serie, el cual consiste de pocas vueltas de un alambre grueso, es conectado en serie con la armadura y lleva la corriente de armadura. El flujo del campo serie varía directamente a medida que la corriente de armadura varía, y es directamente proporcional a la carga. El campo serie se conecta de manera tal que su flujo se añade al flujo del campo principal shunt. Los motores compound se conectan normalmente de esta manera y se denominan como compound acumulativo. Esto provee una característica de velocidad que no es tan “dura” o plana como la del motor shunt, ni tan “suave” como la de un motor serie. Un motor compound tiene un limitado rango de debilitamiento de campo; la debilitación del campo puede resultar en exceder la máxima velocidad segura del motor sin carga. Los motores de corriente continua compound son algunas veces utilizados donde se requiera una respuesta estable de par constante para un rango de velocidades amplio.

El motor compound es un motor de excitación o campo independiente con propiedades de motor serie. El motor da un par constante por medio del campo independiente al que se suma el campo serie con un valor de carga igual que el del inducido. Cuantos más amperios pasan por el inducido mas campo serie se origina, claro está, siempre sin pasar del consumo nominal.

#### I.4.4 Aplicación de las máquinas de CD referida al caso de estudio.

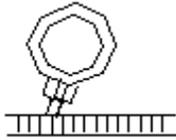
El Simulador de desgaste CMT 2070 – 1 de la Figura 11, se encuentra ubicado en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Antonio Núñez Jiménez. Es una instalación experimental del tipo disco – disco – pin – disco – abrasivo que tiene como objetivo realizar ensayos de desgaste y fricción a materiales sólidos.



Figura 11. Simulador de desgaste CMT 2070 – 1.

La instalación experimental está compuesta por un mecanismo de accionamiento formado por la caja de velocidad (ruedas dentadas y árboles) y transmisión correa – polea accionado por un motor de corriente directa que se alimenta con 110 V de CD. El motor eléctrico se encuentra en óptimas condiciones ya que fue reparado capitalmente en la UEB de Reparaciones Capitales Eléctricas ubicado en La Empresa Mecánica del Níquel. En la Tabla 1 se muestran los datos reales del motor caso de estudio.

Tabla 1. Datos de chapa del motor en cuestión.

<b>kW 4</b>	<b>HP 5,5</b>	<b>rev/min 3600</b>	<b>Voltios 110</b>	<b>Amperios: 5,9</b>
<b>Frecuencia 60Hz</b>	<b>Tipo:Compound</b>	<b>Carcasa: Acero</b>	<b>Estilo:</b>	
<b>Temperatura 40 °C</b>	<b>Modelo:</b>	<b>Serie:</b>	<b>Fase:</b>	
<b>No de láminas:</b>	<b>Delgas: 72</b>	<b>Bobinas por ranuras: 1</b>		
<b>Tamaño del hilo: 1,15</b>	<b>Paso bobinas:1-10</b>			
<b>Centro de delgas x</b>				
<b>Centro de ranura:</b>				
<b>Centro de mica</b>				
<b>Paso del colector</b>				
<b>Imbricado x</b>	<b>Ondulado</b>			

### I.5 Metodología para la evaluación económica.

Es posible ahorrar energía o reducir la demanda máxima, cuando corresponda, mediante acciones que no requieren inversiones (ya sea mediante manejo de la carga o gestión de la operación de los equipos) o que, exigen inversiones. Cuando sean necesarias dichas inversiones, se deberá determinar si ellas son rentables, lo que es hasta cierto punto un concepto arbitrario, ya que depende de los criterios del inversor. El objeto de un análisis energético orientado en función de los usos finales de la energía es desarrollar una estrategia de abastecimiento energético al mínimo costo.

La rentabilidad de las opciones eficientes energéticamente dependerá de la inversión diferencial, de la magnitud de la energía ahorrada, del costo unitario de la energía ahorrada, de la vida útil de la inversión y de la tasa de descuento. Este último parámetro reconoce el valor en el tiempo del capital

#### I.5.1 Métodos generales para evaluar inversiones.

La tasa de descuento permite comparar cuantitativamente gastos y ahorros que ocurren en fechas diferentes. El problema consiste en definir cuál es la tasa de descuento «correcta» para una evaluación dada. Desgraciadamente no existe una respuesta teórica a esta pregunta. En general, esta es una decisión basada en políticas de la empresa que definen el umbral de rentabilidad a partir del cual están dispuestas a invertir.

La evaluación de los beneficios relativos de las inversiones en eficiencia energética requiere determinar los costos anuales de capital involucrados en las distintas alternativas en consideración, para ello es necesario calcular dichos costos a partir de un factor conocido como el factor de recuperación del capital. Se determina de acuerdo con la función siguiente:

$$I = \sum^n \frac{A}{(1+d)^n} \quad (1.32)$$

Donde:

*I*: Vida útil de una inversión

*n*: Cantidad de años

*d*: Tasa de descuento adoptada por la empresa

*A*: Costo anual

Esta es una serie geométrica, cuya suma se puede calcular mediante la ecuación siguiente.

$$I = \frac{A \cdot [(1+d)^n - 1]}{d \cdot (1+d)^n} \quad (1.33)$$

El factor que multiplica *A* es conocido como el factor «valor presente uniforme» y su recíproco como el factor de recuperación del capital (FRC).

$$FRC = \frac{d(1+d)^n}{[(1+d)^n - 1]} \quad (1.34)$$

$$\text{y } A = I * FRC \quad (\text{Costo anual del capital invertido}) \quad (1.35)$$

La evaluación de las inversiones en eficiencia energética se realiza recurriendo a distintos enfoques dependiendo de los objetivos, condiciones y preferencias del analista.

Los más conocidos son: período de recuperación simple (PRS), período de recuperación descontada (PRD), tasa interna de retorno (TIR), costo del ciclo de vida (CCV), costo del ciclo de vida anualizado (CCVA) y costo de ahorrar energía (CAE). A continuación se presentan brevemente aquellos más utilizados por los analistas y con algo de mayor detalle los que se refieren al ciclo de vida y costo de ahorrar energía, los que serán privilegiados en los ejemplos que se presentan más adelante.

- **Período de recuperación simple (PRS).**

Este método es el más simple y probablemente el más usado, especialmente cuando la inversión se recupera en períodos muy cortos de tiempo. El PRS no tiene en cuenta ni la vida útil del equipo ni el valor del dinero en el tiempo y se calcula en base a la función siguiente:

$$PRS = \frac{\Delta I}{PE ( E_{est} - E_{efic} )} \quad (1.36)$$

Donde:

$PE$ : Precio unitario de la energía

$E_{est}$ : Consumo de energía anual del equipo estándar

$E_{efic}$ : Consumo de energía anual del equipo eficiente

Dependiendo del caso,  $\Delta I$  puede corresponder a la diferencia entre los costos de capital de la opción eficiente y estándar; el costo de la opción eficiente y la reparación eventual de la opción estándar existente o simplemente el costo de capital de la primera, si el equipo estándar opera normalmente (sin necesidad de reparación en una perspectiva de corto plazo).

- **Período de recuperación descontada (PRD).**

En este caso se consideran tanto la vida útil del equipo como el valor del dinero. El período de recuperación descontada (PRD) se determina mediante la función:

$$PRD = n \cdot FRC ( d , n ) \frac{\Delta I}{PE ( E_{est} - E_{efic} )} \quad (1.37)$$

En que:

$n$ : vida útil del equipo

$d$ : tasa de descuento

$FRC ( d , n )$ : factor de recuperación del capital.

- **Tasa interna de retorno (TIR).**

La tasa interna de retorno se define como la tasa de descuento para la cual dos alternativas de inversión tienen el mismo valor presente neto. Al evaluar las alternativas estándar y eficiente, la TIR es el valor ( $i$ ) para el cual se cumple la igualdad siguiente:

$$I_{est} + PE * E_{est} * \sum_1^n [1 / (1+i)^n] = I_{efc} + PE * E_{efc} * \sum_1^n [1 / (1+i)^n] \quad (1.38)$$

Donde:

$I_{est}$ : Inversión en equipos estándar

$I_{efc}$ : Inversión en equipos eficientes

lo que equivale a igualar el valor presente de los ahorros de energía con el diferencial de la inversión requerida.

$$PE (E_{est} - E_{efc}) \sum_1^n [1 / (1+i)^n] = (I_{efc} - I_{est}) \quad (1.39)$$

- **Costo del ciclo de vida (CCV) y costo del ciclo de vida anualizado (CCVA).**

El costo del ciclo de vida  $CCV$  es el valor presente de todos los costos (costo inicial de capital, costos de operación y costos de mantenimiento) asociados a la inversión durante toda su vida útil. Para comparar las dos alternativas -eficiente y estándar- se deberán comparar  $CCV_1$  y  $CCV_2$  respectivamente, los que se expresan mediante las ecuaciones siguientes:

$$CCV_1 = I_{est} + \sum_1^n E_{est} \cdot PE \cdot (1+d)^{-n} + \sum_1^n M_{est} \cdot (1+d)^{-n} \quad (1.40)$$

$$CCV_2 = I_{efc} + \sum_1^n E_{efc} \cdot PE \cdot (1+d)^{-n} + \sum_1^n M_{efc} \cdot (1+d)^{-n}$$

Donde:

$M_{est}$ : Costo de mantenimiento del equipo estándar

$M_{efc}$ : Costo de mantenimiento del equipo eficiente

A menudo la metodología adoptada apunta a comparar los costos anuales de las dos opciones -la eficiente y el estándar- para ello se recurre a los costos anualizados del ciclo de vida (CCVA) de los equipos, para lo cual se emplean las funciones siguientes:

$$\begin{aligned}
 CCVA_1 &= I_{est} \cdot FRC(d, n) + PE \cdot E_{est} + M_{est} \\
 CCVA_2 &= I_{efic} \cdot FRC(d, n) + PE \cdot E_{efic} + M_{efic}
 \end{aligned}
 \tag{1.41}$$

- **Costo de ahorrar energía (CAE).**

El costo de ahorrar energía (CAE), proporciona una medida para clasificar ordenadamente las opciones de ahorro o abastecimiento de energía sobre una base consistente y que es útil para identificar las inversiones más económicamente eficientes para una empresa o un país. Este indicador se calcula como el costo de capital diferencial anualizado -diferencia entre las inversiones requeridas para la opción eficiente y estándar- más el diferencial de los costos de mantenimiento, dividido por los ahorros anuales de energía.

$$CAE = [FRC(d, n) \cdot (I_{efic} - I_{est}) + (M_{efic} - M_{est})] / (E_{est} - E_{efic}) \tag{1.42}$$

En este caso el precio de la energía no necesita especificarse, lo que constituye la fortaleza del método, debido a las incertidumbres que normalmente rodean las estimaciones del precio de la energía en un horizonte de largo plazo. La evaluación de la ventaja relativa de la opción eficiente se lleva a cabo comparando el valor de CAE con los precios vigentes de la energía, en la medida que esta diferencia sea significativa, y que aún suponiendo una disminución sustancial de éstos -obviamente, dentro de lo que la lógica permite esperar- el CAE siga siendo inferior a dichos precios, es posible concluir que la opción eficiente es recomendable.

### **1.5.2 Elementos de análisis para definir las ventajas y desventajas de los rectificadores.**

En los puntos anteriores se han detallado los métodos generales para evaluar inversiones en eficiencia energética, en el caso de un proyecto o de una ampliación de la capacidad de producción. En consecuencia, y con fines de recapitulación solamente, se enumeran a continuación los siguientes elementos a tener en cuenta en la selección y empleo de rectificadores controlados y semicontrolados:

### Ventajas:

- Control rápido de tensión DC o de la corriente DC (según el control).
- Regulación de voltaje DC (aceleración – frenado suave de MCC).
- Regulación de velocidad con menores pérdidas.
- Fácil mantenimiento.

### Desventajas:

- Generan contaminación armónica hacia el sistema de CA.
- Necesidad de filtros y/o condensadores de compensación de FP.
- Necesidad de personal especializado para el mantenimiento – control.
- Costos (especialmente de los filtros y en particular los condensadores de filtro, del sistema de control, etc.)

## **I.6 CONCLUSIONES PARCIALES**

---

- Se define la importancia de las máquinas y aparatos destinados a la investigación de las propiedades químico - físicas de los materiales, en particular para la realización de ensayos de desgaste y por ende la necesidad de la puesta en funcionamiento del simulador de desgaste CMT 2070-1.
- Se presenta un conjunto de estudios precedentes que permiten encontrar una amplia información de las temáticas que se desarrollarán en el trabajo, referente al empleo de rectificadores controlados y semicontrolados en aplicaciones tales como el control de velocidad en máquinas de CD.
- Se establece una metodología para la evaluación económica, así como las ventajas y desventajas de la utilización de los rectificadores.

## Capítulo II. Materiales y métodos.

### II.1 Introducción.

En este capítulo se desarrollan los conceptos fundamentales relacionados con el método utilizado en la investigación, la justificación de su empleo y las variables que lo caracterizan con sus niveles correspondientes.

Se establece la metodología de cálculo y se describen los procedimientos del rectificador. Al mismo tiempo se fundamentan las propiedades a investigar y se establecen los parámetros que caracterizan el rectificador, se realizan los pasos a seguir para el diseño y construcción del rectificador. Se describe además el funcionamiento de cada parte del circuito durante el desarrollo del trabajo.

El procedimiento metodológico que en lo posterior se describe tiene como objetivo fundamental.

En este capítulo se plantea como objetivo:

Diseño y construcción de un rectificador semicontrolado, así como los métodos, procedimientos para la construcción del rectificador.

#### II.1.1 Análisis de control de un motor de CD.

La velocidad de un motor CD está definida por:

$$n = n_0 \left( \frac{E_0}{E} \right) \quad (\text{II.1})$$

Donde

$n_0$  = velocidad nominal

$E_0$  = voltaje generado

$E$  = Voltaje nominal

Existen tres maneras de variar velocidad ( $W$ ) en un motor de CD.

1. Variando el voltaje de alimentación de armadura ( $V_a$ ).
2. Variando la carga sobre el motor ( $I_A$ ).
3. Variando el flujo del campo del motor ( $\phi$ )

La tercera opción generalmente no se emplea y la segunda no sirve para el control de velocidad debido a que es susceptible al cambio de la carga y no puede mantener una velocidad fija, usándose solo en combinación con el control de armadura para mayor eficiencia. Por tanto, es necesario usar el primer método buscar una mejor manera de control de voltaje CD que alimenta la armadura del rotor.

En la actualidad, por lo general la alimentación de motor de CD es obtenida rectificando la alimentación alterna, esto puede ser de rectificación monofásica o trifásica. En el caso de rectificación monofásica, esto es realizado por medio de diodos y tiristores, la ventaja es que es más económica, pero no sirve para las cargas de altas potencias.

En el caso de la rectificación trifásica, la rectificación es más compleja; la ventaja es que sirve para motores de alta potencia y la desventaja es: el costo y la complicación de la sincronización.

En esta tesis se emplea la rectificación monofásica ya que este cumple con las expectativas esperadas para el funcionamiento de la máquina de CD permitiendo una buena regulación de tensión y trayendo consigo una buena regulación de velocidad del motor de CD.

### **II.1.2 Realimentación de Velocidad o Voltaje de Armadura en el Motor de CD.**

Se requiere que el lazo de control de velocidad o voltaje, de una respuesta rápida y un error en estado estable igual a cero. El lazo de velocidad permite mantener el valor de velocidad constante de acuerdo a una referencia escogida por el usuario sin importar la variación de la carga del motor. Vale recalcar que la regulación de voltaje es menos precisa que la regulación de velocidad especialmente porque depende de la temperatura. Cuando la temperatura de motor cambia, la resistencia del devanado del campo cambiara también y por consiguiente lo hará la corriente de campo (IF) y el campo magnético y puesto que la f.e.m inducida depende del campo magnético esto afectara directamente a la velocidad.

La utilización del lazo de corriente junto con el lazo de velocidad y voltaje, permite limitar la corriente en el motor y protege por tanto a los tiristores de sobre-corrientes. Esta característica es muy útil. Ya que la corriente de arranque del motor es muy alta si no se limita, además la sobrecarga del motor también produce sobre-corriente.

Esta limitación se consigue debido a que el voltaje máximo de referencia del controlador de corriente es el voltaje de saturación del amplificador utilizado como controlador de velocidad o voltaje y es posible ajustar el límite máximo de corriente simplemente variando la ganancia del bloque limitador de corriente.

## **II.2 Diseño del circuito de mando.**

---

Como ya se conoce un circuito de mando no es más que el encargado de conmutar los interruptores de potencia del estado de bloqueo al estado de conducción en un momento determinado y de acuerdo a una estrategia de mando. En muchos de los casos la forma de diseñar estos circuitos depende de las características del convertidor de potencia que también dependen de las características de la carga.

En este trabajo se diseñó un circuito de mando que fuera capaz de sincronizar la señal de control del circuito de mando con la del circuito de fuerza.

El principio de funcionamiento se basa principalmente en variar el ángulo ( $\alpha$ ) o ángulo de disparo de los tiristores logrando variar la tensión de salida y con ello la velocidad del motor.

### **II.2.1 Partes componentes del esquema en bloque del rectificador.**

A través de circuitos electrónicos de potencia se puede garantizar el control de la velocidad de un modo sencillo y económico. Los rectificadores controlados permiten obtener de forma eficiente un componente dinámico aceptable de los motores de corriente continua. Para este estudio se ha tomado el caso de un rectificador monofásico semicontrolado al cual se le ha diseñado su circuito de mando para obtener diferentes formas de ondas y que constituya un caso típico de estudio.

Típicamente el control por fase o vertical está constituido por los bloques que conforman el esquema de la Figura 12:

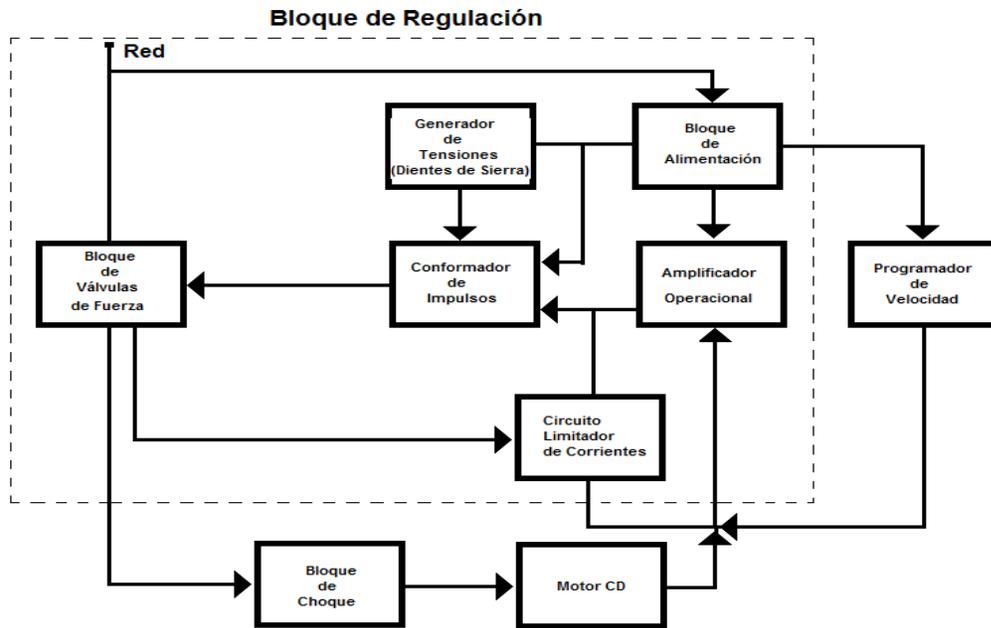


Figura 2.1. Esquema en bloque del rectificador monofásico semicontrolado.

Este bloque de regulación está compuesto por varios bloques en los que se visualiza el bloque de válvula de fuerza, el amplificador operacional, el generador de tensiones diente sierra, el conformador de impulso, el bloque de alimentación y el circuito limitador de corriente como se muestra en la (figura 2.1).

### Principio de funcionamiento del bloque de regulación.

Está basado en la propiedad de las válvulas controladas (tiristores) de variar en amplios límites el valor medio de la tensión rectificadora cambiando el tiempo de desbloqueo de los tiristores con respecto al inicio de la semionda positiva de la tensión alterna aplicada. A la entrada del amplificador operacional se le suministran dos tensiones, una parte de la fuerza electromotriz del motor eléctrico y la tensión proporcionada por el programador de velocidad. Estas dos tensiones son aplicadas en oposición y su diferencia (Fuerza electromotriz – Programador de velocidad) equivalente a  $U_{\text{entrada}}$ , controla al amplificador. Desde la salida del amplificador de tensión de salida. La señal amplificada llega al conformador de impulsos, donde es transformada en impulsos rectangulares de polaridad positiva de fase variable.

Los impulsos de este tipo se transfieren a las uniones de control de los tiristores. De esta manera el cambio de la tensión de entrada conlleva a la variación de la tensión en el motor eléctrico.

### Bloque de válvula de fuerza.

El bloque de la (Figura 2.2) sirve para transformar la tensión alterna en tensión rectificada regulable. Los elementos básicos del bloque son: El puente rectificador monofásico semicontrolado está constituido por los diodos (D5- D6) y los tiristores (D7- D8).

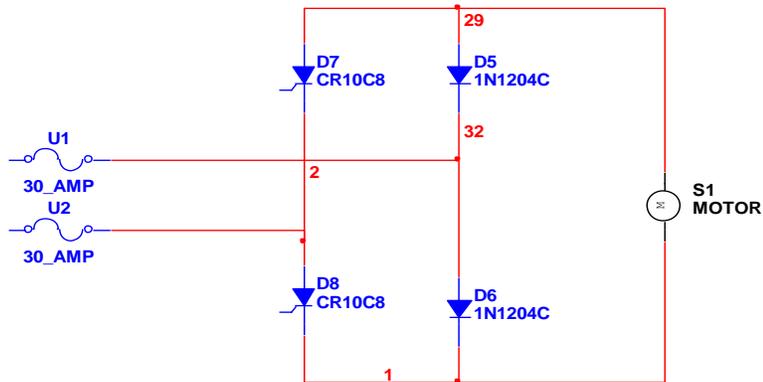


Figura 2.2 .Bloque de válvula de fuerza.

### Amplificador

El circuito amplificador operacional de la (Figura 2.3) está estructurado a base de amplificadores operacionales y sirve para amplificar las tensiones de control.

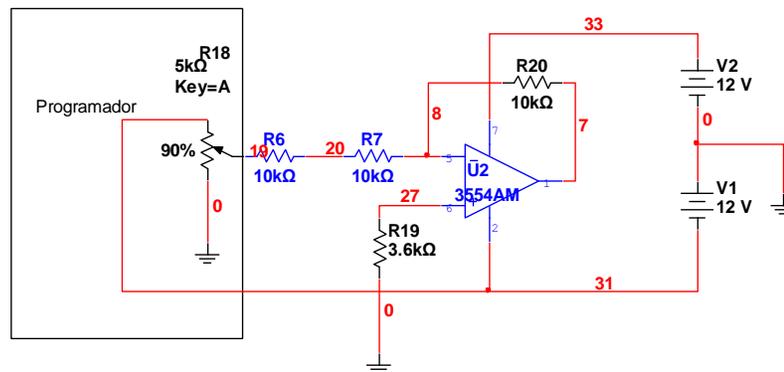


Figura 2.3. Bloque amplificador y el programador.

### Programador de velocidad (Potenciómetro).

El programador de velocidad (resistor) sirve para controlar manualmente la frecuencia de rotación del motor eléctrico. Este se representa en la (Figura 2.3).

### Generador de tensión en dientes de sierra.

El generador produce la tensión en dientes de sierra de 120 Hz de frecuencia. El esquema eléctrico principal del generador de tensión en dientes de sierra indicado en la (Figura 2.4)

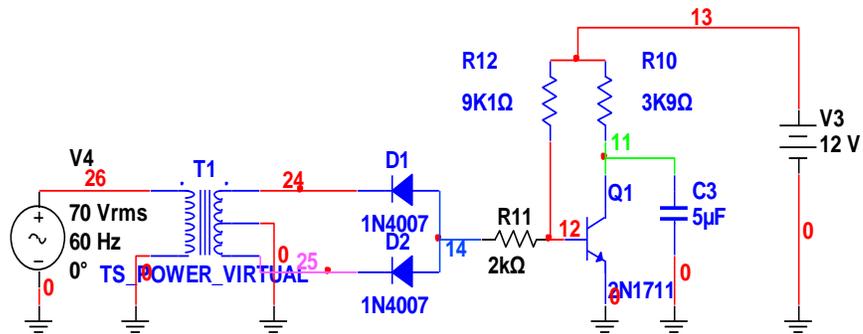


Figura 2.4. Bloque generador de tensión dientes de sierra.

En la figura 16 se representa en forma de gráfica la tensión con la forma de onda dientes de sierra producidas por Generador de la (figura 2.4).

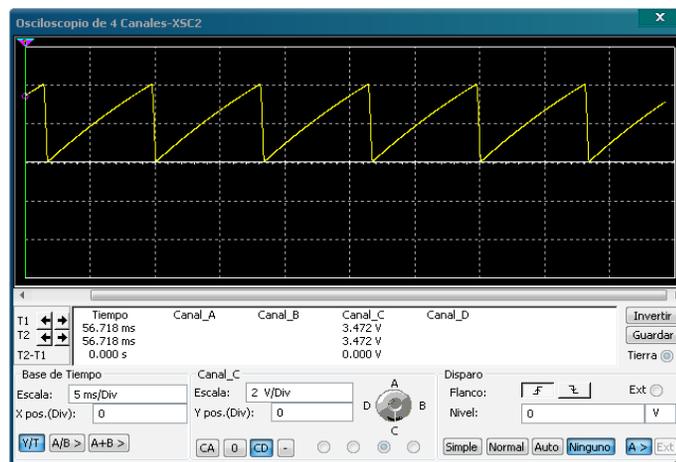


Figura 2.5. Forma de onda dientes de sierra.



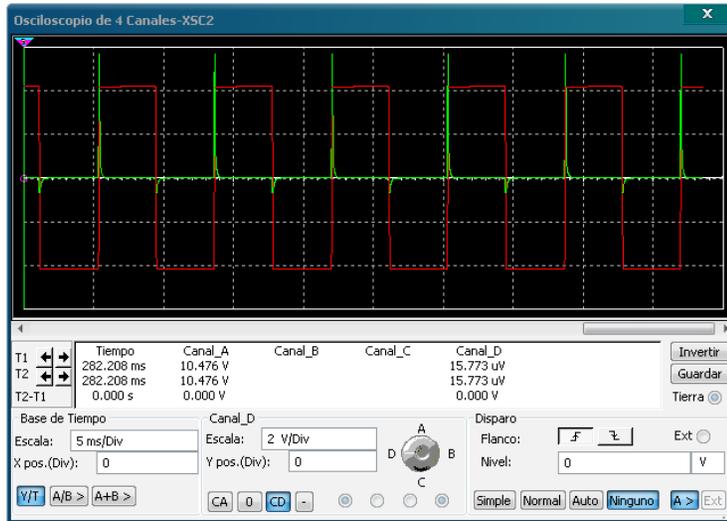


Figura 2.7. Hondas rectangulares con pico de aguja.

### Funcionamiento del conformador de impulsos.

El circuito conformador de impulso como se muestra en la Figura 17. Está constituido por un operacional TL084 como comparador el cual compara la señal de voltaje proveniente del amplificador con la señal en diente de sierra, obteniendo como resultado una señal rectangular a la salida del operacional esta señal pasa por un diferenciador conformado por el condensador C6 y resistencia R13 dando como resultado un pulso de aguja el mismo conmuta el transistor Q3 y al transformador T2 lográndose el pulso de disparo de los tiristores.

### Circuito de retroalimentación.

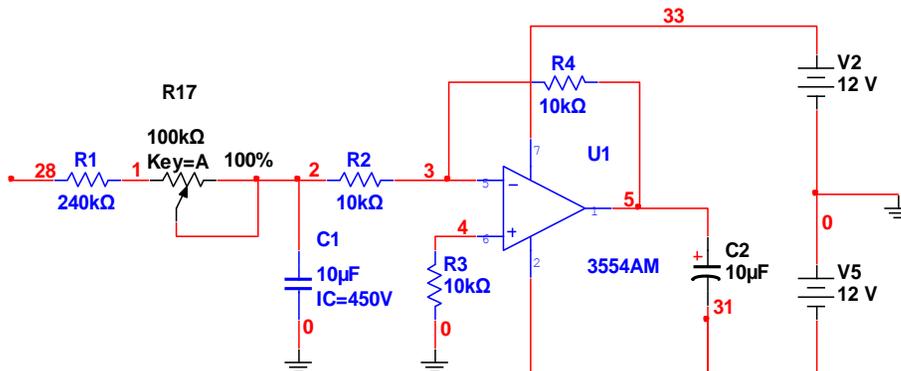


Figura 2.8. Circuito de retroalimentación.

### Circuito de retroalimentación.

El circuito de retroalimentación como se muestra en la (Figura 2.8). Está compuesto por un divisor de voltaje y un amplificador operacional como inversor, la función de este circuito es lograr la estabilidad del motor durante su régimen de trabajo. Este circuito toma una muestra de voltaje proveniente de la salida positiva del bloque de potencia la procesa y la envía a la entrada del amplificador para compararse en este punto con la señal que llega del programador, este voltaje son de polaridades opuestas.

Ejemplo: si queremos que el motor gire a 20 rpm fijamos un voltaje con el programador, los tiristores se dispararan al ángulo previsto y con esto aparecerá voltaje a la salida del bloque de fuerza y comienza a trabajar el circuito de retroalimentación llegando voltaje al punto de comparación, como este voltaje tienen polaridad opuesta va disminuir el voltaje a la entrada del amplificador fijando una velocidad estable en el motor previamente ajustado por la resistencia R17, si ocurre cualquier resistencia mecánica que provoque la disminución de la velocidad el voltaje de retroalimentación baja y aumenta el voltaje a la entrada del amplificador hasta que el motor venza esta resistencia volviendo todo a la normalidad todo este proceso ocurre en fracciones de segundos el cual no es permisible por el accionamiento.

### Bloque de alimentación.

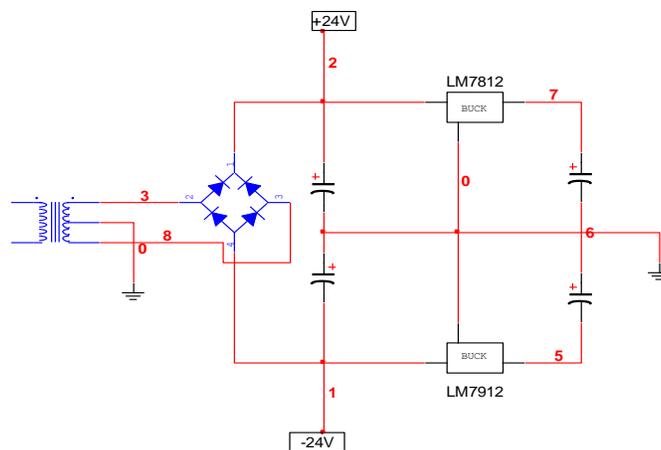


Figura 2.9. Bloque de alimentación.

Como se muestra en la figura 2.9 el bloque de alimentación, sirve para crear las tensiones de alimentación de los circuitos de control del mando. se diseña partiendo de las características del proceso que él va alimentar, partiendo de ahí se logra diseñarlo cumpliendo con las características que se necesitan para su construcción.

**Circuito limitador de corriente.**

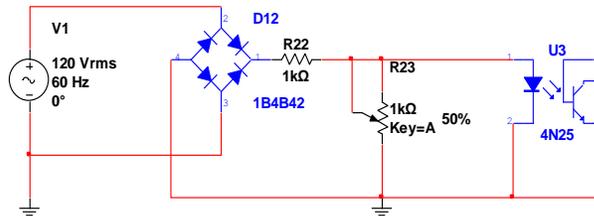


Figura 2.10. Circuito limitador de corriente.

El circuito limitador de corriente como se muestra en la figura 21, tiene como uso la protección del bloque. Al poner en marcha el motor eléctrico, al producirse el incremento brusco de la carga sobre este empieza a funcionar el circuito limitador de corriente. Este circuito consta de un puente rectificador, resistencias R22-R23 un optocoplador U3 y una fuente alterna de 120 V. Al ponerse en marcha el motor eléctrico o aumentar bruscamente su carga la corriente que fluye a través de su inducido, no es más de cuatro veces mayor que su magnitud nominal, gracias al ajuste apropiado de los valores de los elementos del circuito. Funcionando el mando en las condiciones normales sin bruscas variaciones de la carga y de la frecuencia de rotación del motor eléctrico el optocoplador se encuentra bloqueado no ejerciendo alguna influencia en el trabajo del circuito de mando. En el amplificador con operacionales esta empleado el circuito de realimentación negativa constituido por el condensador C2 para hacer más estable el funcionamiento del circuito del mando durante los regímenes de transitorios, por medio de este circuito se imprime se imprime el carácter operiódico al funcionamiento del mando en los regímenes transitorios.

## II.2.2 Metodologías de cálculo para el rectificador monofásico semicontrolado.

### Cálculo de Armónicos:

Los circuitos de potencia son circuitos no lineales dado que tienen componentes no lineales. No obstante, considerando sus componentes como elementos de conmutación ideales, el análisis en régimen permanente de los circuitos de potencia puede realizarse mediante la resolución de una sucesión de circuitos lineales en régimen transitorio, cada uno de los cuales tiene validez durante periodos de tiempo denominados intervalos. Los límites de estos intervalos vienen fijados por los denominados parámetros de control. Estos parámetros de control tienen, principalmente, dos causas:

1. Excitaciones externas, tales como fuentes que varían su valor, disparo de tiristores o variaciones en la polarización de base de los transistores y
2. Condiciones umbrales de los dispositivos de potencia, las cuales, si se alcanzan, provocan un cambio de estado del dispositivo. Consideremos, por ejemplo, una tensión ánodo-cátodo negativa en un diodo en conducción o una tensión superior a la de ruptura en dispositivos de avalancha.

En todo circuito se puede escoger un conjunto de variables (normalmente tensión en condensadores y corriente o flujo en bobinas) representativas de una energía almacenada, cuyo valor no puede alterarse bruscamente. Estas variables, cuyo conjunto recibe el nombre de condiciones de contorno, nos permiten relacionar cada intervalo con el siguiente. El valor de estas condiciones de contorno al finalizar un intervalo constituyen, precisamente, las condiciones iniciales para el cálculo del intervalo siguiente.

Estas condiciones de contorno se complementan con la condición de periodicidad característica del funcionamiento en régimen permanente. Los valores finales en el último intervalo de las variables de contorno deben corresponderse con sus valores iniciales del primer intervalo.

En el circuito no lineal del ejemplo, puede representarse por el circuito lineal de la figura (intervalo 1) durante el intervalo  $(0, t_1)$  y por el circuito lineal de la figura (intervalo 2) durante el intervalo  $(t_1, 2\pi/\omega)$ . El paso de un intervalo a otro es debido a la conmutación del diodo al pasar por cero su corriente. La condición de contorno que liga ambos intervalos es el valor de la corriente en la bobina. Nótese que si, en el ejemplo anterior,  $t_1 > 2\pi/\omega$ , el diodo nunca se cortaría y el circuito de la figura (intervalo 1) sería una adecuada

representación del circuito original en todos los instantes de su funcionamiento en régimen permanente. Por ello, no podemos saber a priori cuantos intervalos habrá y cual será su duración, ya que dependerá de los parámetros del circuito e incluso, en algunos casos, de sus condiciones iniciales de funcionamiento.

Es usual que en la resolución de un circuito de potencia se obtengan expresiones muy complejas para las variables de interés, con términos exponenciales y términos senoidales de distinta fase y frecuencia. En la mayor parte de los casos nuestro interés se centrará exclusivamente en una determinada componente de frecuencia de la señal (típicamente su valor medio y su primer armónico) o en su valor eficaz (a efectos térmicos). En muchos casos, incluso, el resto de las componentes serán indeseables, debiéndose estimar su magnitud a efectos de diseño de filtros que eliminen su presencia. En general, dada una señal periódica, de periodo  $T$ , se definen los siguientes parámetros que caracterizan la señal:

- Valor de pico  $I_p = \max|i(t)|, \quad 0 \leq t \leq T$  (II.2)

Pueden distinguirse dos valores de pico (positivo y negativo) para considerar los casos de polarización directa e inversa.

- Valor Medio  $I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) \cdot dt$  También se le representa como  $I_{AV}$  (II.3)

Para el cálculo de la corriente media empleada para dimensionar un dispositivo, se calcula el valor medio del valor absoluto de la señal.

- Valor eficaz  $I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$  También se le representa como  $I_{RMS}$  (II.4)

- Factor de forma  $f = \frac{I}{I_m} = \frac{I_{RMS}}{I_{AV}}$  (II.5)

- Factor de pico  $f = \frac{I_p}{I} = \frac{I_{\max}}{I_{RMS}}$  (II.6)

⇒ los armónicos no contribuyen a la potencia media (real o activa).

La potencia aparente, se define como el producto de los valores eficaces de la tensión y la corriente (cuyo valor como se ha visto depende de los armónicos presentes).

$$S = V \cdot I \quad (\text{II.7})$$

El factor de potencia (PF) se define como:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos \Phi_1}{V \cdot I} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \Phi_1 = \frac{I_1}{I} \cdot DPF \quad (\text{II.8})$$

donde DPF es el factor de potencia debido al desfase, la ecuación anterior puede reescribirse (para ondas cuyo valor medio sea cero, como es habitual en sistemas de alimentación alterna):

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + D_i^2}} \cdot DPF \quad (\text{II.9})$$

⇒ la existencia de armónicos hace que disminuya el factor de potencia.

Cálculo de valores eficaces:

La expresión que permite calcular el valor eficaz de una señal puede obligar a realizar complejos cálculos, por lo que en algunos casos conviene simplificarla, de forma que en un período, la señal se descompone en N intervalos de tiempo consecutivos, con tal de que no coincidan en un instante dos o más con valor no nulo.

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (\text{II.10})$$

En general, si se conocen los valores eficaces de cada intervalo, puede aplicarse la fórmula:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2} \quad (\text{II.11})$$

Se puede hacer por ejemplo:

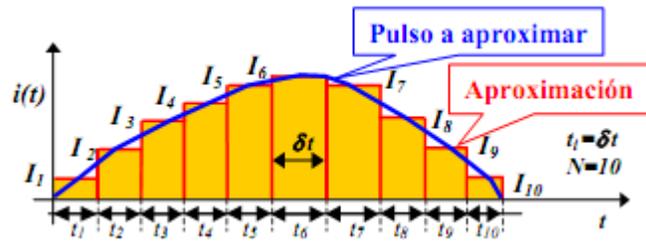


Figura 2.11. Descomposición en N intervalos de la señal

Si se aproxima por N intervalos cuadrados de igual duración, el valor eficaz es:

$$I = \sqrt{\frac{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_N^2}{N}} \quad (\text{II.12})$$

En general se podría hacer una aproximación como la siguiente:

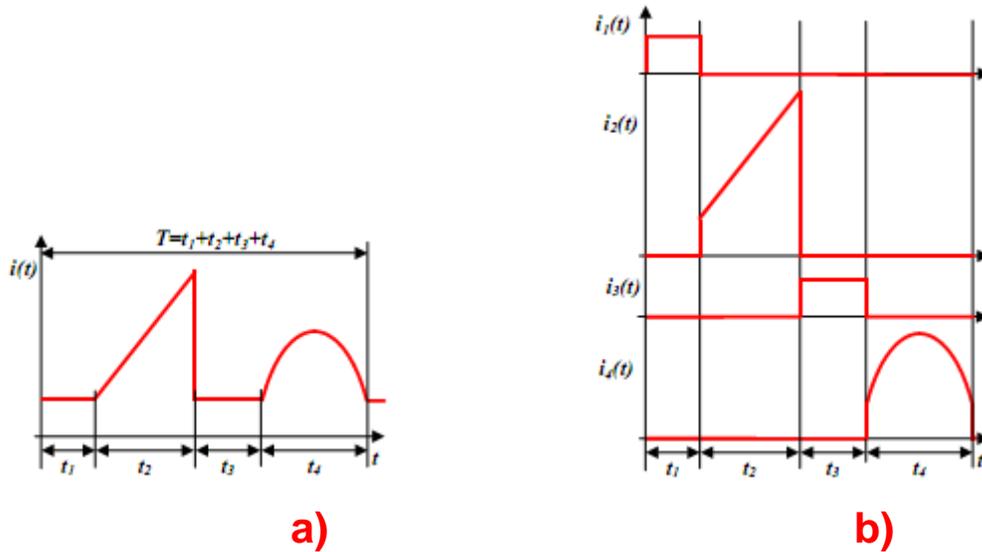


Figura 2.12. Aproximación del valor eficaz en formas de onda.

Algunas formas de onda usuales y sus valores eficaces son:

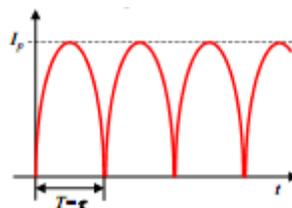


Figura 2.13. Onda completa senoidal

$$I = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \tag{II.13}$$

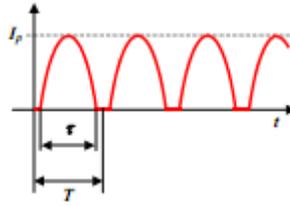


Figura 2.14. Onda senoidal recortada por nivel.

$$I = I_p \sqrt{\frac{D}{2}}, \text{ con } D = \frac{\tau}{T} \tag{II.14}$$

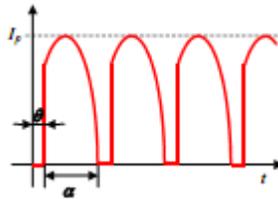


Figura 2.15. Onda senoidal recortada por ángulo de fase:

$$I = I_p \sqrt{\frac{D}{2} + \frac{\text{sen}(\alpha(1-D))\text{cos}(\pi(1-D))}{2\pi}} \tag{II.15}$$

$$D = 1 - \frac{\theta}{\alpha}; \text{ (}\alpha, \theta \text{ en radianes)} \tag{II.16}$$

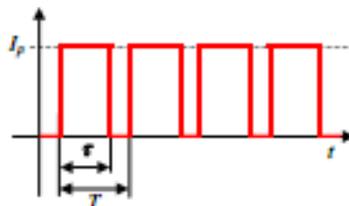


Figura 2.16. Onda rectangular.

$$I = I_p \sqrt{D} \text{ con } D = \frac{\tau}{T} \tag{II.17}$$

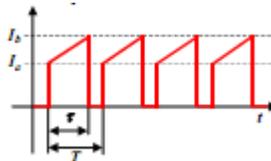


Figura 2.17. Onda trapezoidal.

$$I = \sqrt{D(I_b^2 + I_a I_b + I_a^2)^3} \text{ con } D = \tau/T \quad (\text{II .18})$$

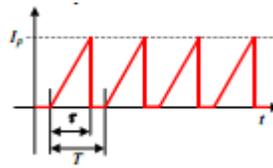


Figura 2.18. Onda triangular

$$I = I_p \sqrt{\frac{D}{3}} \text{ con } D = \tau/T \quad (\text{II .19})$$

### II.3 Simulación referida al caso de estudio.

#### II.3.1 Software utilizado en el caso de estudio.

##### Multisim 11

NI Multisim es una herramienta que integra una potente simulación SPICE y entrada de esquemáticos integrándolo en un laboratorio de electrónica sumamente intuitivo sobre un PC.

##### **Descripción.**

NI Multisim es una herramienta para el diseño electrónico. Basado en herramientas de diseño PCB profesionales, NI Multisim fue diseñado pensando en las necesidades de educadores y estudiantes, además de cumplir ampliamente con los requerimientos de los ingenieros y diseñadores a nivel profesional. NI Multisim cuenta con todas las características de sus predecesores, nuevas características técnicas como puntas de prueba industriales, intercambio de datos con instrumentos virtuales y "reales", corrector de errores y sugerencias de cambios sobre el circuito, simulación integrada con microcontroladores, además de una alta integración con la familia de productos de National Instruments. NI Multisim se encuentra disponible en el mercado en versiones dirigidas al campo de la educación: NI Multisim versión Educación y dirigidas al campo profesional: NI Multisim versión profesional.

### **NI Multisim Versión Educativa:**

NI Multisim es una herramienta intuitiva para la captura de esquemáticos idealmente diseñada con fines educativos. Los estudiantes pueden interactivamente simular sus diseños usando el estándar industrial SPICE sin necesidad de conocer a fondo su sintaxis. Con los instrumentos virtuales interactivos incluyendo osciloscopios, multímetros y puntas de prueba dinámicas, los estudiantes rápida y fácilmente miden las características del circuito, todas en el mismo entorno de trabajo. Con una base de más de 10.000 componentes, los estudiantes podrán experimentar con una gran variedad de topologías de circuitos para ganar experiencia y conocimiento en el diseño electrónico. NI Multisim se integra con la plataforma de prototipado NI ELVIS. NI Multisim cuenta con prototipado virtual: protoboard 3D virtual y NI ELVIS protoboard 3D virtual para medir sus diseños antes de construirlos con componentes reales; la integración termina completándose con el uso de herramientas como NI LabVIEW y NI Signal Express.

**La edición académica de Multisim 11** incorpora características especializadas de enseñanza y se completa con libros de texto y cursos sobre circuitos. Este sistema integrado ayuda a los educadores a involucrar a los estudiantes y a reforzar la teoría de circuitos con un método práctico e interactivo para investigar el comportamiento de los circuitos. Con gran aceptación en el mundo académico, escuelas técnicas y ciclos universitarios de cuatro años, éstas han elegido Multisim por sus componentes interactivos, simulación de instrumentos e integración con las medidas analógicas y digitales del mundo real.

Multisim 11 Professional ayuda a los ingenieros a optimizar el diseño de los circuitos, minimizar los errores y reducir las iteraciones del prototipo. Cuando se combina con el nuevo software de diseño y trazado de pistas NI Ultiboard 11, Multisim proporciona a los ingenieros una plataforma de creación de prototipos rentable de principio a fin. Su integración con el software de medida NI LabVIEW ayuda también a los ingenieros a definir los análisis personalizados para mejorar la validación del diseño. Entre las ventajas académicas de Multisim 11 se incluyen las siguientes:

- Simplificación de la enseñanza de los circuitos digitales mediante la exportación de VHDL en bruto de esquemas de dispositivos de lógica programable (PLD).
- Guía práctica de experimentos de electrónica con el nuevo análisis de frecuencia única de AC pedido por el educador.

- Correlación de los datos simulados con las medidas del mundo real mediante la integración con la plataforma educativa de creación de prototipos NI Electronic Laboratory Virtual Instrumentation Suite (NI ELVIS).

### **NI Multisim Versión Profesional**

NI Multisim es una herramienta ampliamente usada en el campo profesional, gracias a su potente entorno interactivo, no requiere un conocimiento amplio en simulación SPICE ni una amplia experiencia en el uso de herramientas de simulación. Con NI Multisim realice captura, simulación y postprocesado en el mismo entorno. Lo que elimina los altos costos de realizar el diseño en múltiples etapas repetitivas, asegurando la alta calidad en la simulación y medidas en el diseño. La familia de productos a nivel profesional de NI Multisim (Base, Full y Power Pro) ofrece un amplio conjunto de herramientas para los diseñadores profesionales:

- Entorno de diseño intuitivo
- Cableado sin modelado y colocación
- Instrumentos virtuales interactivos
- Asistentes para creación automática de circuitos
- Rubberbanding sobre componentes y cableado
- Fácil exportación al diseño PCB usando NI Ultiboard
- 24 tipos de análisis
- Más de 16.000 componentes, todos con modelos listos para ser simulados
- Fácil adición de nuevas partes y modelos de simulación
- Simulación con micro controladores y co-simulación VHDL
- Intercambio de información e instrumentos desde y hacia NI LabVIEW y NI Signal Express

**Multisim 11 Professional** ayuda a los ingenieros a optimizar el diseño de los circuitos, minimizar los errores y reducir las iteraciones del prototipo. Cuando se combina con el nuevo software de diseño y trazado de pistas NI Ultiboard 11, Multisim proporciona a los ingenieros una plataforma de creación de prototipos rentable de principio a fin. Su integración con el software de medida NI LabVIEW ayuda también a los ingenieros a definir los análisis personalizados para mejorar la validación del diseño.

Entre las características incluidas en Multisim 11 destacan:

- Excelente capacidad de simulación gracias a las mejoras en la división del código en componentes funcionales de SPICE, la actualización de modelos BSIM, el soporte para parámetros avanzados y la precisión mejorada de la simulación digital.
- Creación de prototipos con más facilidad y garantía de la sincronización y transparencia del diseño con la anotación mejorada “forward/backward” desde esquemas de Multisim a diseños Ultiboard
- Mejora de la comunicación del diseño con los conectores en la página y nuevo sistema de nomenclatura de red WYSIWYG.

### **II.3.2 Características de entrada y salida.**

Las características de este rectificador semicontrolado fueron desarrolladas a partir de la necesidad que se tenía con respecto al funcionamiento del equipo simulador de desgaste CMT 2070-1, necesidad urgente por parte de trabajos doctorales que están en espera del funcionamiento de este, partiendo de ahí se tomaron todos los datos necesarios para su diseño, se le cogieron los datos del motor, este como caso de estudio. Se necesitaban conocer algunos parámetros del motor fundamentales como la corriente, potencia y voltaje partiendo de ahí ya se podía comenzar a diseñar el rectificador, se alimenta de 220 V de la red así llegándole energía al bloque en el proceso después de pasar por todos los esquemas del bloque de regulación, podemos obtener entonces una tención de salida 110V de CD este con una buena regulación de voltaje permitiendo consigo una buena y estable regulación de velocidad en el motor eléctrico logrando un buen funcionamiento del equipo simulador de desgaste, con estas características tenemos un buen funcionamiento del equipo logrando el principio que exige .

#### **II.4 Conclusiones Parciales.**

- Se muestra los métodos para el control de la velocidad de un motor de CD como el del caso de estudio de la máquina CMT2070-1, se selecciona la rectificación monofásica ya que este cumple con las expectativas esperadas para el funcionamiento de la máquina de CD permitiendo una buena regulación de tensión y con una excelente regulación de velocidad del motor.
- Se ha diseñado un circuito de mando para obtener las formas de ondas que constituya al caso típico de estudio y se muestra una metodología para el cálculo del rectificador monofásico de media onda.
- Se define la utilización del software Multisim 11 para la simulación del circuito diseñado que controlará el motor de CD de la máquina CMT2070-1.

## Capítulo III. Análisis de los Resultados Generales

### III.1 Introducción.

---

Las razones más comunes por las que se realizan pruebas de desgaste, son para obtener datos experimentales para ser aplicados a un fin específico, como es el conocer; la vida útil de un acoplamiento, evaluar los costos de mantenimiento y obtener un funcionamiento más confiable del sistema. De igual forma éstas permiten estudiar y evaluar los mecanismos de desgaste que se presentan, así como las ecuaciones semiempíricas asociadas. En consecuencia se puede determinar y caracterizar el comportamiento del desgaste.

Este ensayo, también nos permite la adecuada selección del material para, los diferentes mecanismos que estén sometidos a desgaste por rozamiento o fatiga, ya que la dureza puede ser un factor importante en la resistencia a este tipo de desgaste.

La problemática existente en la máquina para los experimentos tribológicos que se encuentra ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, consistía en que la misma carecía de un circuito que controlara la velocidad del motor de CD destinado a accionar eficientemente el mecanismo de desgaste por fricción a materiales sólidos.

Para el control de la velocidad del motor de CD de la máquina CMT2070-1, se selecciona la rectificación monofásica ya que este cumple con las expectativas esperadas para el funcionamiento de la misma, permitiendo una buena regulación de tensión y trayendo consigo una buena regulación de velocidad del motor.

### Objetivo del capítulo

---

1. Realizar la valoración crítica de los resultados y a través de ella, explicar los fundamentos científicos que dan solución al problema planteando a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

### III.1.1 Esquema de control y fuerza del circuito rectificador monofásico

semicontrolado honda completa.

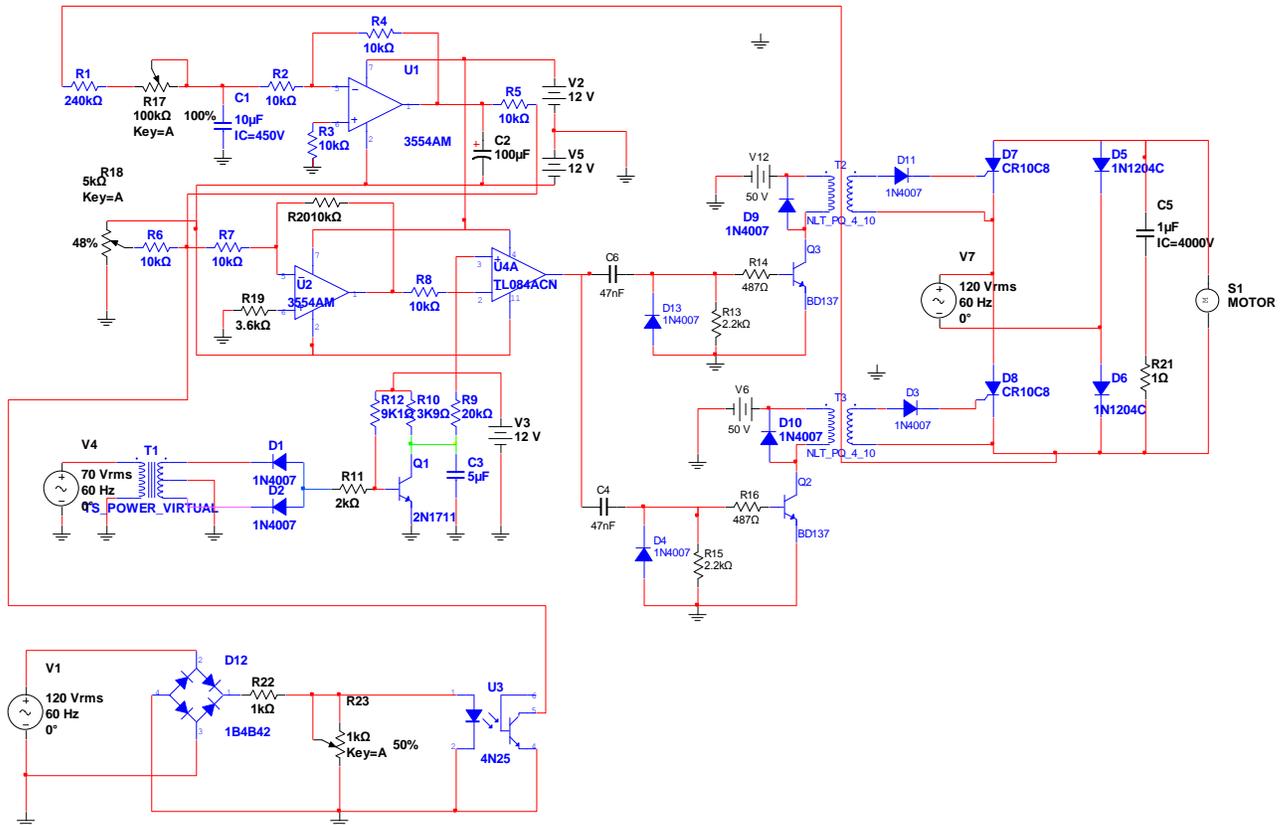


Figura 3.1. Esquema del circuito rectificador monofásico de onda completa.

Este circuito que se representa en la figura (3.1) es el circuito real que se diseñó para el control de velocidad del motor del simulador de desgaste 2070-1, máquina para los experimentos tribológicos que se encuentra ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, este esquema ya ha sido probado logrando excelentes resultados se logró una buena regulación de velocidad cumpliendo con los resultados esperados.

### III.1.2 Simulaciones del circuito rectificador semicontrolado

Para cumplimentar los resultados de las tareas de diseño se realizaron un conjunto de simulaciones con la ayuda del software NI Multisim 11, de las cuales se muestran algunos ejemplos para diferentes porcentajes de la tensión

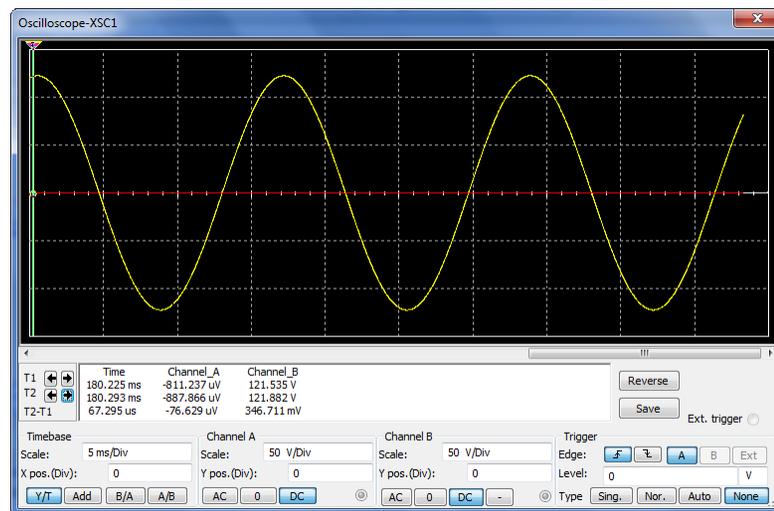


Figura 3.2 Simulación del circuito rectificador monofásico de onda completa (0 V)

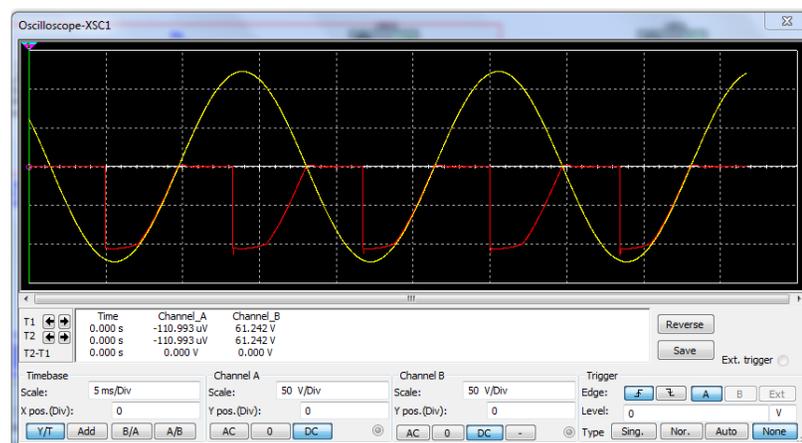


Figura 3.3. Simulación del circuito rectificador monofásico de onda completa (33 V)

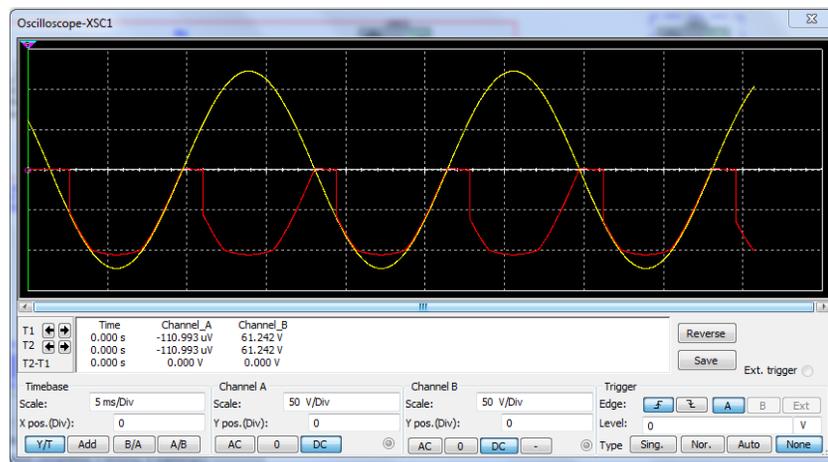


Figura 3.4. Simulación del circuito rectificador monofásico de onda completa (67)

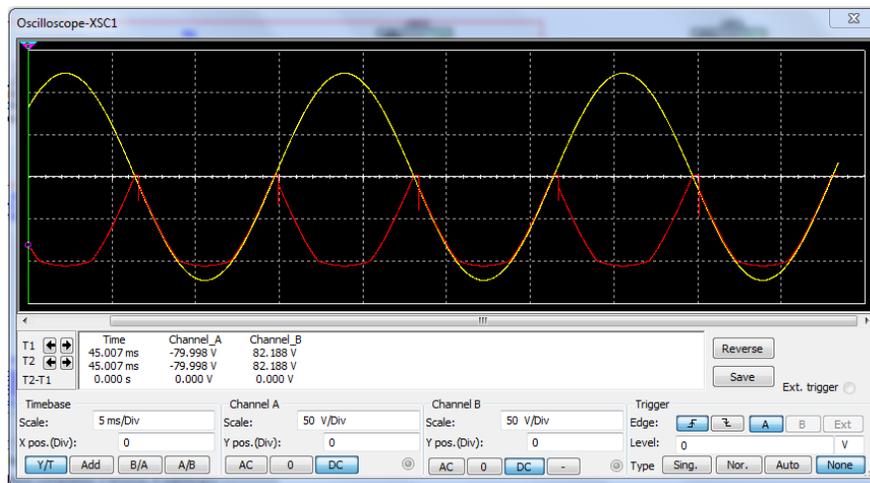


Figura 3.5. Simulación del circuito rectificador monofásico de onda completa (90 V).

### III.1.3 Funcionamiento del mando en marcha en vacío.

Si el programador de velocidad establece una cierta tensión se produce una tensión al girar el motor eléctrico. A la tensión en entrada del amplificador operacional equivalente a la tensión del motor (V programador), corresponden ciertos momentos de desbloqueo de los tiristores del bloque de válvulas de fuerza, durante los cuales la tensión de salida está conforme con las revoluciones del motor eléctrico. El circuito de regulación automática del mando se halla estable. Si se cambia la posición del programador de velocidad poniéndolo, por ejemplo, en posición correspondiente a la mayor frecuencia de rotación

del motor eléctrico se aumenta la tensión que establece el programador. Al cambiar la posición del programador de velocidad en el sentido de reducción de las revoluciones del motor eléctrico se disminuirá la tensión del bloque de válvulas de fuerza y la frecuencia de rotación del motor eléctrico poniéndose en estado estable el mando a la frecuencia reducida de rotación del motor eléctrico

#### **III.1.4 Análisis de las condiciones con la carga.**

Al aumentar la carga sobre el motor eléctrico desde la de la marcha en vacío hasta la nominal crecen la corriente y la caída de tensión en el inducido del motor eléctrico. La caída de tensión en el inducido hace disminuirse su fuerza electromotriz y la magnitud de la tensión del motor eléctrico. La reducción de la tensión del motor con la tensión programada constante, provoca la disminución de la tensión de entrada. Al reducirse la tensión de entrada aumenta la tensión en el motor eléctrico. Al variar la carga sobre el motor siendo constante la posición del programador de velocidad, la tensión en el inducido cambia automáticamente de manera que se compense la caída de fuerza electromotriz y de frecuencia de rotación del motor eléctrico.

### **III.2 Disposición y montaje.**

---

#### **III.2.1 Medida de seguridad**

.La colocación, el montaje y la explotación deben realizarse con arreglo al, Reglamento de seguridad en la explotación de las instalaciones eléctricas de los consumidores. Efectuar la inspección, la limpieza, la reparación, la regulación y el cambio de elementos solo después de la desconexión del mando de la red de corriente alterna

### **III.2.2 Preparación para el trabajo.**

Cerciorarse de que el montaje eléctrico del mando este hecho correctamente.

Poner el programador de velocidad en la posición de mínimas revoluciones y enchufar el mando a la red, el motor eléctrico debe girar siendo mínimo el número de sus revoluciones.

Instalar la frecuencia nominal de rotación del motor eléctrico haciendo girar el programador de velocidad

Fijar por medio del programador de velocidad la frecuencia de rotación deseada siendo nominal la carga sobre el motor eléctrico. El mando queda preparado para el trabajo normal

### **III.2.3 Mantenimiento técnico.**

Hacer la inspección de los bloques de regulación y de choque no menos de una vez al semestre a fin de comprobar la seguridad de los contactos, limpiarlos del polvo por soplado de aire comprimido.

Realizar cuidados al motor eléctrico conforme a la instrucción del motor eléctrico y cuando no la haya, guiarse por lo que queda dicho a continuación.

#### **Cuidados al colector**

Cada tres meses realizar la limpieza del colector con trapo limpio, no fibroso empapado en gasolina o alcohol.

Pulir la superficie del colector con lija de vidrio en caso de que haya huellas de quemaduras en ella, tornear el colector si su superficie está muy desgastada por las escobillas

#### **Cuidados a las escobillas.**

Reemplazar escobillas que se hayan desgastado resultando su altura menor de 10 mm, por las nuevas.

Esmerilar las escobillas nuevas por toda la superficie del colector hasta que se ajusten por completo.

Cambiar el lubricante del cojinete después del motor haber trabajado 2000-3000 horas.

### **III.3 Evaluación económica**

Al abordar la valoración técnico económica del proceso, todo ello sin dudas repercute económicamente por la sustitución de importaciones, la recuperación del simulador permitirá determinar la dureza de las piezas tratadas, al incrementar su durabilidad por tener mayor resistencia al desgaste y a la corrosión, aumenta su fiabilidad por tener mayor resistencia a la rotura por incremento de la resistencia de las piezas y mayor resistencia a la fatiga, lo que condiciona un funcionamiento más eficiente de la maquinaria en general.

Para la estimación de los costos de fabricación que se desean determinar se parte de la metodología del cálculo del costo de fabricación conocida como “Ficha para costos, precios y su componente en pesos convertibles” que en formato de hoja de cálculo se utiliza como Norma empresarial en la Empresa Mecánica del Níquel Comandante “Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa, para calcular las fichas de costo. Dicho documento, elaborado conjuntamente por los Ministerios de Finanzas y de Economía y Planificación, es por el cual se rige la empresa, realizando sus adecuaciones según las características particulares de cada tipo de pieza.

La metodología empleada está destinada para el estimado del cálculo del costo de fabricación para diferentes procesos tecnológicos que se llevan a cabo en dicha industria, poseyendo además una amplia y actualizada base de datos que comprende tarifas salariales, máquinas herramienta y sus consumos de energía eléctrica, precios de materiales, entre otros. A los efectos de la valoración económica de los resultados de la presente tesis, resulta factible emplear esta norma por cuanto posee una base de información de larga data en dicha empresa, además de su probada efectividad en las

transacciones económico - financieras de dicho centro. En la tabla 3.1 y 3.2, se recogen las fichas de precios para la realización del rectificador.

El costo de la construcción del rectificador obtenido por concepto de mano de obra, materiales y transportación incurrió en un monto total de \$ 477.44 en moneda nacional CUP y \$ 165.88 en peso cubano convertible CUC.

La compra de este accionamiento para un motor de la misma característica del tipo de control motor que necesita la instalación tiene un precio en el mercado internacional de \$ 3150.00 USD, considerando la limitación de recursos financieros que actualmente presenta nuestro país, además de las trabas comerciales producto a las leyes extraterritoriales impuestas a nuestra nación al menos en estos momentos, no sería posible la adquisición del mismo.

Al evaluar el costo de la fabricación del circuito, en relación con el costo de la compra en el exterior, se ahorra una suma considerable de dinero en divisas y se contribuye a la sustitución de importaciones eliminando las fugas de capitales.

Tabla 3.1. Ficha de precio para el cálculo de los gastos de la fabricación del circuito rectificador.

**FICHA DE PRECIO**

R-13/  
ST-P-  
001

<b>Fecha:20/06/11</b>		<b>Plan (X) Extra ( )</b>		<b>DENOMINACIÓN: CIRCUITO RECTIFICADOR SEMICONTROLADO</b>			<b>Dimensiones:</b>		<b>Destino: -----</b>		
<b>Cant: 1</b>		<b>Ruta: -----</b>		<b>Orden: -----</b>			<b>No. Plano: -----</b>		<b>Empresa Solicitante: ISMM</b>		
<b>Material Utilizado:---</b>		<b>Peso Mat. Kg: ----</b>		<b>Peso Neto Kg: -----</b>			<b>Material Predominante: -----</b>		<b>No. de tecnología: -----</b>		
<b>No</b>	<b>Operación</b>	<b>Equipo Tecnológico</b>	<b>Espec. Trab</b>	<b>Tiempo Hrs.</b>	<b>Tarifa Horaria</b>	<b>Importe</b>	<b>Observaciones</b>				
	DISEÑO EN MULTISIM	SOFTWARE MULTISIM	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	24.000	3.73	89.52	XI	ELECTRÓNICA			<b>128.00</b>
	SELECCIÓN DE COMPONENTES		TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	16.000	3.73	59.68	XI	ELECTRÓNICA			
	MONTAJE EN PROTOBOARD	PROTOBOARD	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	16.000	3.73	59.68	XI	ELECTRÓNICA			
	AJUSTES Y PRUEBAS EN PROTOBOARD	COMPENDIO METROLÓGICO	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	8.000	3.73	29.84	XI	ELECTRÓNICA			
	PREPARACIÓN DE PLACA VIRGEN	COMPENDIO METROLÓGICO	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	8.000	3.73	29.84	XI	ELECTRÓNICA			
	MONTAJE DEL CIRCUITO	COMPENDIO METROLÓGICO	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	32.000	3.73	119.36	XI	ELECTRÓNICA			
	AJUSTES Y PRUEBAS DEL CIRCUITO	COMPENDIO METROLÓGICO	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	8.000	3.73	29.84	XI	ELECTRÓNICA			
	INSTALACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL CIRCUITO	COMPENDIO METROLÓGICO	TÉC.A EQ Y SIST DE MED AUT.	16.000	3.73	59.68	XI	ELECTRÓNICA			

**Elaborado :** \_\_\_\_\_ **Fecha:** \_\_\_\_\_ **Firma:** \_\_\_\_\_

**Aprobado :** \_\_\_\_\_ **Fecha:** \_\_\_\_\_ **Firma:** \_\_\_\_\_

**Importe  
Salario:477.44**

Tabla 3.2. Ficha de precio de los componentes para la fabricación del circuito rectificador.

**FICHA DE  
PRECIO:RECTIFICADOR**

Material utilizado	Unidad de medida	Cant	Código	Importe	Total:	Genérico
				Precio unit	Importe	
TRANSISTOR KT 837	U	2,0	67052326010000	0,5	1,00	
TRANSISTOR BC 548	U	1,0	73160100250000	2,15	2,15	
CIRCUITO INTEGRADO 741	U	3,0	73160610060000	2,09	6,27	
RESISTENCIAS	U	10,0	73210410320000	0,025	0,25	
BASE DE CIRCUITO INTEGRADO	U	3,0	57631500500000	0,357	1,07	
FILTRO DE 1000 MF	U	2,0	73230400180000	1,26	2,52	
FILTRO DE 4.7 MF	U	1,0	57631500410000	0,08	0,08	
FILTRO DE 0.47 MF	U	4,0	73230400120000	0,07	0,28	
DIODO 1N 4007	U	10,0	73232640250000	0,015	0,15	
REGULADOR DE VOLTAGE 7815	U	1,0	73229991400000	0,036	0,04	
REGULADOR DE VOLTAGE 7915	U	1,0	73110280840000	0,071	0,07	
PUENTE DE DIODOS SKB208L5A	U	2,0	73232640280000	3,9	7,80	
DIODO DE POTENCIA	U	2,0	73218380640000	52,4	104,80	
TIRISTORES	U	2,0	67040212700000	19,7	39,40	

Tabla 3.2. Ficha de precio de los componentes para la fabricación del circuito rectificador

### III.3.1 Impacto económico

<b>Equipo</b>	<b>Costo de la Fabricación \$</b>	<b><i>Costo de la Importación \$</i></b>	<b>Ahorros \$</b>
<b>Rectificador Semicontrolado</b>	643.32	3 150,00	<b>2 506.68</b>

Tabla 3.3 Ahorros con la fabricación del rectificador en la Empresa Mecánica del Níquel.

No es necesario aplicar la tasa de descuento que permite comparar cuantitativamente gastos y ahorros que ocurren en fechas diferentes, pues en el momento presente los ahorros son casi 4 veces el valor de los costos que pudieron haberse ejecutados.

La evaluación de los beneficios relativos de la inversión independientemente de los costos está en la puesta en funcionamiento del equipo, pues está permitirá caracterizar materiales o simular las condiciones de desgaste o fricción.

### III.4 CONCLUSIONES PARCIALES.

- Los gráficos muestran la Simulación de la regulación de tensión del circuito rectificador que valida el funcionamiento satisfactorio del convertidor estático.
- La evaluación económica del trabajo refleja un beneficio económico de \$ 2506,68.
- Para la simulación del circuito diseñado se utiliza el software Multisim 11.
- Se comprobó que era más factible económicamente fabricar e instalar el circuito rectificador semicontrolado que la compra de uno nuevo en el mercado.

---

### CONCLUSIONES GENERALES

---

3. Se precisa la necesidad de la puesta en funcionamiento del simulador de desgaste CMT 2070-1 ubicada en el laboratorio de intercambiabilidad y mediciones técnicas del ISMM Dr. Antonio Núñez Jiménez, la máquinas está destinados a la investigación de las propiedades químico - físicas de los materiales, en particular para la realización de ensayos de desgaste.
4. Por estudios de trabajos precedentes se pudo encontrar una amplia información de las temáticas que se desarrolla en el trabajo, referente al empleo de rectificadores controlados y semicontrolados en aplicaciones tales como el control de velocidad en máquinas de CD con sus ventajas y desventajas.
5. Se seleccionan la rectificación monofásica para el control de la velocidad del motor de CD de la máquina CMT2070-1, por cumplir con las expectativas esperadas para el funcionamiento de la máquina, permitiendo una buena regulación de tensión y trayendo consigo una buena regulación de velocidad del motor.
6. Se diseña el circuito de mando para obtener las formas de ondas que constituya al caso típico de estudio y se muestra una metodología para el cálculo del rectificador monofásico de onda completa.
7. Los gráficos que muestran las variables del comportamiento de la En el capítulo se presenta el regulación de tensión del circuito rectificador validan el funcionamiento satisfactorio del convertidor estático.
8. La evaluación económica del trabajo refleja un efecto financiero bastante bueno por concepto de utilización de la maquina simuladora de desgaste, debido al diagnostico oportuno en los mecanismos debido al fenómeno desgaste.
9. Se define la utilización del software Multisim 11 para la simulación del circuito diseñado que controla el motor de CD de la máquina CMT2070-1.
10. Se logra fabricar e instalar el circuito rectificador semicontrolado para el accionamiento y control de la velocidad del motor de CD destinado a accionar el mecanismo de desgaste por fricción a materiales sólidos de la máquina CMT2070-1 devolviendo la funcionalidad de la misma.

## RECOMENDACIONES

---

- Continuar con los estudios de la máquina CMT 2070-1 para los diseños de la instrumentación.
- Realizar los mantenimientos tanto a la parte eléctrica como a la mecánica de la máquina para garantizar un buen funcionamiento del equipo así como preservar la vida útil del mismo.

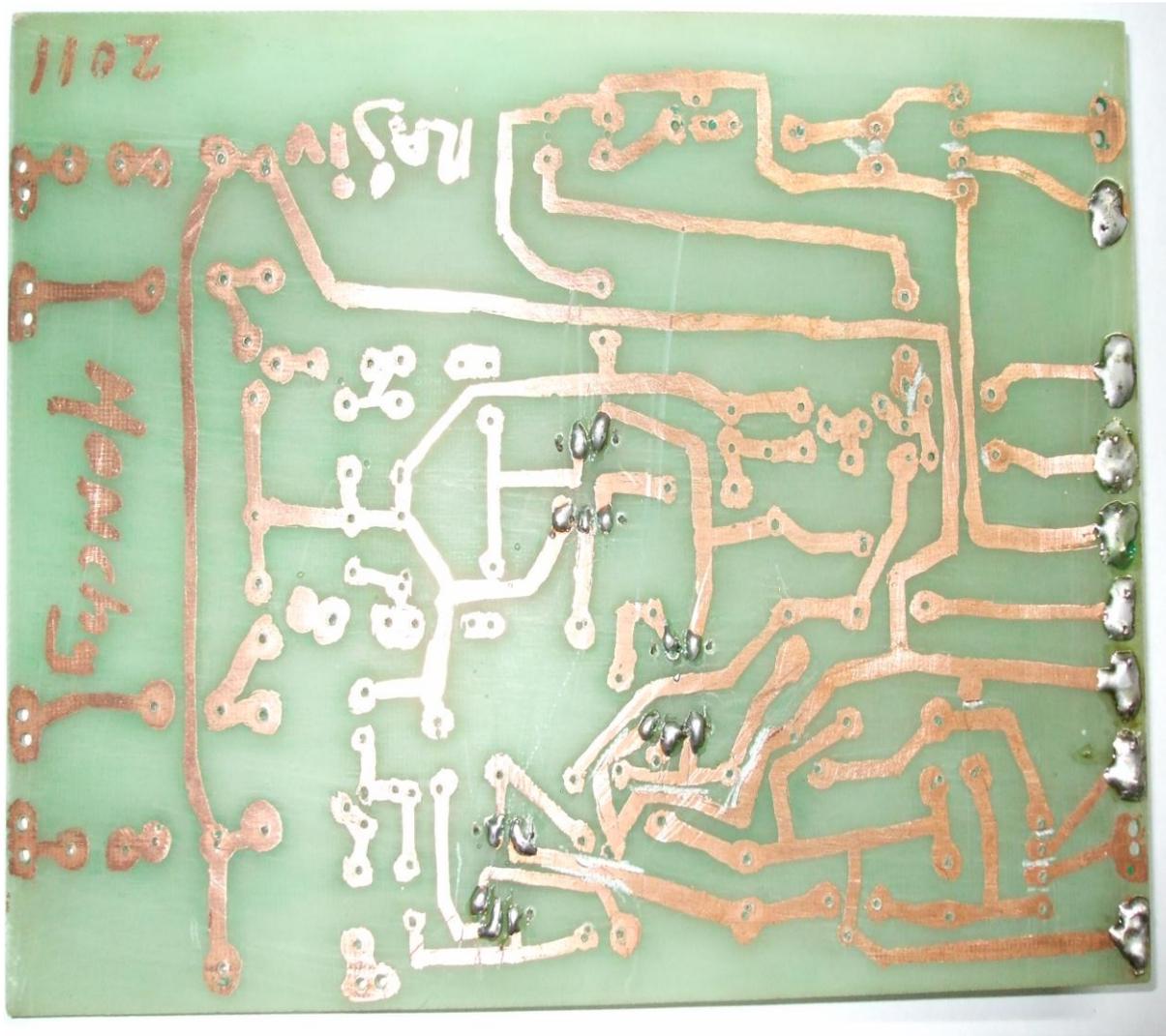


## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

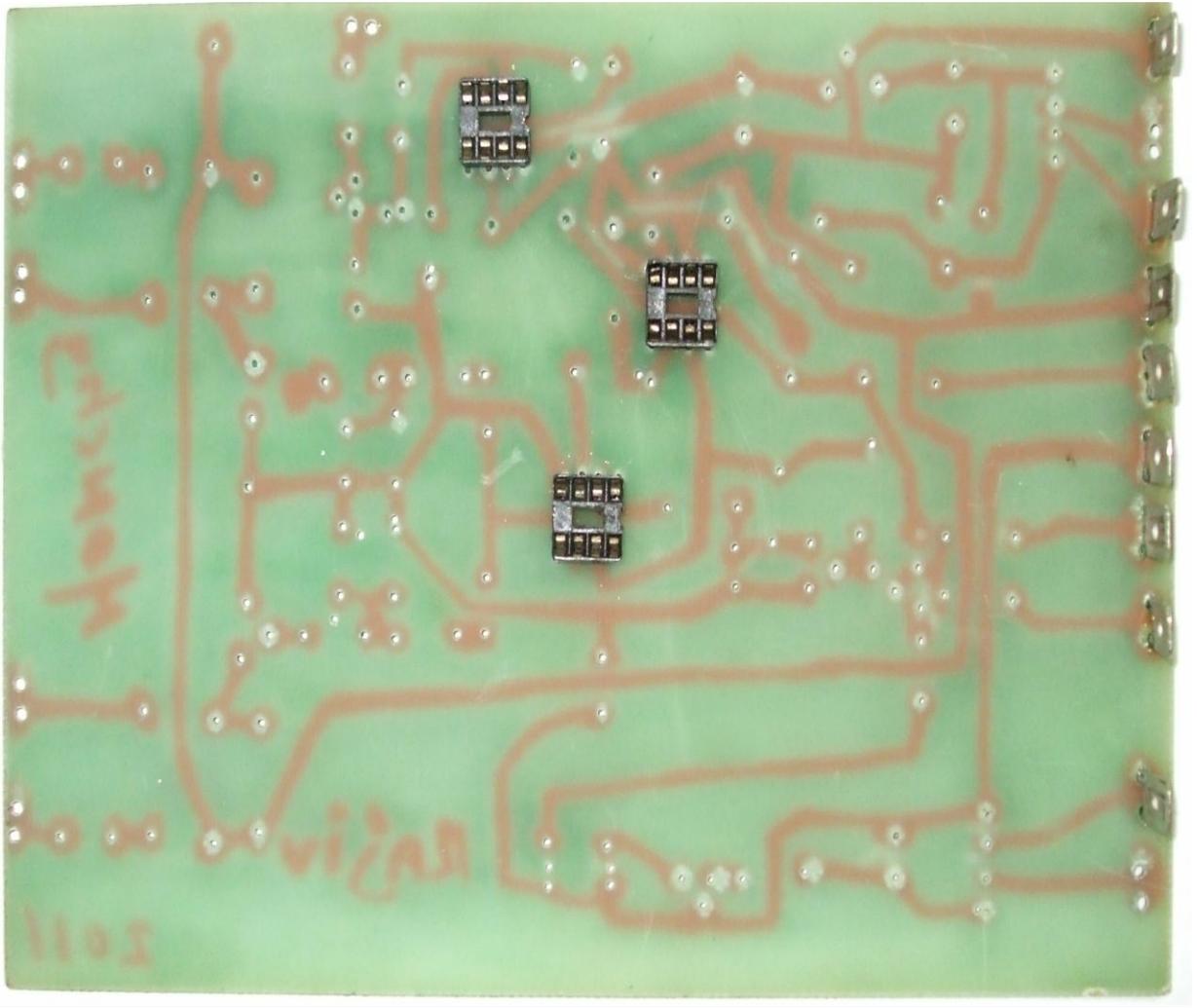
1. Aguilar Joel, Desarrollo de un prototipo tribológico húmedo funcional para pruebas de abrasión en un tribosistema acuoso, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Septiembre de 2002.
2. AGUILAR PEÑA, J. D.; MARTINEZ HERNÁNDEZ, F.; RUS CASAS, C. Electrónica de Potencia, Convertidores AC-DC. Colección de apuntes 1995/96.12. Universidad de Jaén.
3. BIRD, B. M.; KING, K. G.; PEDDER, D. A. G. An Introduction To Power Electronics. Second Edition. Ed. Wiley, 1993.
4. Carrillo C.J.N., Consideraciones tribológicas en el diseño de un puente de carga para una máquina reciprocante de esfera sobre placa empleada en el estudio del desgaste, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Marzo de 2001.
5. Deuis, R.L. C. Subramian, Three-body abrasive wear of composite coatings in dry and wet environments, Wear 214, 1998, pg. 112-130.
6. Daniel W. Hart . Electrónica de potencia- 2005 - 451 páginas.
7. FISHER, M. Power electronics. PWS-KENT, 1991.
8. Gallardo H.E.A., Desarrollo de un prototipo tribológico funcional de configuración esfera sobre disco para medir el desgaste por deslizamiento en condiciones secas y lubricadas, Tesis Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Febrero de 2003.
9. Gualda J.A, S. Martínez, P.M. Martínez “Electrónica industrial: Técnicas de Potencia.
10. Herrera G.M.A., Desarrollo de un prototipo tribológico funcional para evaluar el desgaste por fatiga por contacto de rodadura, Tesis Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Agosto de 2003.
11. HART, Daniel W. Electrónica de Potencia. Ed. Prentice Hall. Madrid 2004. ISBN 84-205-3179-0
12. Hart D. W., “Electrónica de PotenciaValparaíso University, Valparaíso Indiana. Prentice Hall.2003
13. HERRANZ ACERO, G. Electrónica industrial II. Sistemas de Potencia. 2ª Edición. Servicio de publicaciones Escuela Técnica Superior de Telecomunicación, 1990.
14. Klein P.T. “Elements of Power Electronics” Oxford University Press. 1998
15. LANDER, C.W. Power Electronics. 2ª Edition. Mcgraw-hill Book Company, 1987.



16. Luna C.J.R., Desarrollo de un prototipo erosionador funcional que emplea aire a presión y partículas de carburo de silicio (SiC), Tesis Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Septiembre de 2003.
17. Márquez M.A.L. Diseño de una máquina tribológica para pruebas de desgaste abrasivo severo, Tesis de Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Febrero de 2002.
18. Mohan N, Underland T.M. y Robbins W.P. "Power Electronics, converters, applications and design". 3ª Ed. Wiley 2003.
19. MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS W. P. Power electronics: Converters, Applications and Design. Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1989.
20. Peña B. A, Caracterización mecánica y tribológica del al 6061-t651 y del al 6061-t651 con recubrimiento de fosfato de cromo, Tesis Maestría, SEPI ESIME IPN, México, Abril de 2002.
21. RASHID, M. H. Spice for power electronics and electric power. Prentice Hall International, 1993.
22. Robbins, John Wiley & Sons "Power Electronics: Converters, Applications and Design", Mohan, Undeland, , 2ª Ed, Nueva York, 1995.
23. RASHID, M. H. Electrónica de Potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones. Ed. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México 1995
24. SÉGUIER, G. Electrónica de potencia: los convertidores estáticos de energía. Conversión Alterna Continua. Ed. Gustavo Gili. Barcelona, 1986. ISBN 84-252-1277-4

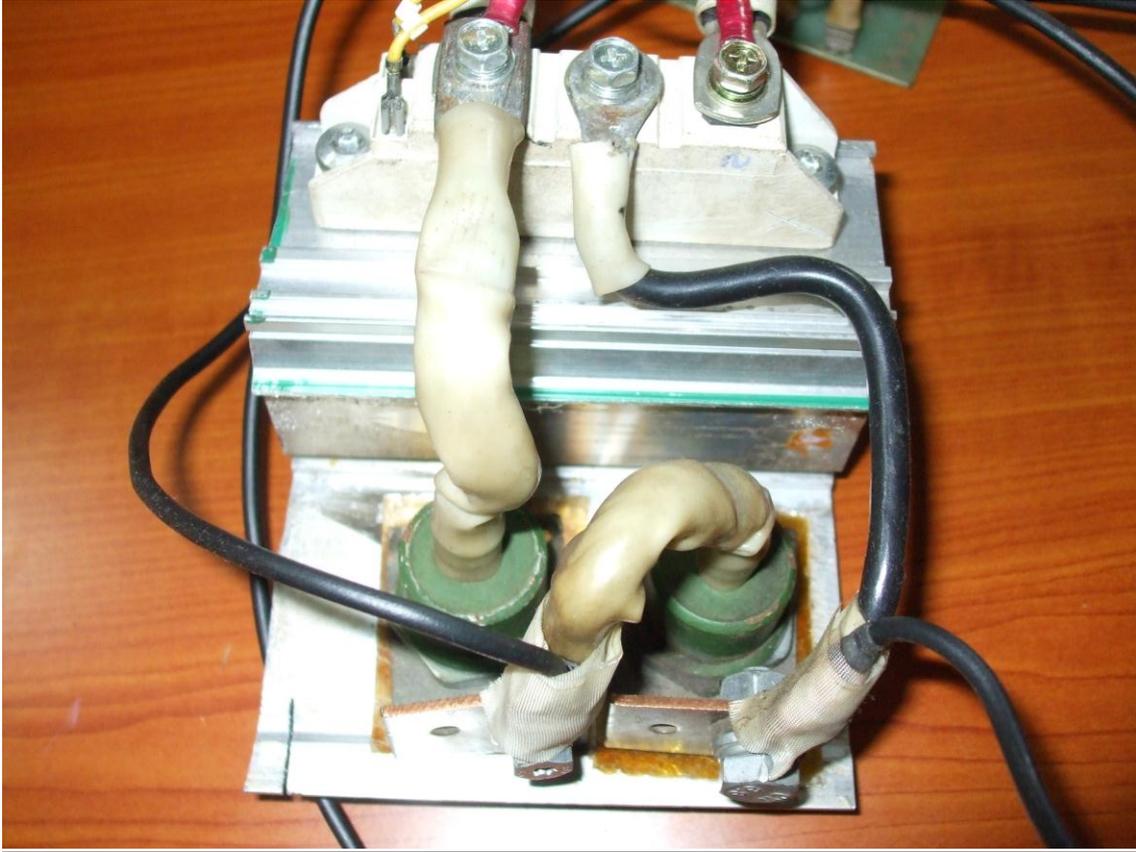


Placa madre con venas confeccionadas para el montaje de los componentes(Anexo, figura 1)

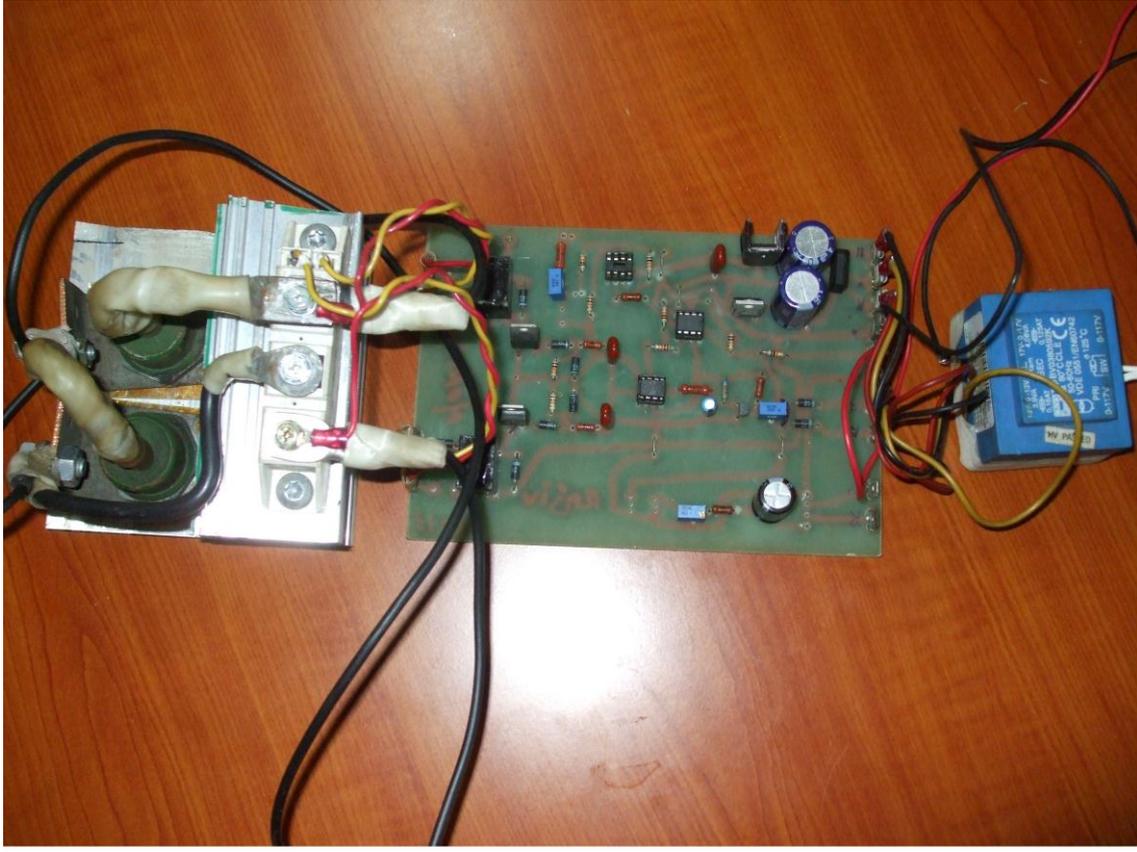


Placa madre y montaje de los componentes (Anexo, figura 2)





Bloque de válvulas de fuerza (Anexo, figura 4)



Bloque rectificador (Anexo, figura 5)