

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño y Construcción del Troceador de Jones Controlado
por Señal Modulada de Ancho de Pulso P.W.M”

TOPICO DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACION

ELECTRONICA INDUSTRIAL

Presentado por:

Edison López Sangolquí

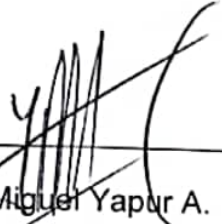
Wilian Guerrero Córdova

Lenín Ramírez Huaypatín


GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2004


TRIBUNAL DE GRADUACION




Ing. Miguel Yapur A.
PRESIDENTE



Ing. Alberto Manzur H.
DIRECTOR DE TOPICO



Ing. Alberto Larco G.
MIEMBRO PRINCIPAL

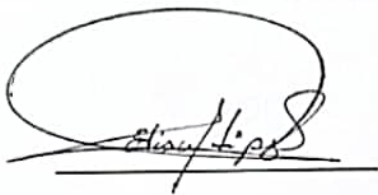


Ing. Hólger Cevallos U.
MIEMBRO PRINCIPAL

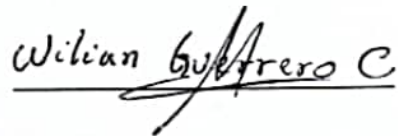
DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Tópico de Grado, nos corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

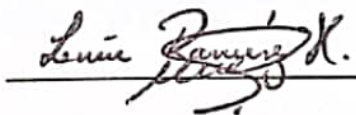
(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



EDISON LOPEZ S



WILIAN GUERRERO C



LENIN RAMIREZ H

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo a nuestras familias, a quienes nos debemos y honramos, y quienes nos motivan a seguir adelante.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios, Fuente de nuestra existencia, Quien nos ha bendecido en todo lo necesario para poder culminar una etapa muy importante de nuestras vidas.

También agradecemos profundamente a nuestros padres por el apoyo incansable y constante que nos han sabido brindar.

Un agradecimiento sincero a nuestro director de tópico Ing. Alberto Manzur H por su invaluable ayuda para poder concluir nuestro trabajo.

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	VI
OBJETIVOS.....	VII
INDICE GENERAL.....	VIII
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1.	
1. CONCEPTOS GENERALES DE ELECTRONICA DE POTENCIA.....	2
1.1. Introducción a la Electrónica de Potencia.	2
1.2. Clasificación de los Sistemas Electrónicos de Potencia.	7
1.3. Campos de Aplicación de la Electrónica de Potencia.	10
1.4. Conceptos y Aplicaciones del Tiristor de Potencia.	13
CAPITULO 2.	
2. TROCEADORES	21

2.1. ¿Qué es un Troceador?	21
2.2. Características y Aplicaciones del Troceador.	28
2.3. Tipos de Troceadores.	29
2.4. El Troceador de Jones.	34

CAPITULO 3.

3. CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DC.....	35
3.1. Características Básicas y Tipos de Motores de Corriente Continua. ...	35
3.2. Control de velocidad del Motor de C.C. de Excitación Separada.....	45
3.3. Modulación PWM.....	52

CAPITULO 4.

4. ANÁLISIS Y DISEÑO TROCEADOR DE JONES	56
4.1. Diseño y Descripción del Troceador de Jones.....	56
4.2. Circuito Generador de Rampa.	68
4.3. Circuito de modulación PWM.....	74
4.4. Circuito de Disparo.	78
4.5. Circuito de Fuerza.....	82

CAPITULO 5.

5. CONSTRUCCION DEL EQUIPO DIDACTICO	93
5.1. Materiales utilizados.	93
5.2. Lista de elementos.....	94
5.3. Estimación del Costo del Proyecto.	95

CAPITULO 6.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	98
----------------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍA

NOMENCLATURA

RESUMEN

El desarrollo del proyecto a exponerse, comprende el análisis, diseño, construcción y aplicación de un Convertidor DC-DC con Modulación de Pulsos PWM, mas conocido como Troceador o Chopper, utilizado en el control de velocidad de los motores de corriente continua.

Este diseño y construcción consiste en un equipo de experimentación, basado en el Troceador de Jones que permita estudiar las características de operación y funcionamiento del mismo mediante la medición de formas de onda con el Osciloscopio.

OBJETIVO

Diseñar y Construir un “**Convertidor DC-DC o Troceador de JONES**” de 150W de potencia nominal que pueda controlar la velocidad de un motor DC de 24 Voltios, 6 Amperios, gobernado por tiristores mediante la conmutación por voltaje, controlado por una señal modulada de pulsos PWM de frecuencia constante de 250 Hz.

INTRODUCCIÓN

En la industria se utilizan motores de corriente continua con control de velocidad. Esto se lo realiza ajustando la resistencia de campo o ajustando el voltaje aplicado a la armadura. Actualmente se tiene a la disposición equipos controladores de velocidad de estado sólido, llamados Convertidores DC-DC conocido como Troceadores, que realizan la tarea de variar el voltaje en la armadura.

En este trabajo se pretende lograr un mejor entendimiento acerca de los Convertidores DC-DC mediante el estudio y desarrollo del diseño, construcción y operación del Troceador "Chopper" de Jones y su utilización en el manejo de la velocidad de un motor de corriente continua.

Resulta importante el diseño de sistemas automáticos de control en la Ingeniería, donde el propósito del diseño es construir un sistema con componentes de bajo costo, que proporcione el funcionamiento y operación deseada.

CAPITULO 1

1. CONCEPTOS GENERALES DE ELECTRONICA DE POTENCIA.

1.1. Introducción a la Electrónica de Potencia.

Cada vez son más los dispositivos y sistemas que en una o varias de sus etapas son accionados por energía eléctrica. Los accionamientos consisten, en procesos que transforman la energía eléctrica en otro tipo de energía. Los encargados de realizar dichos procesos son los **Sistemas Electrónicos de Potencia**.

Las aplicaciones de la electrónica estuvieron limitadas durante mucho tiempo a las técnicas de alta frecuencia en los medios de comunicaciones (emisores, receptores, etc.). En la evolución de la electrónica industrial, las posibilidades estaban limitadas por la falta de fiabilidad de los elementos electrónicos entonces disponibles (tubos amplificadores, resistencias, condensadores). Esta fiabilidad

era insuficiente para responder a las altas exigencias que se requerían en las nuevas aplicaciones del campo industrial.

Gracias al descubrimiento de los dispositivos semiconductores (transistores, tiristores, etc.) en la década de los 60, que respondían a las exigencias industriales (alta fiabilidad, dimensiones reducidas, insensibilidad a las vibraciones mecánicas, etc.), la electrónica industrial hizo progresos increíbles, permitiendo la realización de procesos cada vez más complejos, destinados a la automatización industrial.

Un equipo electrónico de potencia consta fundamentalmente de dos partes, tal como se simboliza en la figura 1.1.

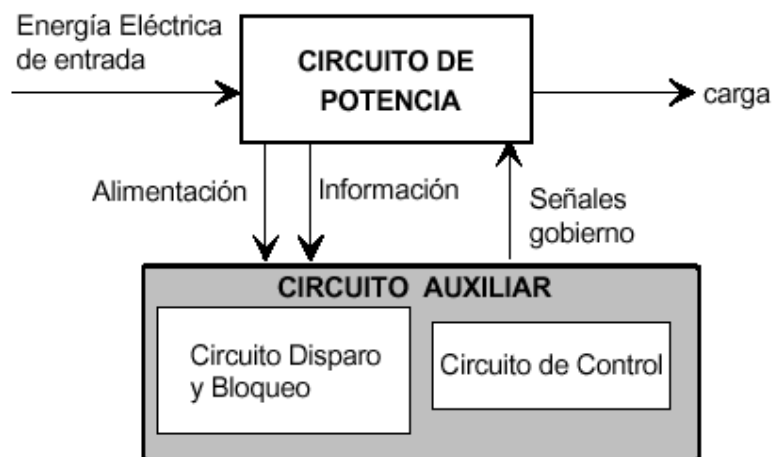


Fig.1.1 Diagrama de bloques de un sistema de potencia

- 1.- Un circuito de Potencia, compuesto de semiconductores de potencia y elementos pasivos, que liga la fuente primaria de alimentación con la carga.

- 2.- Un circuito de mando, que elabora la información proporcionada por el circuito de potencia y genera unas señales de control que determinan la conducción de los semiconductores controlados con una fase y secuencia conveniente.

En la *Electrónica de Potencia*, el concepto principal es el **rendimiento** de los dispositivos que funcionan en estado de **conmutación**, siendo el componente de base el semiconductor quien opera como interruptor. Este elemento trabajando en conmutación deberá cumplir las siguientes características:

- Tener dos estados claramente definidos, uno de alta impedancia (corte) y otro de baja impedancia (conducción).

- Poder controlar el paso de un estado a otro con facilidad y con una señal de control.

- Rapidez de funcionamiento para pasar de un estado a otro.

- Ser capaz de soportar altas tensiones de voltajes cuando está en corte y grandes intensidades de corrientes cuando está en conducción.

Así podemos definir la Electrónica de Potencia de la siguiente manera:

Electrónica de Potencia es la parte de la Electrónica encargada del Estudio de dispositivos, circuitos, sistemas y procedimientos para el Procesamiento, control y conversión de la energía eléctrica.

El campo de la Electrónica de Potencia puede dividirse en grandes disciplinas o bloques temáticos:

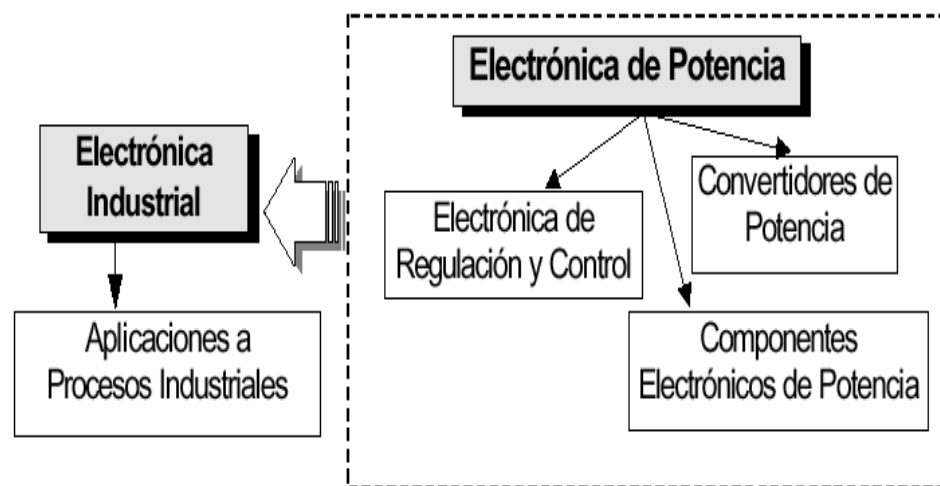


Fig.1.2 Bloques temáticos que comprende la Electrónica de Potencia.

1.2. Clasificación de los Sistemas Electrónicos de Potencia.

Los sistemas electrónicos de potencia consisten en uno o más Sistemas de conversión de potencia, que gobiernan la transferencia de energía. En general, un convertidor controla la magnitud eléctrica de entrada V_i , frecuencia f_i , en una magnitud eléctrica de salida V_0 , frecuencia f_0 .

De manera general se clasifica a la Electrónica de Potencia en función de los cuatro tipos de conversión posibles:

- a) Conversión alterna-contínua.
- b) Conversión alterna-alterna.
- c) Conversión contínua-alterna.
- d) Conversión contínua-contínua.

En la siguiente figura 1.3 se muestra gráficamente la clasificación de los Sistemas Electrónicos de Potencia en función del tipo de energía eléctrica que los alimenta.

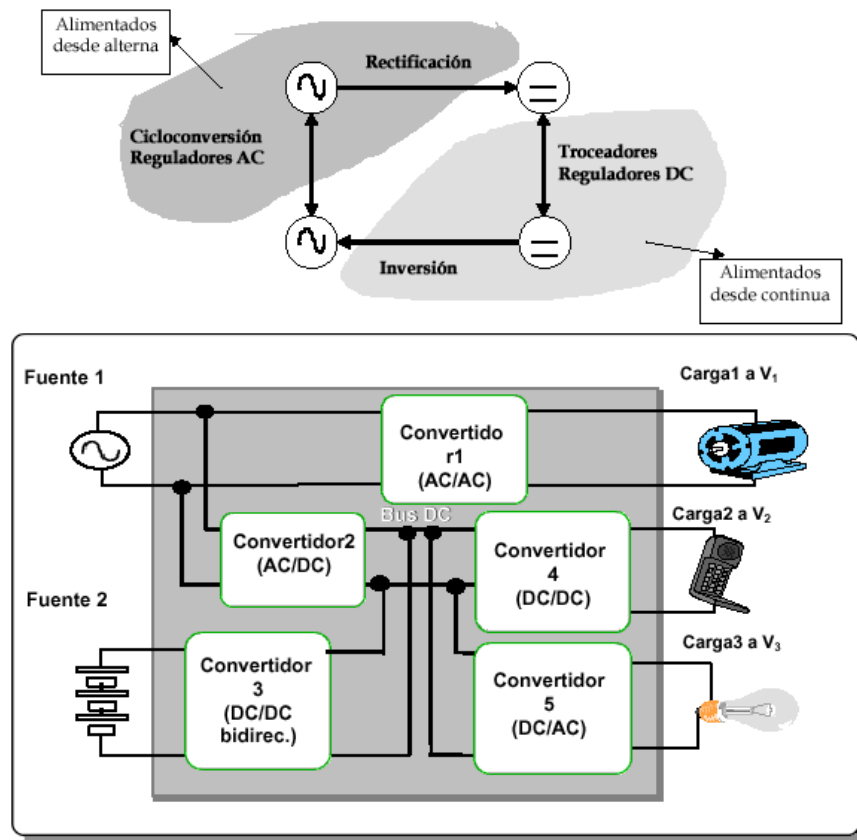


Fig.1.3 Clasificación y ejemplo de los Sistemas de conversión de energía eléctrica.

1.2.1. Clasificación por el tipo de semiconductor, modo de conmutación y tipo de aplicación.

Existen muchos tipos de clasificaciones, las cuales incluyen como características determinantes:

- Tipo de semiconductor utilizado: diodos, transistores, tiristores, IGBT y mosfets de potencia

- Modos de conmutación: natural y forzada
- Tipo de aplicación: Rectificadores, reguladores, variadores de frecuencia, inversores y troceadores

1.2.2. Clasificación por el tipo de conmutación

Atendiendo al tipo de conmutación se obtiene la siguiente clasificación de convertidores de potencia:

- **Conmutación natural:** Cuando la fuente de alimentación, presente en uno de los lados del convertidor, facilita el paso a corte de los semiconductores. Además los semiconductores pasan a conducción en fase con la frecuencia de la tensión de voltaje en la entrada. (Rectificadores, Reguladores de corriente alterna.
- **Conmutación forzada:** Cuando los semiconductores controlables son llevados a corte y a conducción a frecuencias mayores que la frecuencia de la red. (Troceadores, Inversores, etc.).

1.2.3. Función y Característica Básica de los Convertidores

De las clasificaciones anteriores se pueden extraer las características básicas de cada uno de los convertidores mencionados:

- a) **Rectificador no controlado:** Transforma la corriente alterna de voltaje constante en corriente continua de voltaje constante. (Diodos).
- b) **Rectificador controlado:** Transforma la corriente alterna de voltaje constante en corriente continua de voltaje variable. Formado por tiristores.
- c) **Reguladores de AC:** Transforman la corriente alterna de voltaje constante en corriente alterna de voltaje variable y de la misma frecuencia
- d) **Variadores de Frecuencia:** Reguladores de alterna o convertidores directos alterna/alterna de distinta frecuencia.

- e) **Inversor:** Transforman una corriente continua en corriente alterna de frecuencia fija o variable.

- f) **Troceador o "chopper":** Transforma corriente continua de voltaje constante en corriente continua de voltaje variable.

1.3. Campos de Aplicación de la Electrónica de Potencia.

Los Sistemas de Potencia se utilizan para accionar cualquier dispositivo que necesite una entrada de energía eléctrica distinta a la que suministra la fuente de alimentación. Citamos algunas de las aplicaciones industriales de cada uno de los convertidores:

1.3.1. Rectificadores:

- Alimentación de todo tipo de sistemas electrónicos, donde se necesite energía eléctrica en forma de corriente continua.

- Control de motores de continua utilizados en procesos industriales: Máquinas herramienta, transportadoras y papeleras.

- Transporte de energía eléctrica en C.C. y alta tensión.
- Cargadores de baterías.

1.3.2. Reguladores de alterna:

- Calentamiento por inducción.
- Control de iluminación.
- Control de velocidad de motores de inducción.

1.3.3. Variadores de Frecuencia:

- Enlace entre dos sistemas energéticos de corriente alterna no sincronizados.
- Control de velocidad de motores de corriente alterna

1.3.4. Inversores:

- Accionadores de motores de corriente alterna en todo tipo de aplicaciones industriales.

- Convertidores corriente continua en alterna para fuentes no convencionales, tales como la eólica.
- Calentamiento por inducción.

1.3.5. Troceadores:

- Alimentación y control de motores de continua.
- Alimentación de equipos electrónicos a partir de baterías o fuentes autónomas de corriente continua.

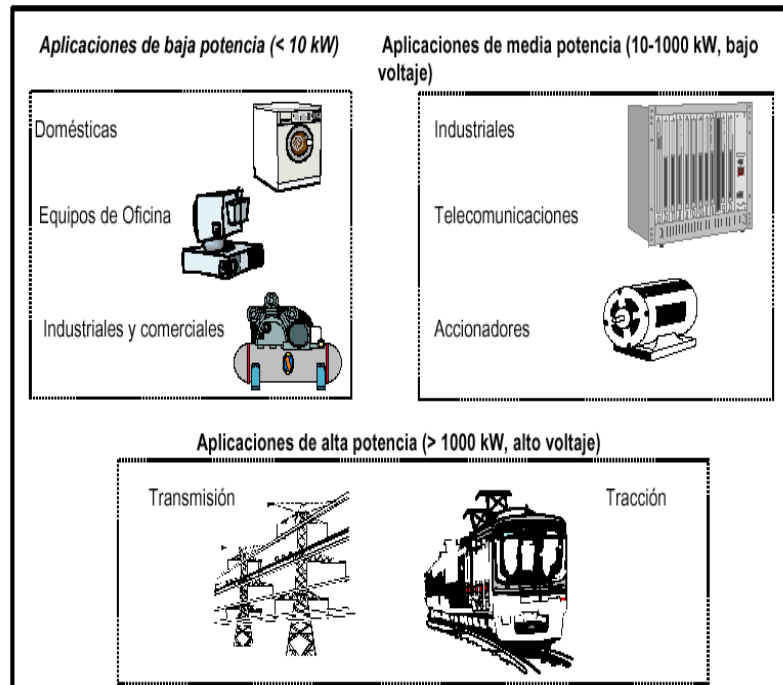


Fig.1.4 Aplicación de los dispositivos de Potencia.

1.4. Conceptos y Aplicaciones del Tiristor de Potencia

El tiristor es uno de los más importantes dispositivos semiconductores de potencia. Los tiristores se utilizan en forma extensa en los circuitos electrónicos de potencia.

Se operan como conmutadores biestables, pasando de un estado de corte a un estado de conducción. Para muchas aplicaciones se puede suponer que los tiristores son interruptores o conmutadores ideales.

En efecto, el tiristor permanece normalmente en corte hasta el momento en que entra en conducción, actuando sobre su puerta de disparo.

Por ejemplo, la onda alterna rectificadas de la figura 1.5 (a); gracias al tiristor se puede dejar pasar algunas semiondas, bloqueando las otras: se obtendría entonces las ondas de la figura 1.5 (b), en la que se han suprimido las semiondas 2, 4, 6 y 7.

Se puede mantener en conducción el tiristor hasta después del principio de cada semionda, como se indica en la figura 1.5 (c); de esta forma solo se dispone de una parte de la potencia total, como

puede verse mejor en el caso de una semionda, en la figura 1.5 (d), en esta modalidad de funcionamiento, se actúa sobre los ángulos de conducción de corriente y de corte.

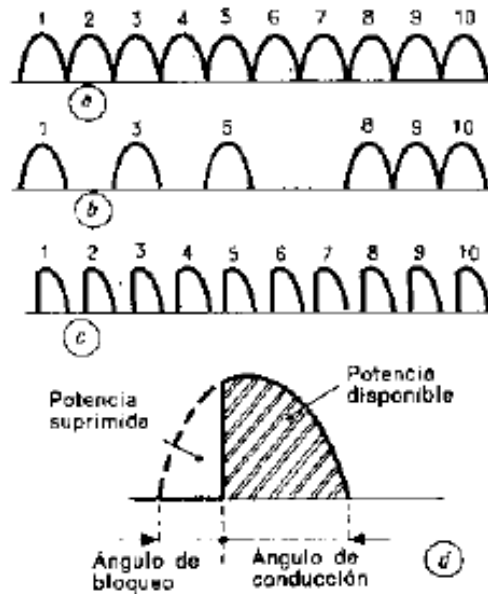


Fig. 1.5 El tiristor actúa en dos modalidades distintas. Siendo en (a), la onda de entrada, el tiristor suprime en (b), algunos semiperiodos en ella mientras que en (c), subsisten todos los semiperiodos aunque no completos, como puede apreciarse mejor en (d).

1.4.1. Aplicaciones del Tiristor de Potencia.

El tiristor presenta una serie de ventajas, debidas precisamente al hecho de que constituye un elemento de

estado sólido, sin necesidad de precalentamiento, tamaño reducido, fuerte resistencia, posibilidad de trabajo en todas las posiciones, vida media larga, velocidad elevada de conmutación, etc.,

El tiristor trabaja de varios modos clasificándolo de la siguiente manera:

- **Rectificación:** Consiste en usar la propiedad del tiristor en estado de conducción unidireccional, el cual realiza la función de un diodo.
- **Interrupción de corriente:** Utilizado como interruptor, el tiristor puede reemplazar a los contactores mecánicos.

1.4.2. Características de los Tiristores.

El Tiristor SCR (*rectificador controlado de silicio*), dispone de dos terminales principales, A (*ánodo*) y C (*cátodo*), y uno auxiliar de disparo G (*gate*) o *puerta* de control. En la figura 1.6 a) y b) se muestra el símbolo y la característica de corriente y voltaje $I-V$ estática de dicho componente. La corriente principal circula del ánodo al cátodo. En su estado de corte (*Off*), puede bloquear una tensión directa y no

conducir corriente. Así, si no hay señal aplicada a la puerta, permanecerá en bloqueo o corte independientemente del signo de la tensión V_{ak} . El tiristor debe ser disparado al estado de conducción (O_n) aplicando un pulso de corriente positiva en miliamperios en el terminal de puerta (Gate), durante un pequeño instante, posibilitando que pase al estado de Corte. La caída de tensión directa en el estado de conducción (O_n) es de pocos voltios (1-3V).

Una vez empieza a conducir, aunque la corriente de puerta desaparezca, no pudiendo ser cortado por pulso de puerta. Solo cuando la corriente del ánodo tiende a ser negativa, o inferior a un valor umbral, por la influencia del circuito de potencia, se cortará el tiristor.

En el **estado estático** figura 1.6 c), dependiendo de la tensión aplicada entre ánodo y cátodo podemos distinguir tres regiones de funcionamiento:

1. **$V_{ak} < 0$** → **zona de Corte inverso**. Dicha condición corresponde al estado de no conducción o Corte, comportándose como un diodo.

2. $V_{AK} > 0$ sin disparo \longrightarrow zona de Corte directo. El tiristor se comporta como un circuito abierto hasta alcanzar la tensión de ruptura directa.
3. $V_{AK} > 0$ con disparo \longrightarrow zona de conducción. Se comportará como un cortocircuito, una vez ocurrido el disparo, por el SCR circula una corriente superior a la corriente de enclavamiento.

Una vez en conducción, se mantendrá si el valor de la corriente ánodo cátodo es superior a la corriente de mantenimiento.

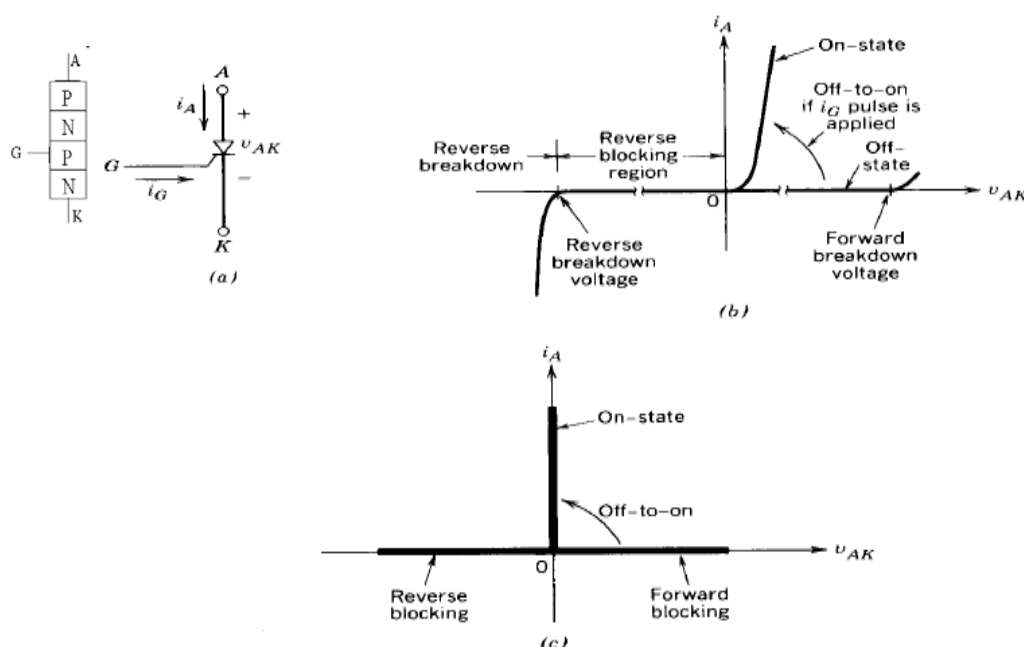


Figura 1.6 Símbolo y característica principal de los tiristores.

En el **estado activo**, la corriente del ánodo está limitada por una impedancia o resistencia externa R_L , tal y como se muestra en la figura 1.7 (a), la corriente del ánodo debe ser mayor que un valor conocido como *corriente de enganche* I_L , a fin de mantener la cantidad requerida de flujo de portadores a través de la unión; de lo contrario, al reducirse el voltaje del ánodo al cátodo, el dispositivo regresará a la condición de bloqueo. La *corriente de enganche* I_L , es la corriente del ánodo mínima requerida para mantener el tiristor en estado de conducción inmediatamente después de que ha sido activado y se ha retirado la señal de la compuerta. En la figura 1.7 (b), aparece una característica voltaje – corriente (V-I) común de un tiristor

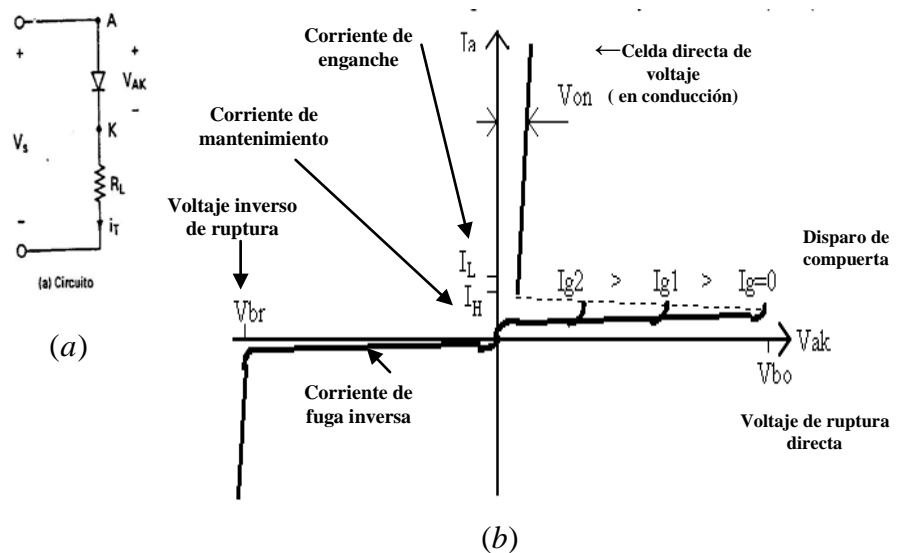


Figura 1.7 Característica Corriente vs Voltaje (I – V) de un tiristor en función de la corriente de puerta.

Si un tiristor está polarizado directamente, el suministro de una corriente de puerta al aplicar un voltaje positivo entre G y K cátodo activará al tiristor. Conforme aumenta la I_{gate} , se reduce el voltaje de corte directo, tal como se muestra en la figura 1.7.

Sin embargo, si se reduce la corriente directa del ánodo por debajo de un nivel conocido como *corriente de mantenimiento* I_H , se genera una región de agotamiento, el tiristor estará entonces en estado de Corte o bloqueo. La *corriente de mantenimiento* esta en el orden de los miliamperios y es menor que la corriente de enganche I_L . Esto significa que $I_L > I_H$. La *corriente de mantenimiento* I_H es la corriente del ánodo mínima para mantener al tiristor en estado de conducción.

Un tiristor se puede activar aumentando el voltaje directo de V_{ak} más allá de V_{B0} , pero esta forma de activarlo puede ser destructiva. En la práctica, el voltaje directo se mantiene por debajo de V_{B0} y el tiristor se activa mediante la aplicación de un voltaje positivo entre las compuertas y el cátodo. Esto se muestra en la figura 1.7 con líneas punteadas. Una vez

activado el tiristor mediante una señal de compuerta y una vez que la corriente del ánodo es mayor que la corriente de mantenimiento, el dispositivo continua conduciendo, debido a una retroalimentación positiva, aun si se elimina la señal de compuerta. Un tiristor es un dispositivo de enganche.

2. Ref: www.redeya.com/electronica/tutoriales/pdf/gobtiris.pdf

3. Ref: <http://grupos.unican.es/dyvci/ruizrg/postscript/LibroEcaBasica/Tema12.pdf>

CAPITULO 2

2. TROCEADORES

2.1. ¿Qué es un Troceador?

Un Troceador es un interruptor situado entre una fuente de C.C. y la carga, que se abre y cierra periódicamente. La tensión media en la carga se controla variando la relación entre el tiempo de cierre y el del ciclo completo (ciclo de trabajo). Si la tensión continua de entrada se interrumpe durante un 10% del ciclo, la tensión media en la carga será del 90% de la entrada continua. Inversamente se obtiene, un 10% de la tensión continua de entrada, interrumpiendo esta tensión durante el 90% del ciclo. La característica resultante del control de potencia depende del tipo de carga (resistiva, inductiva o motor).

Los troceadores electrónicos presentan varias características por las que resultan ideales para la conversión de C.C. en C.C. Las

pérdidas son pequeñas incluso a frecuencia de conmutaciones elevadas y se obtienen rendimientos de más del 90% en todo el margen de control. (Se puede comparar este resultado con el bajo rendimiento de control por resistencias en la tracción de tranvías y trenes y otros vehículos alimentados por baterías). Hay que tener en cuenta que una corriente de salida bien filtrada es uno de los principales objetivos al diseñar troceadores para control de motores, ya que esto evita un excesivo calentamiento del motor. Como los troceadores electrónicos pueden trabajar a frecuencias elevadas, los componentes de ondulación en la carga se suprimen fácilmente empleando un sencillo filtro normalmente una inductancia en serie con la carga, combinada con un diodo volante en la salida del troceador.

Los troceadores electrónicos tienen una vida útil larga, puesto que el desgaste de sus elementos de control es pequeño o nulo. Los elementos de control más utilizados son de tiristores. Estos pueden trabajar indefinidamente (con tal que no sobrepasen sus valores límite) y son de pequeño tamaño.

2.2. Características y Aplicaciones del Troceador.

2.2.1. Características del Troceador.

La figura 2.1 a) representa el circuito básico de un troceador. Cuando el tiristor T_1 conduce, la tensión instantánea de salida V_o es igual a la tensión de alimentación V_{cc} , en cambio, es igual a cero durante los periodos intermedios los que el tiristor está bloqueado. Así, la forma dada de V_o es la que representa la figura 2.1 b).

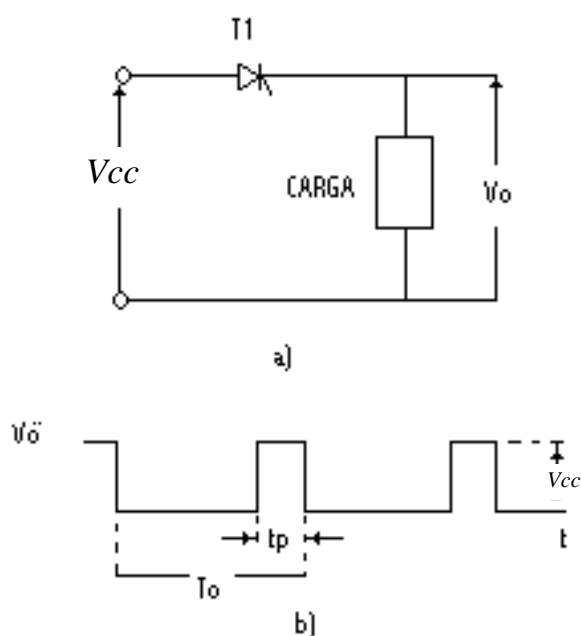


Fig. 2.1 Circuito básico de un Troceador y Forma de Onda de Salida $t_p =$ periodo de conducción de T_1 ; $t_0 =$ periodo de repetición.

Si t_p es el periodo de conducción del tiristor (tiempo de duración de impulso, t_0 el periodo de repetición y el ciclo de tiempo t_p / t_0 se indica por δ , la tensión media del troceador.

$$V_{0med} = \delta V_{cc} \quad (2.1)$$

Esta expresión es válida para cargas pasivas y también para motores cuya corriente sea continua. Si la corriente es discontinua la *f.e.m.* del motor aparece en los terminales de salida del troceador siempre que, durante cada periodo, deje de pasar corriente. Esto hace que la tensión media de salida del troceador sea mayor que la indicada por la ecuación (2.1).

La característica de control de potencia viene determinada por el tipo de carga de acuerdo con la forma de onda de la figura, la tensión eficaz de salida es:

$$V_{0\ ef} = V_{cc} \sqrt{\delta} \quad (2.2)$$

Con una carga resistiva, la potencia de salida P_0 es igual a V_0^2 / R , siendo R_L la resistencia de carga:

$$P_0 = \delta P_{0 \text{ max}} \quad (2.3)$$

Donde:

$$P_{0 \text{ max}} = V_{CC}^2 / R_L \quad (2.4)$$

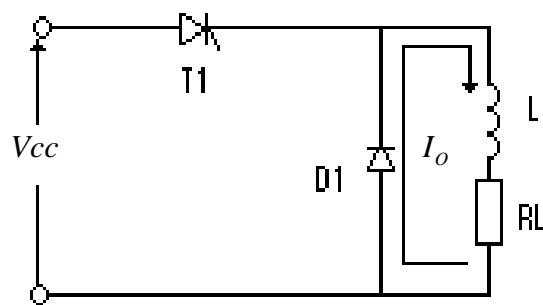


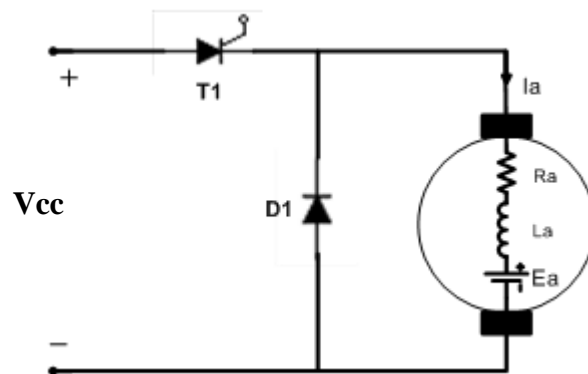
Fig. 2.2 Troceador con Carga Inductiva. D_1 = diodo volante. La flecha indica el Flujo de corriente cuando el T_1 no conduce.

Con una carga inductiva conectada como se indica en la figura 2.2, la corriente de carga I_0 continua circulando a través de del diodo de paso libre D_1 durante los periodos de bloqueo de T_1 . La corriente es casi c.c. pura si la constante

de tiempo L/R_L es mucho mayor que el periodo de repetición, t_0 . Como $P_0 = I_0^2 R_L$ y la corriente es $I_0 = V_{0 \text{ med}} / R_L$ la potencia de salida resulta:

$$P_0 = \delta^2 P_{0 \text{ MAX}} \quad (2.5)$$

En donde $P_{0 \text{ max}}$ se obtiene a partir de la ecuación (2.4).



**Fig. 2.3 Troceador con un motor como carga $E_a = f.e.m$
del inducido**

La figura 2.3 representa un circuito troceador cuya carga es un motor. Despreciando la resistencia del inducido, la *f.e.m.* del motor E_a es igual a $V_{0 \text{ med}}$, de modo que la

potencia P_0 absorbida por el motor es $V_{0 \text{ med}} I_0$. (en la hipótesis supuesta, I_0 es una corriente pura). La característica de salida depende del tipo de control, pero si el par del motor se mantiene constante, I_0 no variará.

Entonces la potencia de salida es:

$$P_0 = \delta P_{0 \text{ max}} \quad (2.6)$$

En donde:

$$P_{0 \text{ max}} = V_{CC} I_0 \quad (2.7)$$

Como el ciclo de trabajo del troceador es t_p/t_o , se deduce de la ecuación (2.1) que la salida del troceador puede controlarse variando t_p o t_o (o ambos). La variación de t_p , manteniendo t_o constante, lleva al control de anchura de impulsos (Fig. 2.4 a). Inversamente, la variación de t_o , con t_p constante, se denomina control de frecuencia de repetición de los impulsos (frecuencia de repetición = $1/t_o$): véase figura 2.4 b.

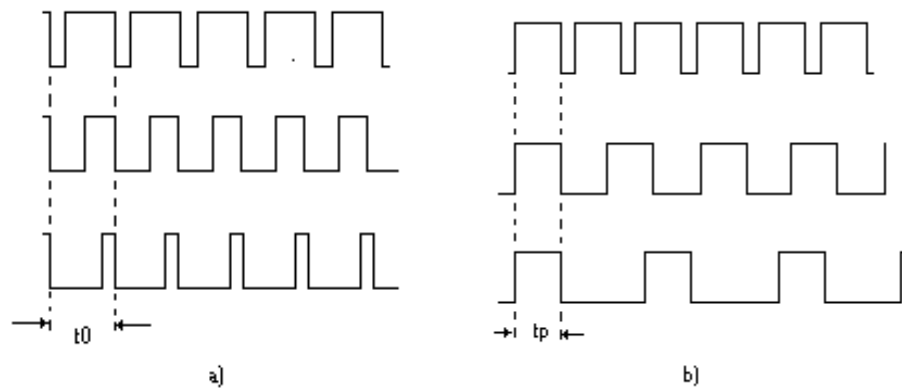


Fig. 2.4 Formas de onda de salida de un Troceador. a) control por Anchura de Pulso: $t_0 = \text{constante}$; b) control por frecuencia de repetición de pulsos; $t_p = \text{constante}$.

4. Ref: Revista Mini Watt page 3, 4, 5.

2.2.2. Aplicaciones del Troceador.

Los troceadores son utilizados generalmente en casos en los que se necesite un voltaje DC variable, siendo el de mayor aplicación el control de velocidad de los motores de corriente continua.

Los tiristores tienen un amplio campo de aplicaciones debido a las ventajas que ofrecen. Normalmente se alimenta

a partir de una tensión constante y pueden utilizarse por ejemplo en:

- a) Alimentación de potencia variable en C.C., con o sin estabilización de salida.
- b) Cargadores de batería, y
- c) Sistemas de control para motores de C.C.

2.3. Tipos de Troceadores.

A continuación se explica los tipos de los troceadores según los cuadrantes de trabajo, el voltaje y corriente de la carga.

2.3.1. Troceador Clase A

En esta clase de troceador, el voltaje y la corriente en la carga, que en realidad representa el modelo del circuito de la armadura de un motor DC, operan siempre en sentido positivo, por lo que se los denomina del I Cuadrante. el circuito se muestra en la figura 2.5

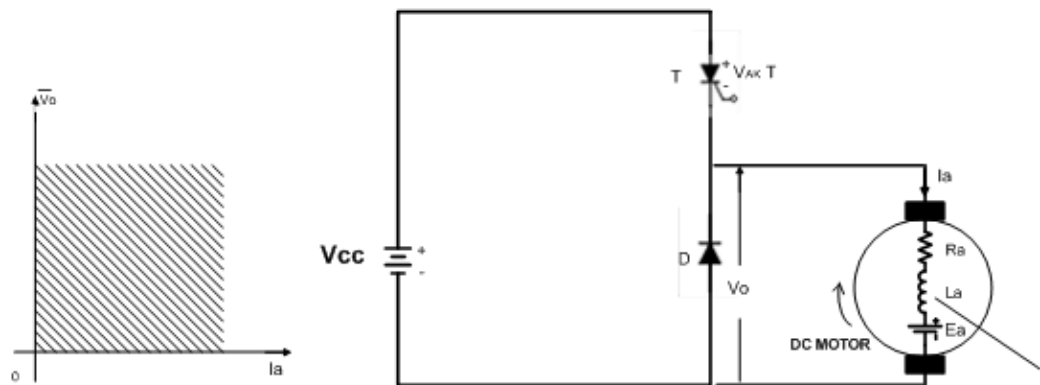


Fig. 2.5 Troceador Clase A

2.3.2. Troceador Clase B

Un Troceador de este tipo alimenta o devuelve energía a la fuente DC a través del terminal de salida del Troceador, debido al uso de un motor regenerativo, comúnmente usado en el manejo de trenes subterráneos; su circuito básico se muestra en la figura 2.6

Este sistema opera sólo en el II cuadrante pues el voltaje en los terminales del troceador es positivo mientras que la corriente es negativa,

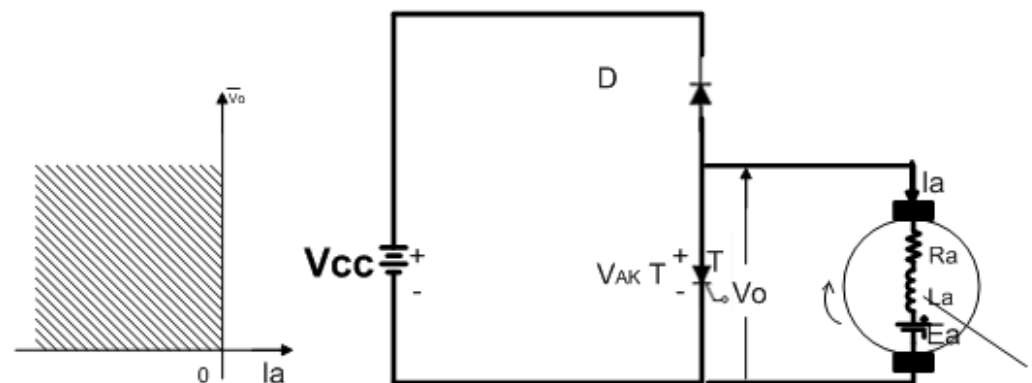


Fig. 2.6 Troceador Clase B

2.3.3. Troceador Clase C

Este tipo de Troceador trabaja en los dos primeros cuadrantes durante su operación normal, permitiendo una suave transición de corriente positiva a negativa y viceversa, aplicación conocida por ejemplo en el manejo de máquinas.

En la figura 2.7 se muestra el circuito

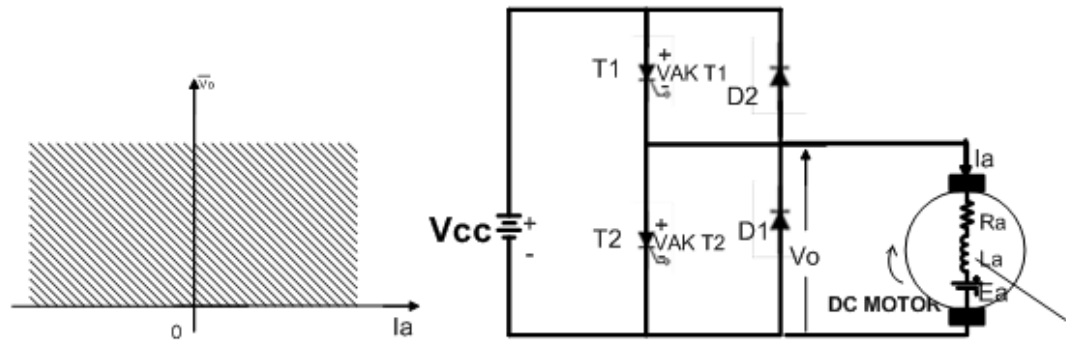


Fig. 2.7 Troceador Clase C

2.3.4. Troceador Clase D

Este tipo de troceadores opera en el I y IV cuadrante, principalmente para controlar la corriente de campo de una máquina DC. En la figura 2.8 se muestra el circuito

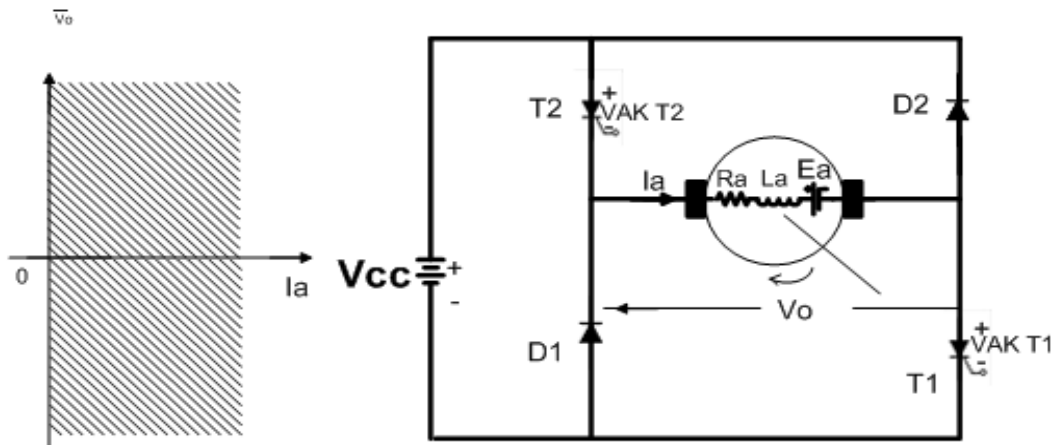


Fig. 2.8 Troceador Clase D

2.3.5. Troceador Clase E

Este tipo de troceador opera en los cuatro cuadrantes, la figura 2.9 muestra un circuito ejemplo,

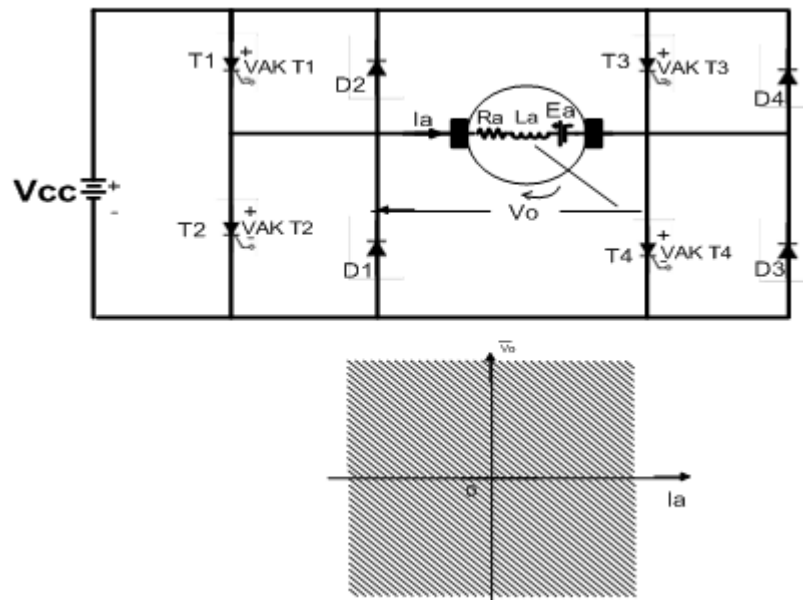


Fig. 2.9 Troceador Clase E

2.4. El Troceador (Chopper) de Jones.

Este troceador opera como uno de clase A, es decir, el voltaje y la corriente está en el primer cuadrante y son positivos. Tiene dos SCR, uno principal y otro auxiliar para la conmutación forzada por voltaje y siempre entran a conducir alternadamente. La figura 2.10 representa el troceador de Jones.

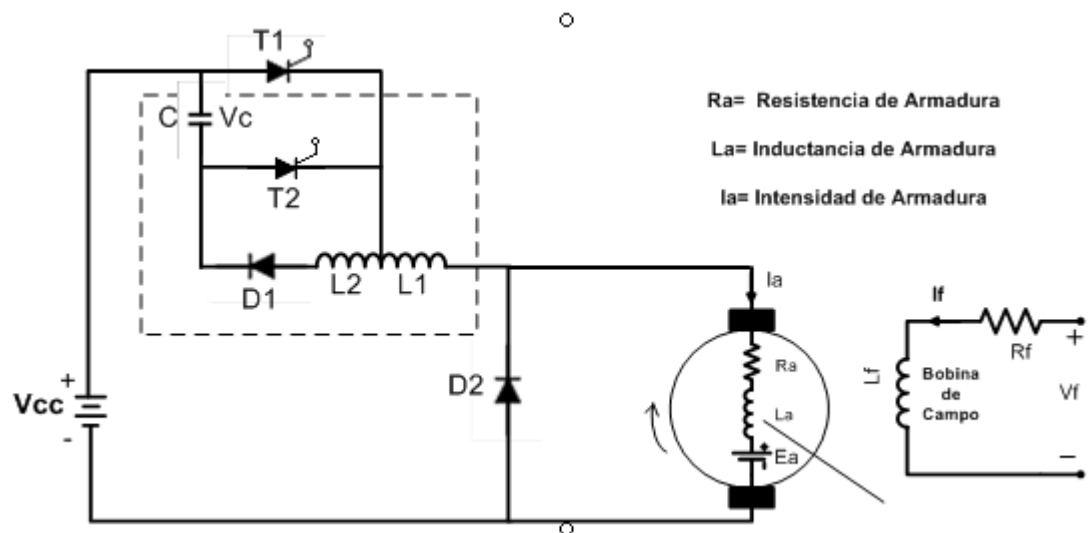


Fig. 2.10 Circuito del Troceador de Jones

CAPITULO 3

3. CONTROL DE VELOCIDAD DE MOTORES DC

3.1. Características Básicas y Tipos de Motores de Corriente Continua.

3.1.1. Características Básicas de las Máquinas de corriente Continua.

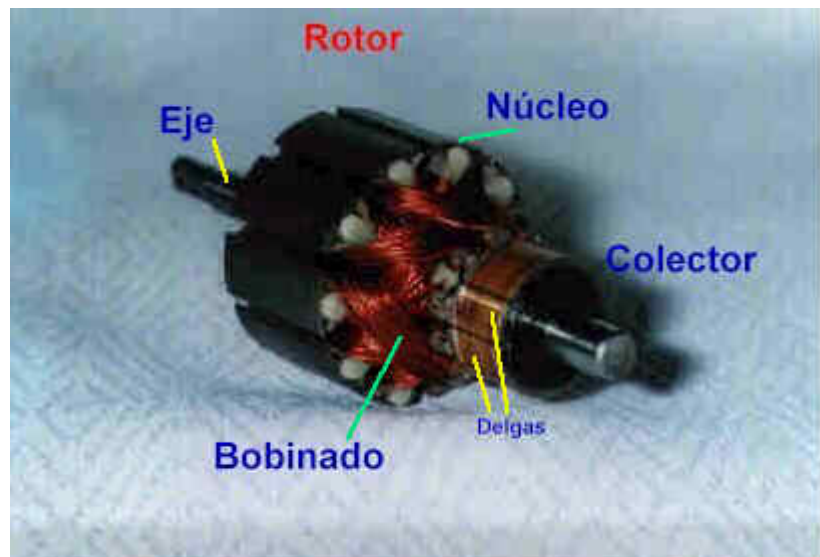
Las maquinas de corriente continua pueden ser utilizadas Como motores o como generadores depende únicamente de la dirección del flujo de potencia que circula a través de dicha máquina.

En la figura 3.1 aparecen las características esenciales de una máquina de Corriente continua. El estator tiene polos salientes y se excita mediante uno o más devanados de campo.

La distribución de flujo en el entrehierro que crean los devanados de campo es simétrica respecto a la línea de centro de los polos de campo.

El rotor posee un conjunto de bobinas que giran con él, que se encargan de generar el campo magnético en cuadratura, y por ende, generar el torque de giro.

El colector, que corresponde a una especie de rectificador mecánico, se encarga de alimentar a cada bobina en el momento adecuado, con el fin de conservar la cuadratura de los campos.



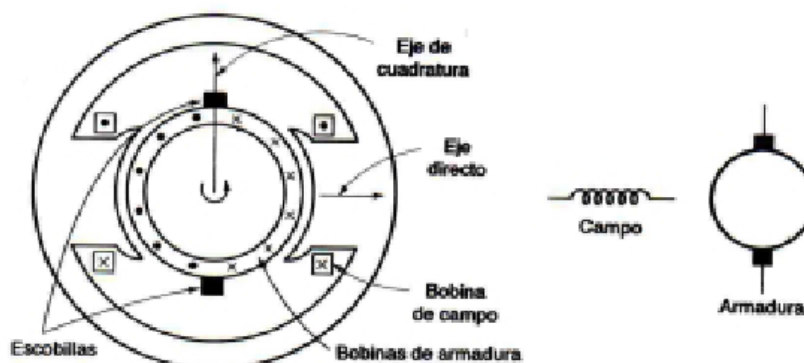


Fig. 3.1 Diagrama de un Motor de Corriente Continua.

La figura 3.2 muestra el modelo eléctrico del motor de Corriente Continua. De este modelo se pueden sacar las ecuaciones base que describen el comportamiento de la máquina.

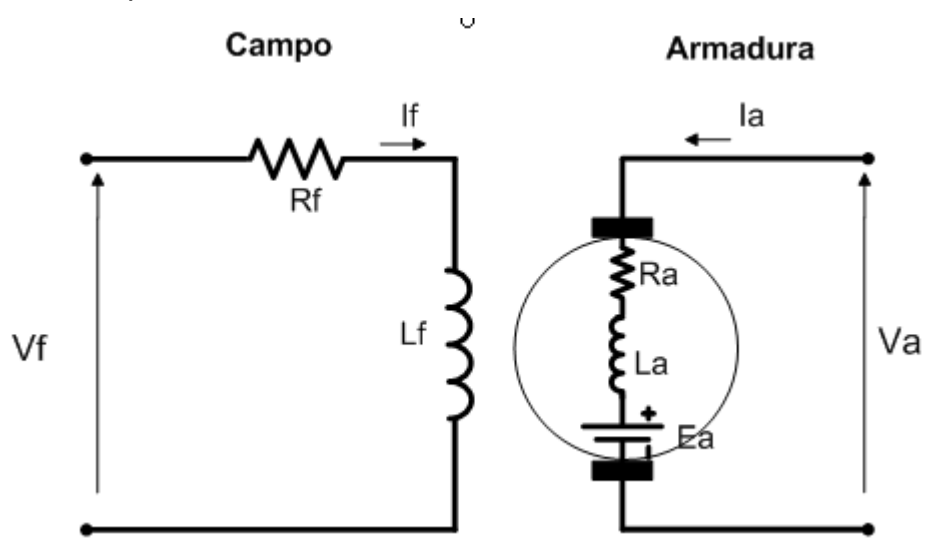


Fig. 3.2 Modelo Eléctrico del Motor de Corriente Continua.

El motor de DC consta de una parte fija llamada **ESTATOR** en la que van enrolladas los devanados de excitación llamados **POLOS**, formando en conjunto el **INDUCTOR O CAMPO**, y otra parte giratoria llamada **ROTOR o ARMADURA** en la que se encuentran los devanados que forman el **INDUCIDO**. En esta parte giratoria va fijo el eje del motor, elemento del que se obtiene la energía mecánica producida en forma de torque.

En la Figura 3.3 se muestra un esquema simple de un motor de corriente continua en que el inductor está formado por un imán permanente que reemplaza a los devanados del campo.

Al haber una corriente circulando por el inducido procedente de la fuente de alimentación y estar éste inmerso en el campo magnético creado por el imán, el inducido experimenta una fuerza debido a la Ley de Ampere que tiende a alinearlo con el campo producido por los polos N y S del imán. Al girar el inducido lo hace junto con el colector y, por tanto, junto con los segmentos colectores. Cuando el inducido alcanza su posición de equilibrio (giro de 180°) es entonces cuando cambia la polaridad de la tensión sobre los devanados de la armadura y se invierte el sentido de la corriente iniciándose un nuevo giro de 180° . De esa forma obtenemos una rotación

continua y puede realizarse un trabajo útil mediante el eje del motor.

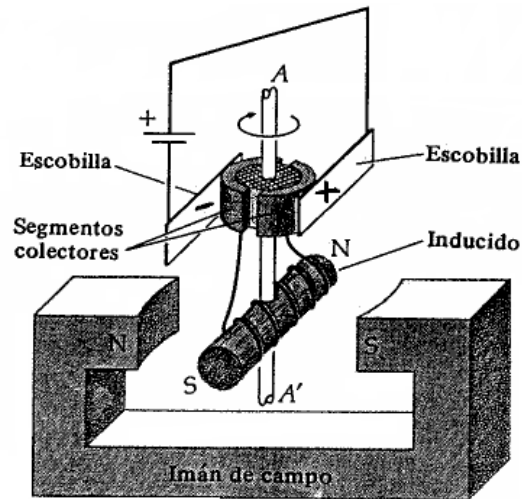


Fig. 3.3 Motor de DC de imán permanente.

Los motores eléctricos de corriente continua trabajan sobre el principio de que un conductor por el que circula una corriente y que se encuentra en un campo magnético tiende a moverse en ángulo recto con respecto al campo.

Los conductores del motor giran en un campo magnético y por lo tanto, deben desarrollar una *f.e.m* y la formula de la *f.e.m* inducida es:

$$Ea = K * \phi * \omega \quad (3.1)$$

Donde K es una constante, ϕ el flujo que entra en el inducido procedente de un polo norte, y ω la velocidad en *r.p.m.* Esta *f.e.m* esta en oposición a la tensión aplicada en los terminales y tiende a oponerse a la corriente que entra en el inducido.

Su valor es:

$$Ea = Va - Ia * Ra \quad (3.2)$$

Donde Va es el voltaje en los terminales, Ia la intensidad de la corriente en el inducido, y Ra la resistencia del mismo. De la formula se ve que la velocidad es:

$$\omega = \frac{Ea}{K\phi} \quad (3.3)$$

Esta es la ecuación fundamental de la velocidad de un motor.

Sustituyendo (3.2) en (3.3):

$$\omega = \frac{Va - (Ia * Ra)}{K\phi} \quad (3.4)$$

Que es la ecuación general de la velocidad de un motor.

3.1.2. Tipos de motores de C.C.

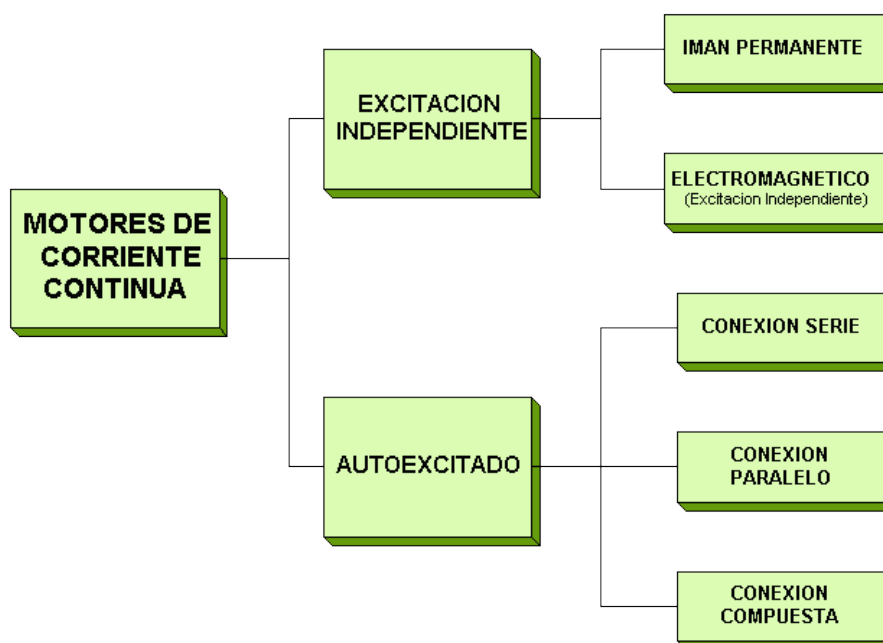


Fig. 3.4 Clasificación de los motores de corriente continua.

3.1.2.1. Motor en Derivación “shunt” y el Motor con Excitación Independiente.

En la figura 3.5 se muestra el circuito equivalente de un motor de corriente continua en derivación y en la figura 3.6 aparece el circuito equivalente de un motor de corriente continua con excitación independiente. El

motor shunt tiene el devanado de campo conectado en paralelo con el devanado de armadura.

El motor de excitación independiente tiene el devanado de campo alimentado por una fuente independiente. Cuando la tensión de suministro a un motor se supone constante, no hay diferencia práctica en el comportamiento de estas dos máquinas.

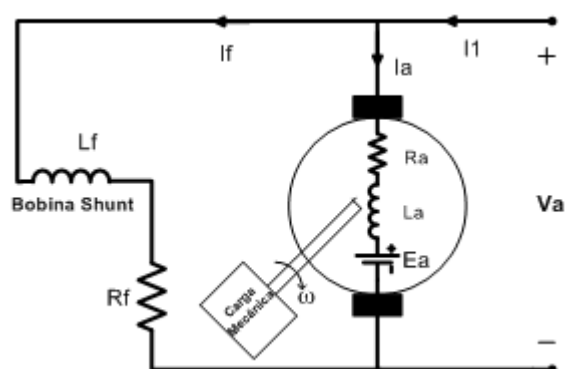


Fig. 3.5 Circuito equivalente de un motor en derivación (shunt).

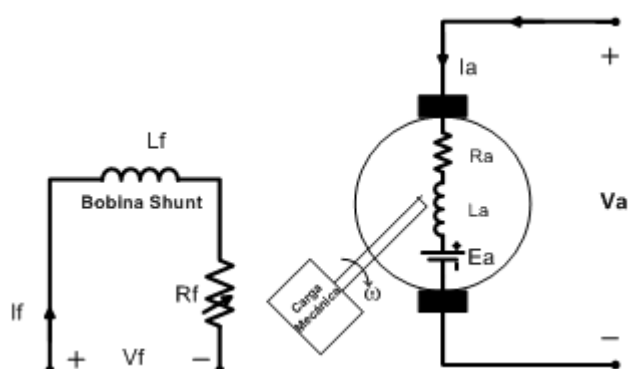


Fig. 3.6 Circuito equivalente de un motor Con excitación independiente.

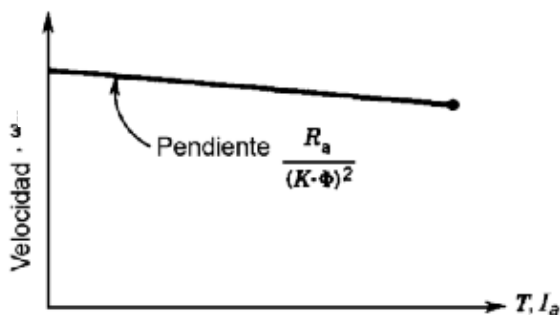


Fig. 3.7 Característica de carga de un motor en derivación o con excitación independiente

3.1.2.2. Motor serie

En los motores con excitación en serie, el inductor está conectado en serie con el inducido. El inductor tiene un número relativamente pequeño de espiras, que debe ser de sección suficiente para que pase por él la corriente que requiere el inducido.

Al crecer la carga, la caída de tensión en el inductor y en el inducido aumenta, siendo dicha caída proporcional a la intensidad de la corriente. Por lo tanto, la fuerza contra electro motriz disminuye, con lo que la velocidad tiende a decrecer.

La velocidad es inversamente proporcional al flujo y una determinada variación de flujo da origen a una misma variación proporcional de la velocidad.

Los motores series se utilizan para los casos en que se exige un gran par de arranque, como en los tranvías, locomotoras y grúas. Además del gran par de arranque, tienen otras características que los hacen especialmente adecuados para la tracción.

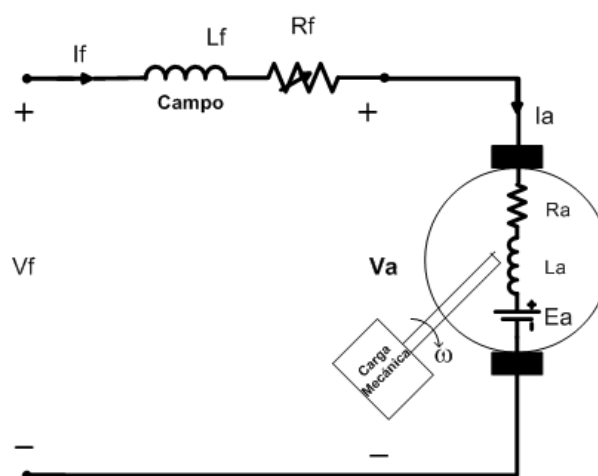


Fig. 3.8 Circuito equivalente del Motor serie.

3.2. Control de velocidad del Motor de Corriente Continua. de Excitación Independiente.

3.2.1. Tipos de regulación de velocidad de los motores de Corriente continua, de excitación independiente

En el motor de excitación independiente el flujo de campo ϕ es controlado por $I_f = \frac{V_f}{R_f}$. Como el inductor está conectado directamente a la fuente de alimentación V_a , el flujo de campo producido depende solo de la tensión V_f aplicada al campo (Fig.3.9).

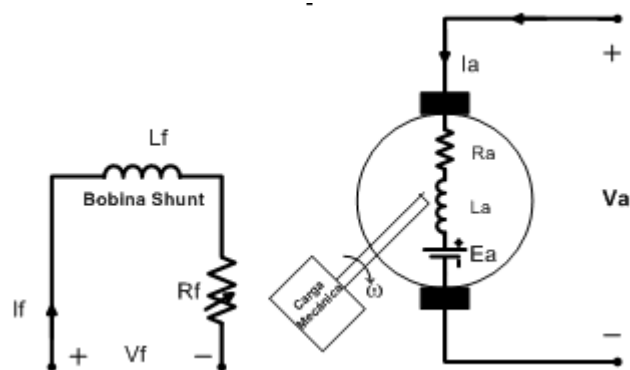


Fig. 3.9 Circuito del Motor de excitación independiente

Las ecuaciones que se muestran a continuación describen el comportamiento del motor de excitación independiente en estado estacionario.

Tensión del inducido $\rightarrow V_a = R_a * I_a + E_a$ (3.5)

Fuerza contraelectromotriz $\rightarrow E_a = K * \phi * \omega$ (3.6)

Par motor $\rightarrow T_d = K * \phi * I_a$ (3.7)

Potencia desarrollada $\rightarrow P_d = T_d * \omega$ (3.8)

Finalmente la velocidad queda $\rightarrow \omega = \frac{V_a - R_a * I_a}{K \phi}$ (3.9)

3.2.2. Regulación de la velocidad modificando el flujo de excitación

Una opción consiste en modificar el flujo de excitación que crea el inductor, es decir, variando V_f , así, según la ecuación (3.9) cambiará la velocidad y según la ecuación (3.7) el par. Como los cambios de la velocidad y el par tienen tendencia contraria, la potencia, según la ecuación (3.8) puede permanecer constante. **“Regulación de campo o de potencia constante”**.

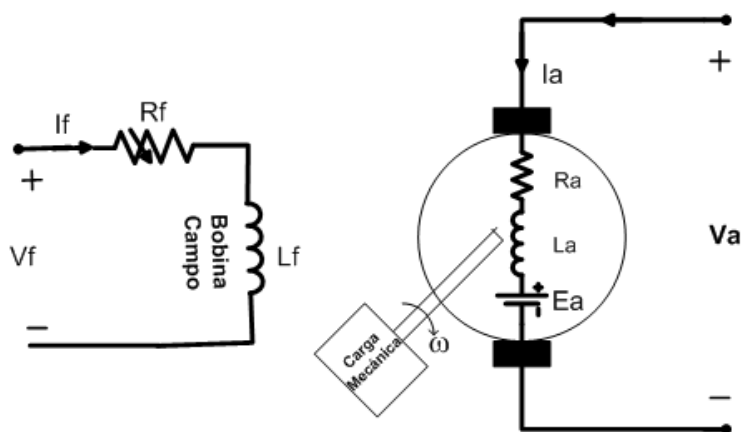


Fig.3.10 Variación de la velocidad controlando la corriente de campo.

3.2.3. Regulación de la velocidad modificando el voltaje de la armadura

Otra opción consiste en mantener el flujo de excitación que crea el inductor y variar la tensión del inducido V_a , en este caso, según la ecuación (3.9) se modificara la velocidad ya que la corriente de armadura I_a permanece prácticamente constante. Según la ecuación (3.7) el par permanecerá constante al no variar la corriente de armadura pero la potencia proporcionada variara como consecuencia del cambio en la velocidad. ***“Regulación del inducido o de par constante”***.

Existen varias formas de modificar el voltaje de armadura de un motor shunt o de excitación independiente:

1. Adaptando resistencias en serie con la armadura. Fig. 3.11
2. Utilizando un rectificador controlado. Fig. 3.12
3. Utilizando un troceador (chopper). Fig. 3.13

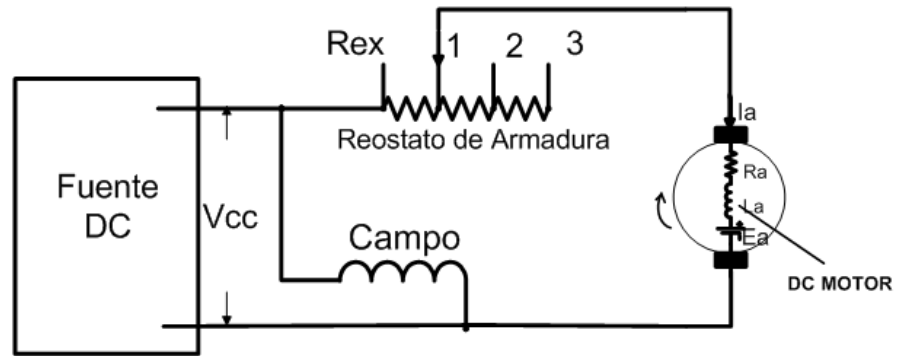


Fig.3.11. Variación de la velocidad mediante resistencias adicionales en el rotor.

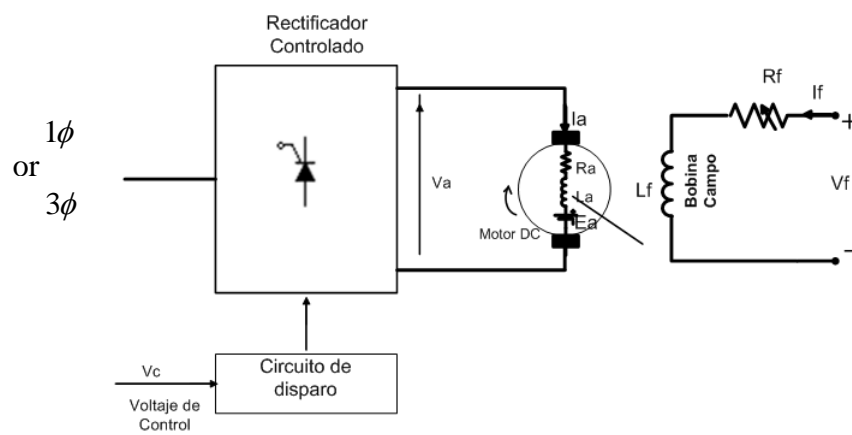


Fig. 3.12. Control de la tensión de armadura de un motor excitación independiente alimentado por un rectificador controlado.

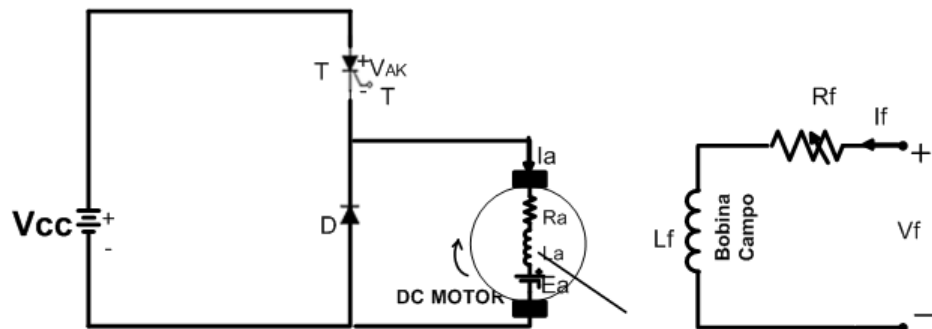


Fig. 3.13. Control de la tensión de armadura de un motor de excitación independiente alimentado por un troceador

La figura 3.14 muestra una imagen gráfica de las características anteriormente expuestas para el motor Corriente Continua. Cuando se realiza el control de la velocidad por regulación de inducido cuando V_a aumenta la velocidad ω aumenta. El par T_d permanece constante y la corriente I_a también ya que el aumento de V_a es compensado por el aumento de E_a . Si para controlar la velocidad se actúa sobre la corriente de campo I_f , cuando ésta disminuye aumenta la velocidad ω al tiempo que disminuye el par T_d . El aumento de la velocidad compensa la disminución del par y la potencia puede permanecer constante.

Recordar que:

$$\omega = \frac{V_a - (I_a * R_a)}{K\phi}$$

Donde ϕ es proporcional a I_f ; e $I_f = \frac{V_f}{R_f}$

En esta t3pico se va a realizar un control de la tensi3n de la armadura que alimenta el motor como m3todo de variaci3n de la velocidad angular del motor ω . Para obtener esta tensi3n variable se va a utilizar un **TROCEADOR DE JONES** y se variar3 el ciclo de trabajo de los conmutadores con el control pwm.

9. Ref: M3quinas El3ctricas – Stephen J Chapman – Segunda Edici3n, Cap.6, Pgs. 331-332.

3.3. Modulaci3n PWM.

10. Ref: <http://www.elo.utfsm.cl/~elo281/capitulo5.pdf>

La modulaci3n de ancho de pulso es una t3cnica utilizada para controlar dispositivos, o para proveer un voltaje variable de corriente continua. Algunas aplicaciones en las que se utiliza PWM son controles de motores, de fuentes de alimentaci3n, de iluminaci3n, etc.

La señal generada tendrá frecuencia fija y tiempos de encendido y apagado variables. En otras palabras, el período de la señal se mantendrá constante, pero la cantidad de tiempo que se mantiene en alto y bajo dentro de un período puede variar Fig. 3.15

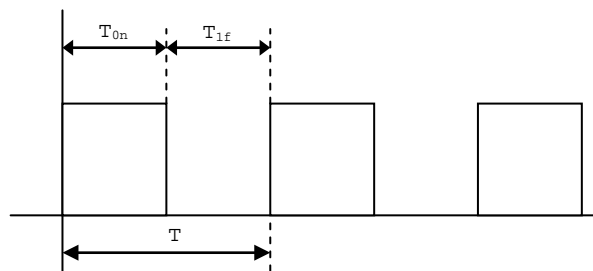


Fig. 3.15 Señal Modulada por el ancho del Pulso PWM

El parámetro “ T ” es el tiempo de un ciclo completo de la modulación. Y “ T_{on} ” es el tiempo en el que se genera un pulso de voltaje positivo (+Vcc) y “ T_{off} ” es el tiempo cuando la señal es 0V.

$$T = T_{on} + T_{off}$$

3.3.1. Moduladores de ancho de pulso (PWM)

Una manera de obtener una corriente continua cuyo valor medio se pueda variar es modular el ancho de una señal

pulsante de onda cuadrada que varíe entre 0 V. y un valor máximo de tensión $V_{Máx}$

Estos circuitos reciben el nombre de Modulador de Ancho de Pulsos (PWM), si lo que se varía es el tiempo de duración del pulso positivo.

Con este sistema se obtiene una señal cuadrada, cuyo valor medio es fácilmente variable, señal con la que se puede regular la velocidad de un motor de corriente continua.

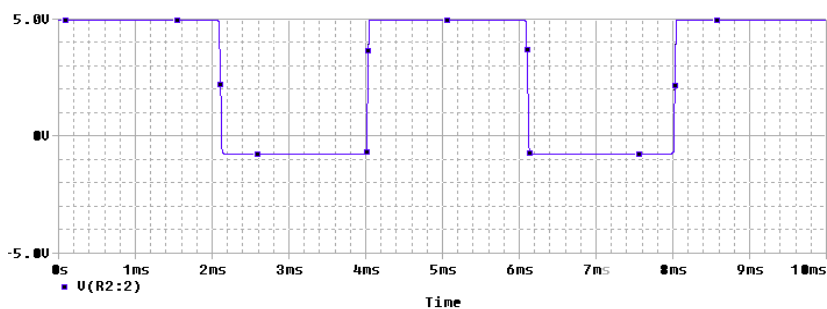
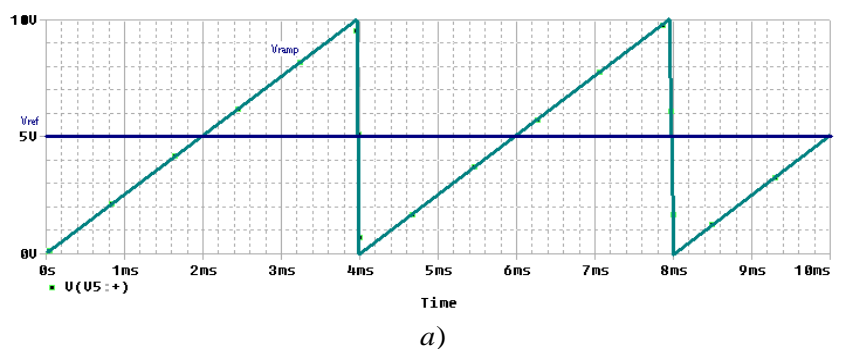
3.3.2. Ancho de pulsos

En una onda cuadrada modulada se varía el ancho de pulso positivo, manteniendo constante la frecuencia. Esto hace que el valor medio de la onda resultante sea variable dependiendo de la duración del pulso positivo de la misma.

La modulación de ancho de pulsos (PWM) se consigue con circuitos electrónicos, de una de estas formas:

- Generando una señal triangular y comparándola con una tensión continua de referencia (variable a voluntad), de

manera que en la salida se obtiene una onda cuadrada con regulación del ancho del pulso positivo Fig. 3.16. (a), (b).



**Fig. 3.16 a) Señales de entrada del comparador,
b) Señal de salida del comparador (onda modulada por
el ancho de pulso)**

- Mediante un circuito estable que controla el disparo de un monoestable, para obtener en la salida una onda cuadrada de pulso positivo variable.
- Mediante software, o mediante microcontroladores, por programa para μP , obteniendo en el puerto de

salida una señal cuadrada donde se puede variar el tiempo de pulso positivo.

La mayor ventaja de un circuito PWM respecto a un controlador resistivo es su muy buena eficiencia. Una ventaja adicional del PWM es que es capaz de alcanzar el máximo voltaje de la fuente, produciendo un mayor par de la máquina. Finalmente un circuito PWM con pequeños potenciómetros puede ser utilizado en el control de un amplio rango de cargas.

11. Ref: Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales de Robert F Coughlin, Frederick F driscoll pagina 34, 35,36,37

CAPITULO 4

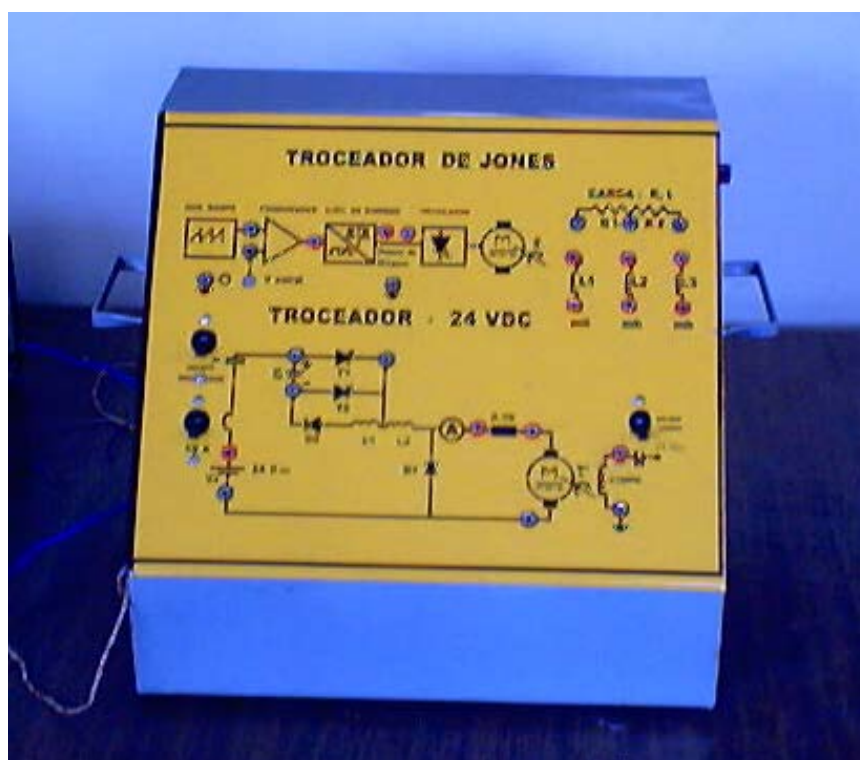
4. ANALISIS Y DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL Y FUERZA DEL TROCEADOR DE JONES

A continuación se muestra detalladamente los diseños de cada parte del equipo didáctico que se construyó.

4.1. Diseño y Descripción del Troceador de Jones

La figura 4.1 muestra una fotografía del equipo completamente terminado. Tiene terminales que permiten medir con el osciloscopio los voltajes en cada elemento del circuito, además están listos los terminales donde se conecta la fuente C.C. y otros para conectar la armadura y el campo del motor. La alimentación del circuito de control del equipo es de 120 V A.C. protegido con fusible. El circuito del troceador es alimentado con 24 V C.C. protegido con un breaker de 10A. La carga del troceador es un motor C.C. de excitación separada de 24 V – 6 A, el cual es conectado

internamente al activarse el contactor principal. Existe una condición de seguridad para arrancar el motor, mientras no se energice el campo del motor no funcionará el troceador.



**Fig. 4.1 Fotografía del Equipo didáctico Troceador de Jones
construido**

La figura 4.2 es una fotografía del equipo durante una prueba con el motor en marcha.

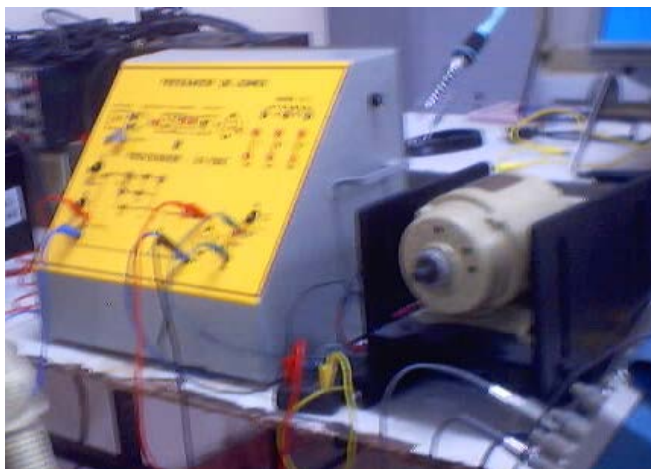


Fig. 4.2 Fotografía del equipo durante una prueba con un motor de 24V, C.C

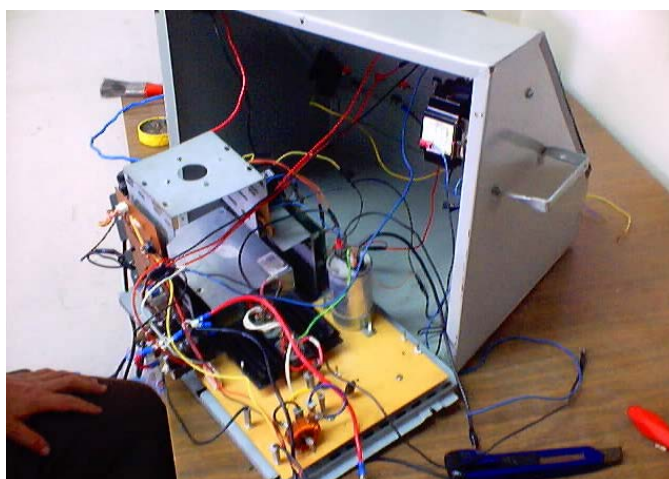


Fig.4.3 Fotografía de una vista interior del equipo con todos los circuitos montados y conectados.

4.1.1 El Troceador (Chopper) de Jones.

La figura 4.4 representa el troceador de Jones. Una ventaja de este circuito consiste en que el inicio de la secuencia de disparo de los tiristores T_1 y T_2 no es importante. Cuando T_1 pasa a conducir, se induce una corriente en el secundario de la inductancia de conmutación o autotransformador. Así pues, no es necesario que (el tiristor auxiliar T_2) se dispare primero.

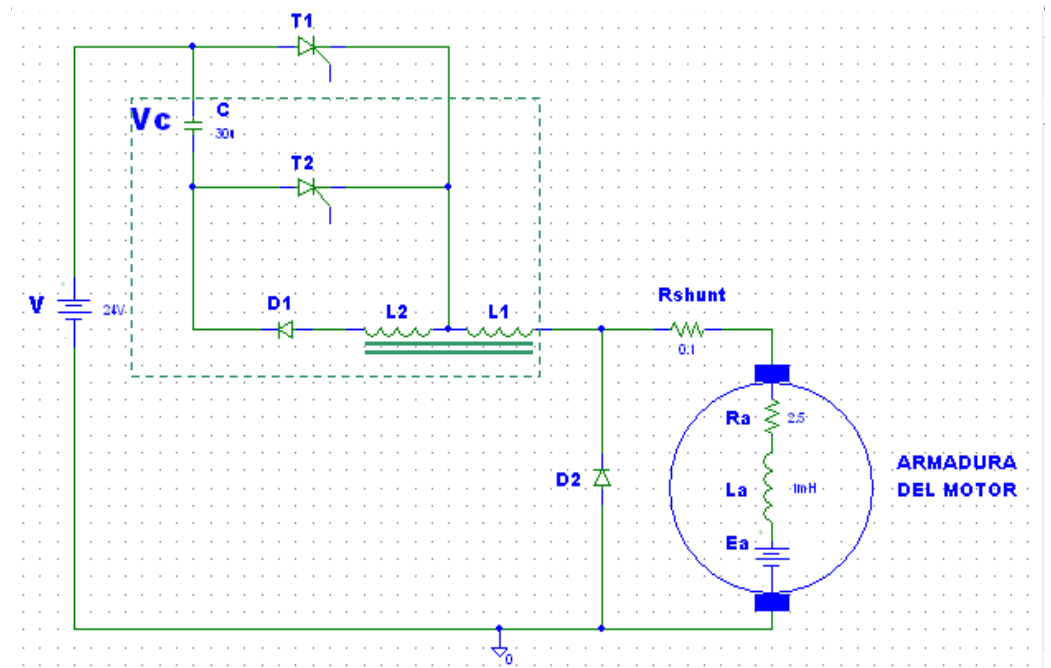


Fig. 4.4 Circuito del Troceador de Jones

La acción de los SCRs es la de recortar la señal de voltaje directo que recibe de la fuente y transformarla en una serie de pulsos de voltajes. La porción del circuito entre las líneas

punteadas es el circuito de conmutación para T_1 . La idea básica del circuito es que T_1 actúe como un simple interruptor. Si el interruptor se cierra y abre alternadamente de manera periódica, el motor gira con una velocidad fija entre cero y el valor máximo.

Las formas de onda del circuito de la figura 4.4 son mostrados en las figuras 4.5 y 4.6.

En la figura 4.5 el motor opera a baja velocidad. Cuando T_1 se enciende en $t=0$ la corriente de armadura es entregada por la batería y crece de acuerdo a las características eléctricas que presentan el motor (R_a , L_a , y E_a) y L_1 . Hay que considerar que el voltaje de la fuente se resta con el voltaje contraelectromotriz de la armadura. Cuando T_1 se apaga en t_1 , la corriente de armadura se reduce a través del diodo de paso libre D_2 , debido a la energía almacenada en la inductancia, la misma que continua alimentando al motor. El propósito del diodo de paso libre es conducir la corriente inductiva del motor cuando T_1 se apaga y a la vez prevenir la aparición de altos voltajes en los terminales del motor.

La circulación de corriente a través del diodo de paso libre también mantiene una corriente constante a través de la armadura y por ende el torque también será constante, esto es siempre y cuando el motor tenga una inductancia relativamente alta lo cual genere una corriente continua. Si la inductancia en el circuito de armadura es pequeña, la variación de la corriente de armadura es sustancial, por lo cual resultaría en un rizado sustancial del torque en el motor.

La figura 4.6 muestra la forma de onda de voltaje y corriente del troceador cuando el motor opera a alta velocidad.

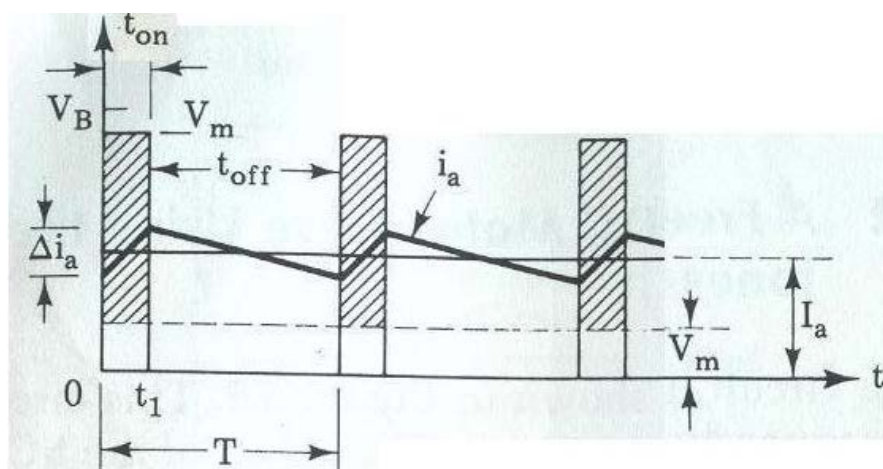


Fig. 4.5 Forma de onda de voltaje y corriente del motor a baja velocidad

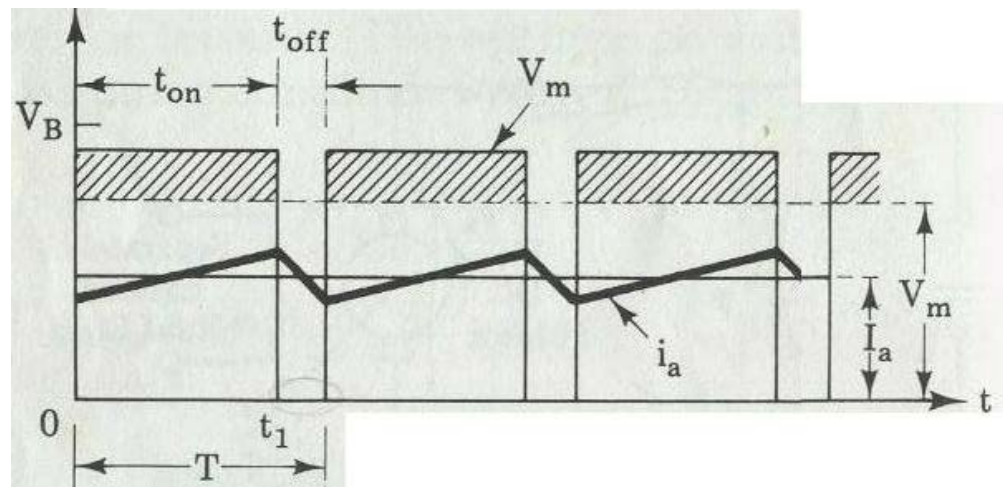


Fig. 4.6 Forma de onda de voltaje y corriente del motor a alta velocidad

12. Ref: Power Electronics and Controls, Samir K. Datta, Editorial. Prentice Hall 1985, Cap. 6, Pgs.

72-80

4.1.2 Operación del Circuito de Conmutación de Jones

El circuito de Jones es un método eficaz de conmutación para apagar el SCR principal T_1 en el troceador que se muestra en la figura 4.4.

El circuito se caracteriza como un troceador clase A. El cual usa un circuito auxiliar de conmutación forzada. El capacitor de conmutación se carga alternadamente lográndose cambiar la magnitud y polaridad del voltaje en sus terminales mediante la acción del SCR auxiliar T_2 y el autotransformador. En este circuito se puede variar T_{on} y T_{off} del SCR principal para variar el voltaje de salida del troceador.

Inicialmente T_1 y T_2 no están conduciendo y el lado superior del capacitor C esta cargado con un voltaje positivo. Al tiempo t_1 en la figura 4.7, T_1 es disparado, hay paso de corriente al motor a través del primario del autotransformador L1, así la corriente por él aumenta hasta el valor de la corriente de la carga desde t_1 a t_2 . Esta variación de corriente provoca una variación de flujo en el núcleo del autotransformador generando un impulso de voltaje en los terminales del secundario del autotransformador (L2).

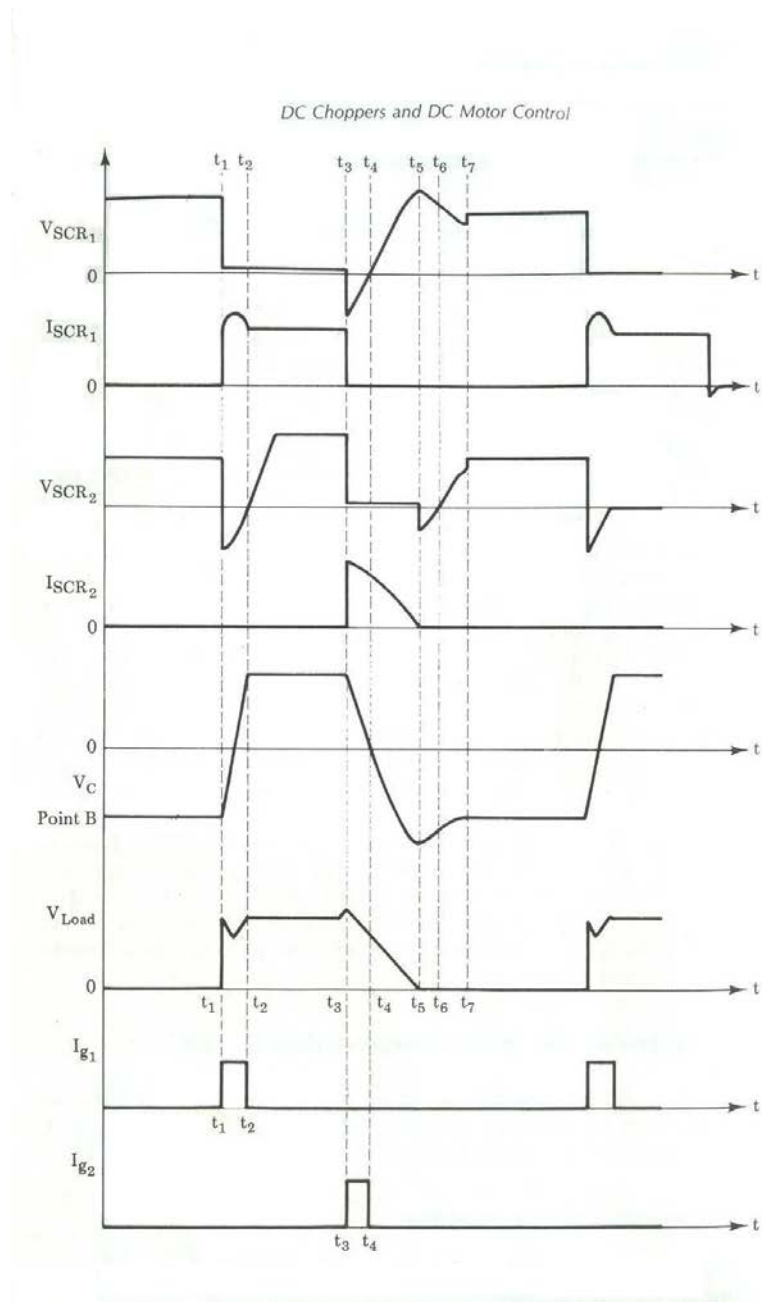


Fig. 4.7 Forma de onda de voltaje y corriente en el
Troceador de Jones

Este impulso carga C. En el instante t_2 la totalidad de la energía magnética del autotransformador ha sido almacenada en el condensador (suponiendo pérdidas nulas), evitando D1 que esta se descargue. La oscilación de corriente a través de T_1 , L2, D1 y capacitor C permite que se cargue el capacitor con polaridad opuesta, el lado inferior llega a ser positivo y el superior negativo. El diodo D1, como ya se dijo, evita que la oscilación del circuito resonante L2C se complete en el semiciclo negativo. Por consiguiente el capacitor retiene su carga hasta que T_2 se dispare en el tiempo t_3 .

En este instante t_3 , el tiristor T_2 pasa a conducir, T_1 se bloquea porque el voltaje del capacitor lo polariza inversamente ya que este se había cargado negativamente en el intervalo $t_1 - t_2$. A partir de t_3 se inicia la descarga del capacitor C el cual invierte la polaridad a T_1 , el mismo que se apaga, en consecuencia la corriente de la carga pasa de T_1 a T_2 . En t_3 la corriente de salida del troceador no se altera por lo tanto no se induce voltaje en el autotransformador. De t_3 a t_4 el capacitor se descarga y de t_4 a t_5 se carga como al inicio. De t_3 a t_5 la corriente por T_2 decrece cosenoidalmente

hasta cero y T_2 se apaga por autoconmutación porque la corriente a través de él cae por debajo del valor de mantenimiento. En t_5 la inductancia de la carga obliga al diodo de paso libre conducir la corriente del motor y la corriente de resonancia pasa por cero. Esta última tiene la posibilidad de invertirse y circular a la fuente a través de C, D1, L2, L1 y D2 con el fin de entregarle energía. Suponiendo que la fuente acepta una corriente regenerativa, el recorrido de esta corriente de resonancia realimenta la fuente de C.C. y el rendimiento del troceador mejora. El ciclo se repite cuando T_1 es otra vez disparado. Desde t_7 hasta que se dispare nuevamente SCR1 el circuito es estable y el voltaje en la carga es cero, siempre que la corriente del motor sea continua. Pero si la corriente es discontinua, el voltaje en la carga no es cero sino igual al voltaje contraelectromotriz. Para el motor que hemos usado, la corriente es discontinua, para ciclos de trabajos bajos y continuos para ciclos de trabajos altos.

4.1.3 Regulación de velocidad con el troceador de Jones

Como se discutió en el capítulo 3, la velocidad de un motor de excitación independiente puede ser regulada variando el flujo de campo o el voltaje de la armadura de acuerdo a la ecuación:

$$\omega = \frac{V_a - (I_a * R_a)}{K\phi}$$

La segunda opción consiste en mantener el flujo de excitación que crea el inductor y variar la tensión del inducido V_a , en este caso, se modificará la velocidad y la corriente de armadura I_a permanece prácticamente constante.

Existen varias formas de modificar el voltaje de armadura de un motor shunt o en uno de excitación independiente. En este tópico se realiza un control de la tensión de la armadura que alimenta el motor como método de variación de la velocidad angular del motor ω . Para obtener esta tensión variable se va a utilizar un troceador y se varía el ciclo de trabajo de los conmutadores con el control pwm.

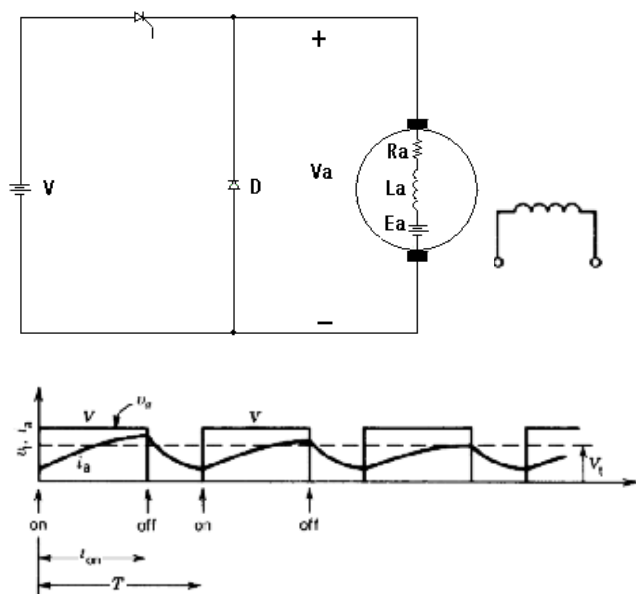


Fig. 4.8 Control de la tensión de armadura de un motor de excitación independiente alimentado por un troceador

13. Ref: Máquinas Eléctricas – Stephen J Chapman – Segunda Edición, Cap.6, Pgs.

331-332

14. Ref: <http://www.elo.utfsm.cl/~elo281/capitulo5.pdf>

4.2. Circuito Generador de Rampa

4.2.1. Diseño y Operación de la Rampa.

En la figura 4.9, se muestra un circuito generador de onda diente de sierra. El amplificador operacional de la izquierda es

un generador de rampa. Como E_i es negativa, $V_{o\,ramp}$ sólo puede aumentar. La tasa de aumento del voltaje de rampa es constante en:

$$\frac{V_{o\,ramp}}{t} = \frac{E_i}{R_i C}$$

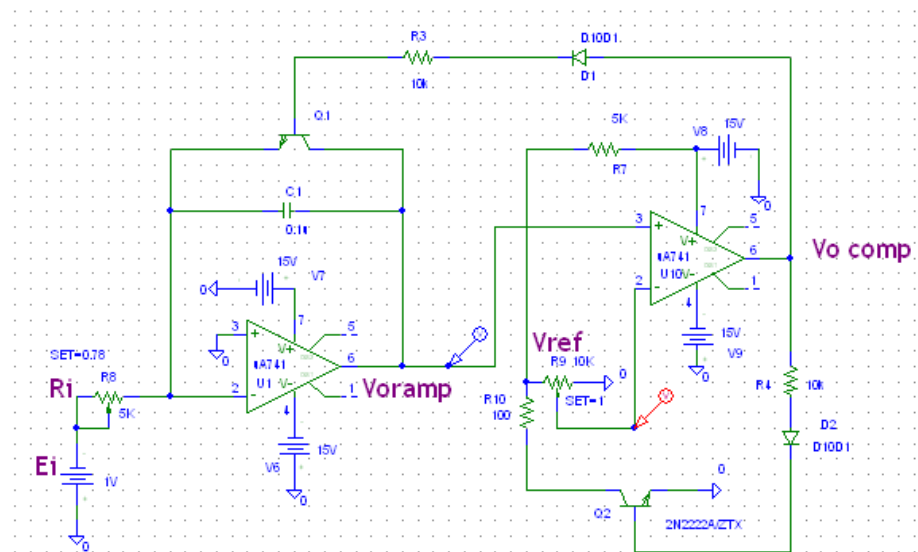


Fig. 4.9 Circuito Generador de Onda Diente de Sierra

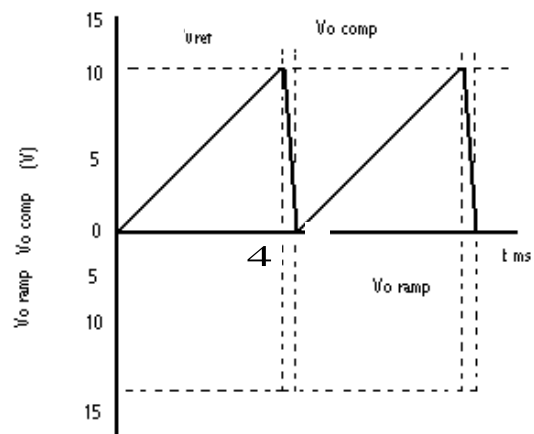


Fig. 4.10 Salida $V_{o\,ramp}$ del Generador Diente de Sierra y salida del comparador

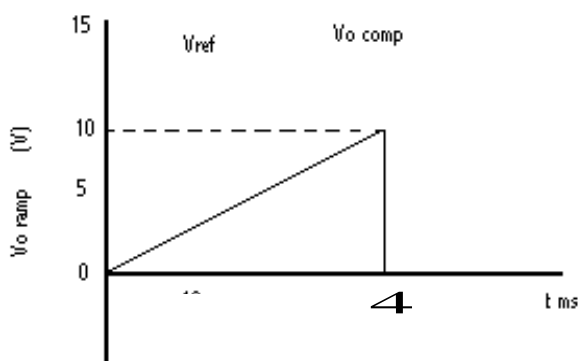


Fig. 4.11 Voltaje pico de la rampa establecida por V_{ref} .

El voltaje rampa es monitoreado por la entrada (Positiva, pin3) del comparador LM741 de la derecha. Si V_{0ramp} está por debajo de V_{ref} la salida del comparador es negativa. Los diodos protegen a los transistores contra una polarización inversa excesiva.

Cuando V_{0ramp} aumenta lo justo para exceder V_{ref} , la salida V_{0comp} pasa a saturación positiva. Esta polarización directa hace que el transistor Q_1 pase a saturación. El transistor saturado actúa como corto a través del capacitor integrador C. El capacitor C se descarga rápido a través de Q_1 hacia 0V. Cuando V_{0comp} pasa a positivo, Q_2 se activa para poner en corto al potenciómetro de 10 k Ω . Esto reduce V_{ref} hasta casi cero voltios.

A medida que C se descarga hasta 0V, lleva a V_{0ramp} hasta 0V muy rápido. V_{0ramp} cae por debajo de V_{ref} , lo que causa que V_{0comp} pase a negativo y desactive Q_1 . C se comienza a cargar linealmente y se inicia la generación de una nueva onda diente de sierra.

4.2.2. Análisis de la forma de onda diente de sierra.

En la figura 4.10, el voltaje de rampa aumenta a una tasa de 2.5V por milisegundo. Mientras tanto, V_{0comp} es negativo. Cuando la rampa cruza V_{ref} , V_{0comp} cambia súbitamente a positivo para llevar el voltaje rampa a 0 V. Mientras V_{0ramp} conmuta a 0V, la salida del comparador se restablece a saturación negativa. En la figura 4.11 se resume la operación rampa.

4.2.3. Procedimiento de diseño.

La duración de un periodo de onda diente de sierra, se puede obtener con eficiencia por medio de la analogía con una experiencia familiar.

$$\text{tiempo(de aumento)} = \frac{\text{dis tan cia(de aumento)}}{\text{velocidad(de aumento)}}$$

$$\text{periodo } T = \frac{V_{ref}}{E_i / R_i C}$$

$V_{ref} = 10v$
 $E_i = -1V$
 $R_i = 4k$
 $C = 0.1\mu F$

$$T = \frac{10}{\frac{1}{(4 \times 10^3 \times 0.1 \times 10^{-6})}} = 4 \times 10^{-3} s$$

Como la frecuencia es recíproco del periodo.

$$f = \left(\frac{1}{R_i C} \right) \frac{E_i}{V_{ref}}$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{4 \times 10^{-3}} = 250 Hz.$$

4.2.4. Ensamblaje y Pruebas

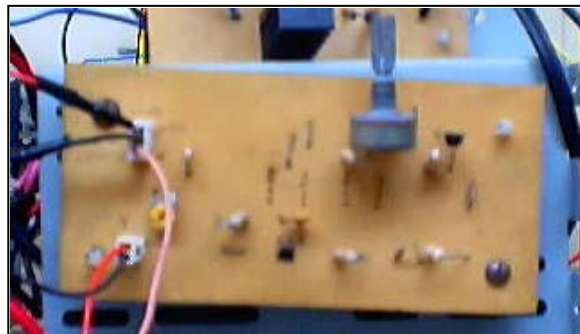
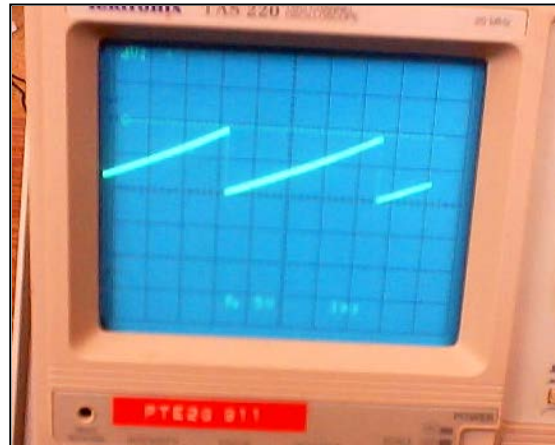


Fig.4.12 Circuito Impreso del Generador de Rampa



**Fig.4.13 Curva Experimental de la Señal de salida del
Generador de Rampa**

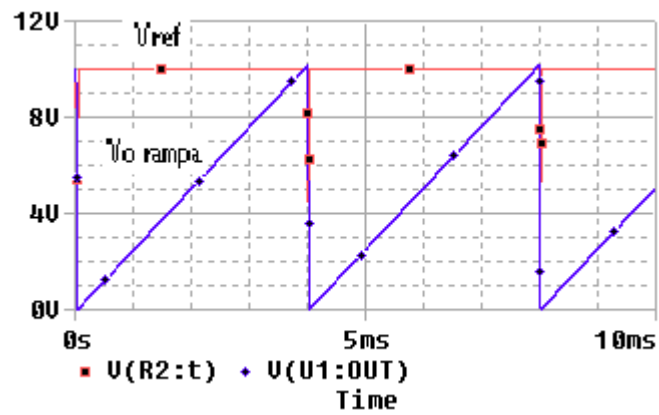


Fig.4.14 Simulación del Circuito Generador de Rampa

15. Ref: Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales de Robert F Coughlin, Frederick F driscoll pagina 163, 164,165

4.3. Circuito de Modulación PWM

4.3.1 Diseño y operación del circuito de Modulación PWM

La salida de un divisor de voltaje variable de referencia V_{ref} generado en un potenciómetro es enviada al modulador de ancho de pulso que es en realidad un comparador entre esta señal y la rampa descrita previamente.

El comparador 741 en la figura 4.15 compara dos voltajes de entrada, V_{ref} y V_{ramp} . Una onda de diente de sierra V_{ramp} , con frecuencia constante, $f_{ramp} = 250\text{Hz}$, está conectada a la entrada (negativa, pin2). La misma que se llama onda portadora. El voltaje máximo de esta onda es 10V. V_{ref} es un voltaje controlado por un potenciómetro el mismo que está conectado a la entrada (Positiva, pin 3). Su rapidez de cambio debe ser mucho menor que la de V_{ramp} .

En este circuito la señal de salida se define como el tiempo en alto, T_h de V_o . En la figura 4.17, la salida permanece alta durante la primera mitad del periodo (2ms) cuando V_{ref} es 5V. Si V_{ref} aumenta, el tiempo alto T_h aumenta. La salida

será alta siempre que V_{ref} sea mayor a V_{ramp} de lo contrario la salida será 0V, ya que el zéner en la salida del operacional recorta el voltaje negativo de saturación que aparece en el pin 6.

La operación del circuito se sintetiza por sus características de entrada-salida. El ancho de pulso de salida T_h es cambiado (modulado) por V_{ref} . El voltaje V_{oramp} establece el periodo constante de salida. Por tanto, V_{oramp} lleva la información contenida en V_{ref} . Se dice que V_o es una onda modulada por el ancho del pulso.

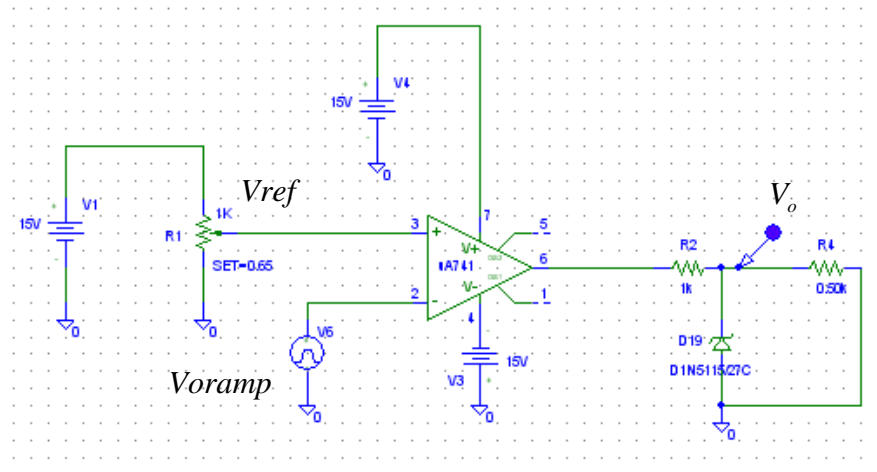


Fig.4.15 Circuito esquemático del modulador PWM

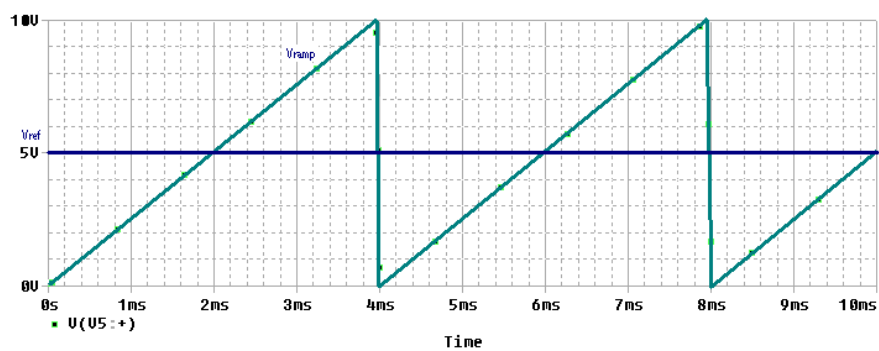


Fig.4.16 Curvas de Simulación de las entradas del Comparador

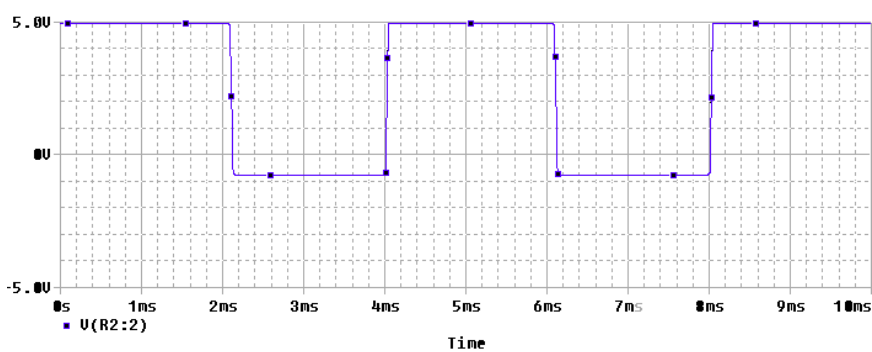


Fig.4.17 Curva de Simulación de la Salida del Comparador (V_o) señal PWM

4.3.1. Ensamblaje y Pruebas



Fig.4.18 Fotografía del Modulador de Ancho de Pulso PWM.

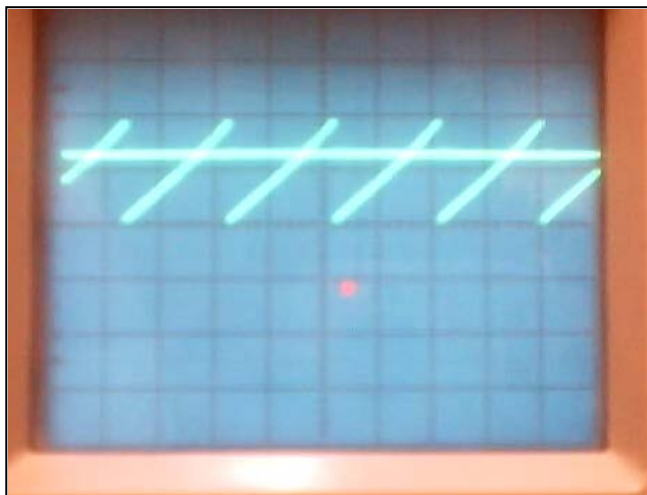


Fig.4.19 Curva Experimental de las entradas al Comparador

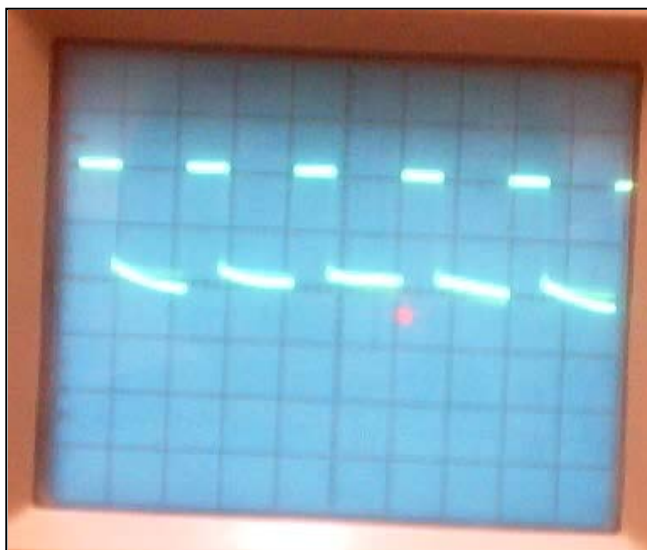


Fig.4.20 Curva Experimental de la Salida del Comparador Señal PWM

4.4. Circuito de Disparo

4.4.1. Diseño y operación del circuito de disparo

La salida de los pulsos modulados para los tiristores se conecta a una etapa de amplificación de corriente para asegurar un buen disparo de estos, a través de transformadores de pulso cuyos secundarios se conectan a las compuertas de cada tiristor, con el objeto de aislar el circuito de control. El diseño del circuito de disparo consiste en dos bloques de amplificación (fig. 4.21), uno para cada tiristor. Cada instante cuando se produce el flanco positivo en los pulsos modulados se genera un pulso de disparo de un tiempo muy corto de duración en la salida del primer amplificador de pulsos para encender el tiristor principal. Así también en el instante cuando se produce el flanco negativo se genera un pulso de disparo de un tiempo muy corto de duración en la salida del segundo bloque del amplificador de pulsos para encender el tiristor de conmutación. El primer bloque de amplificación cuenta en su entrada con un filtro RC de manera que a la base del transistor Q_1 no llega la onda cuadrada sino solamente un pulso con tiempo de duración

muy corto, en este momento Q_1 se satura y el primer transformador de pulsos TX1 se excita induciendo en su secundario un pulso de disparo de muy corta duración pero de mayor potencia que aquel que entro a la base de Q_1 . Este pulso se conecta a la compuerta del tiristor principal.

El segundo bloque del amplificador tiene dos etapas, la primera consiste en un inversor, el cual hace uso de un transistor Q_2 , de manera que en su salida tenemos una onda cuadrada invertida del PWM, y la segunda etapa es el amplificador de pulsos propiamente dicho. El funcionamiento de este otro amplificador, el mismo que usa un transistor Q_3 es similar al que tenemos en el primer bloque. La salida del transformador de pulsos TX2 de este segundo amplificador se conecta a la compuerta del tiristor de conmutación.

La relación de vueltas de primario a secundario de los transformadores de pulso es igual a 1. En el primario de cada transformador de pulso se conecta un diodo de paso libre y en el lado del secundario se conecta en serie un diodo para evitar corrientes inducidas en sentido inverso a la compuerta del tiristor, previniendo posibles daños.

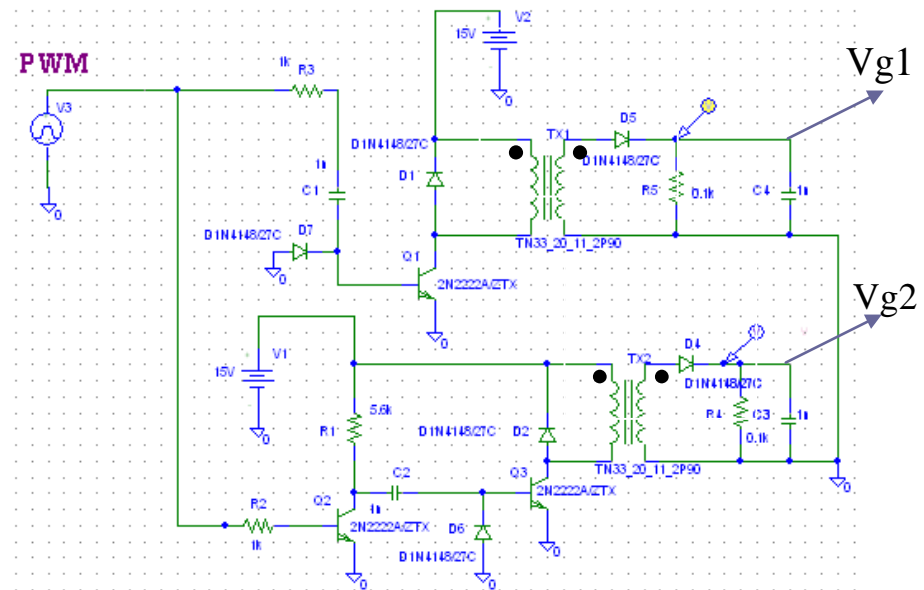


Fig.4.21 Circuito de Disparo y Control de los Tiristores.

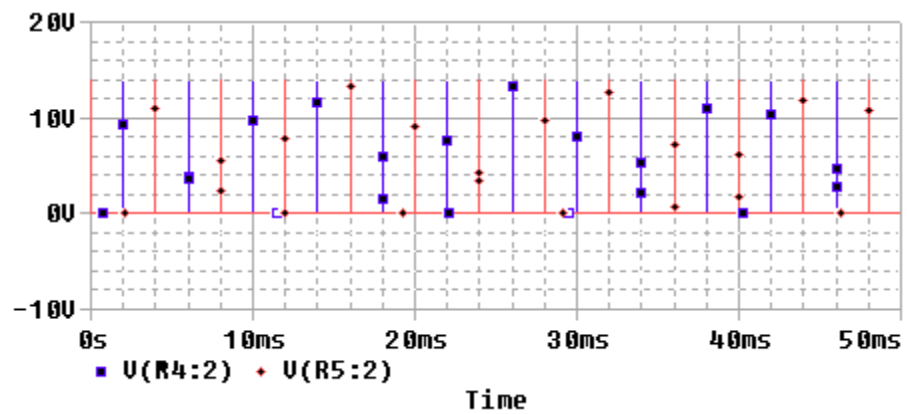
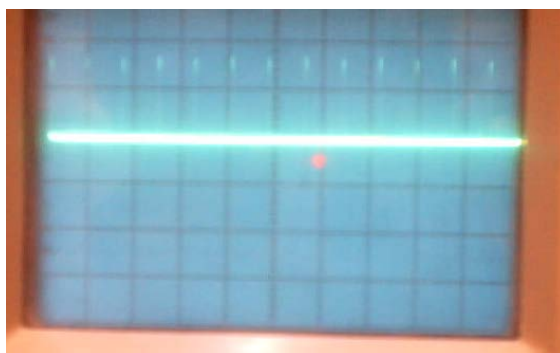


Fig.4.22 Curva de Simulación de las Salidas del Circuito de Disparo (Pulsos de Disparos de los dos tiristores).

4.4.2. Ensamblaje y Pruebas



Fig.4.23 Fotografía del Circuito de disparo



**Fig.4.24 Curva Experimental del los Pulsos de Disparo del
Tiristor Principal.**



Fig.4.25 Curva Experimental del los Pulsos de Disparo del Tiristor de Conmutación.

4.5. Circuito de Fuerza

4.5.1 Diseño y operación del circuito de fuerza del troceador

El circuito de fuerza de la figura 4.26 consta de un tiristor principal T_1 y uno auxiliar T_2 , un capacitor C de $30 \mu f$ el mismo que sirve para conmutar el tiristor principal. El capacitor se carga con el voltaje del secundario del autotransformador L_2 a través de un diodo D_1 . Cuando se dispara la compuerta del tiristor principal, la corriente fluye desde la fuente por el tiristor principal y el primario del autotransformador L_1 hasta la carga. En este instante se

induce un voltaje en el secundario del autotransformador L_2 , el mismo que sirve para cargar al capacitor C , preparándolo para la conmutación. Seguidamente en el instante en que se dispara la compuerta del tiristor auxiliar T_2 el voltaje del capacitor C se aplica en los terminales cátodo-ánodo del tiristor principal T_1 polarizándolo inversamente lo cual provoca que este se apague. Este ciclo se repite a una frecuencia de 250 Hz . El tiempo que permanece encendido el tiristor principal o el ciclo de trabajo de este es igual al ciclo de trabajo del ancho de pulso del circuito de control PWM.

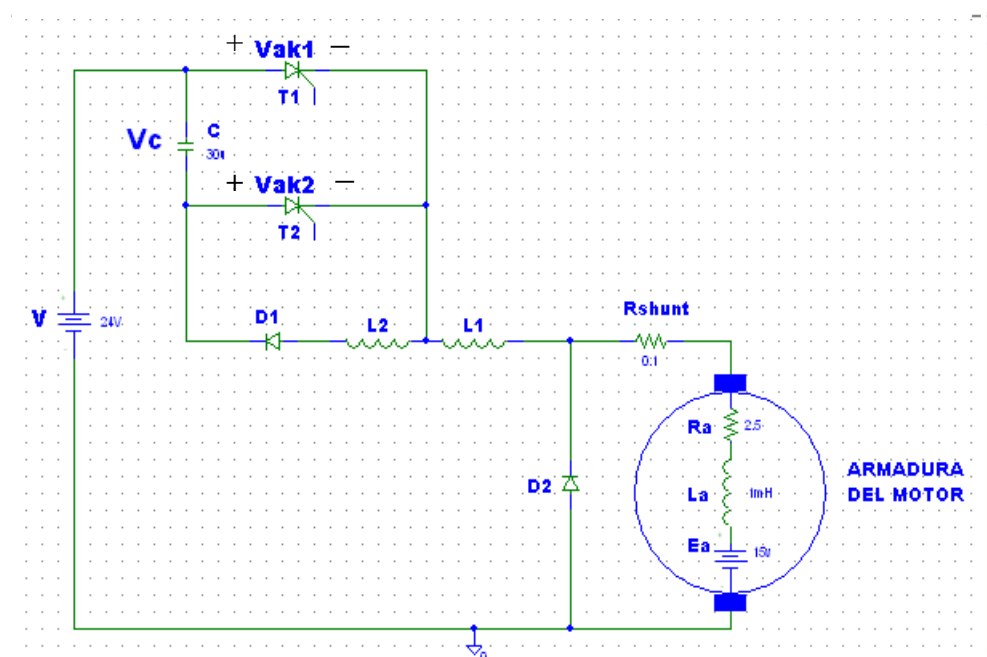


Fig.4.26 Circuito de Fuerza del Troceador de Jones

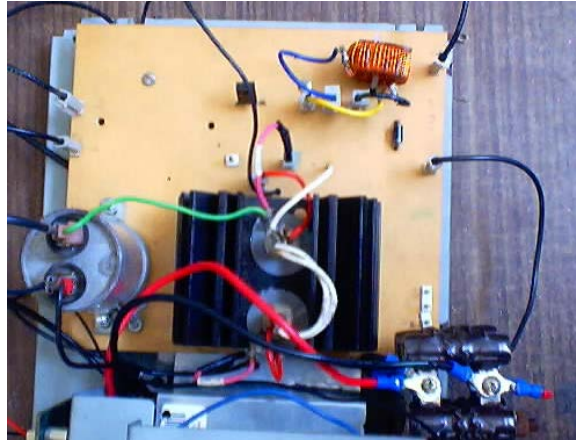


Fig.4.27 Fotografía del Circuito de Fuerza del Troceador de Jones

4.5.2. Resultados Experimentales y Simulación en PSpice del circuito de fuerza del troceador de Jones.

Para la simulación se utilizó un circuito esquemático equivalente al del troceador y motor, (Figura 4.28). Los pulsos de disparo se generaron con el generador Vpulse, los cuales se desfasaron para provocar el mismo efecto del circuito de disparo. Un transformador del simulador TX1 se conectó como autotransformador, y el motor se representó con una resistencia R_a en serie con una inductancia L_a y estos dos en serie con una fuente de voltaje E_a con polaridad invertida a la de la fuente de alimentación, lo cual simula al voltaje contraelectromotriz. Se comprobó que los resultados

experimentales obtenidos fueron similares a los resultados de las simulaciones.

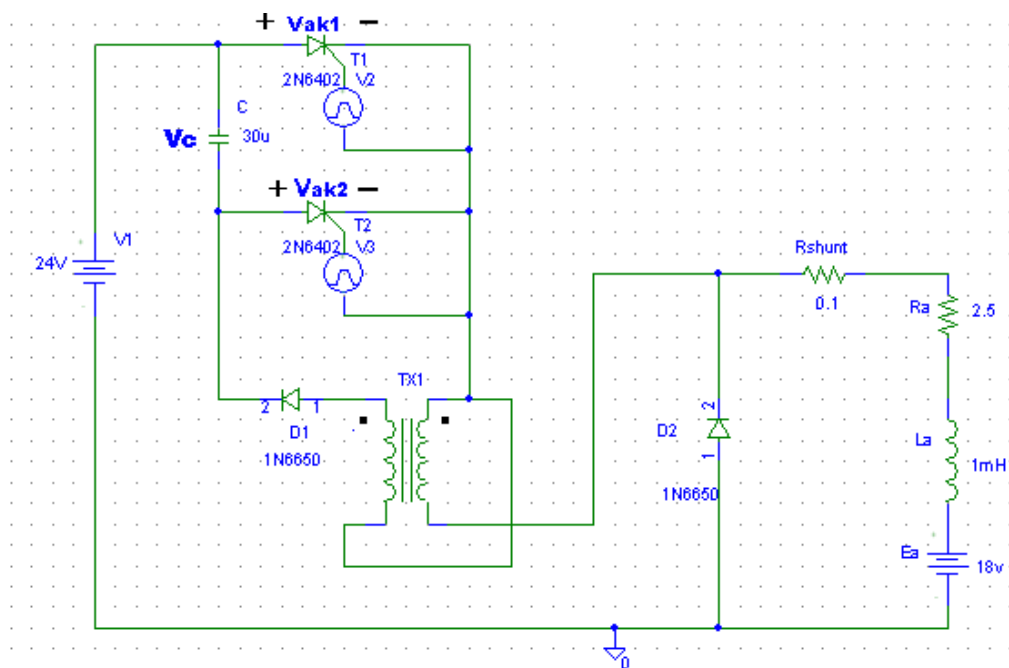


Fig.4.28 Circuito Esquemático de simulación del Troceador de Jones

Las figuras a continuación muestran gráficos de mediciones en el osciloscopio de los resultados experimentales y gráficos de las simulaciones en PSpice.

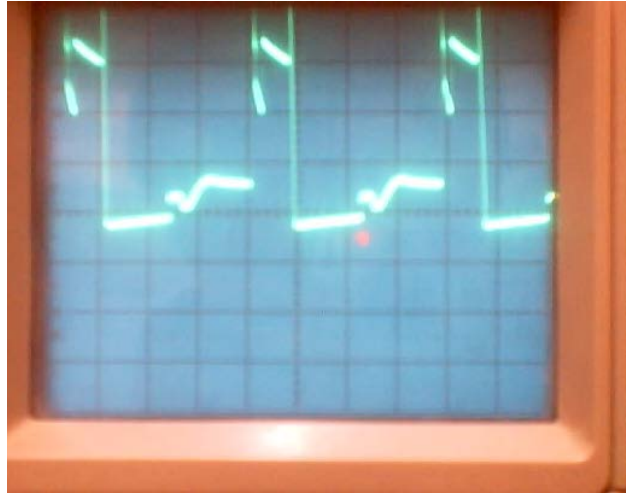


Fig.4.29 Curva Experimental del Voltaje en la Carga. Ciclo de Trabajo 25%.

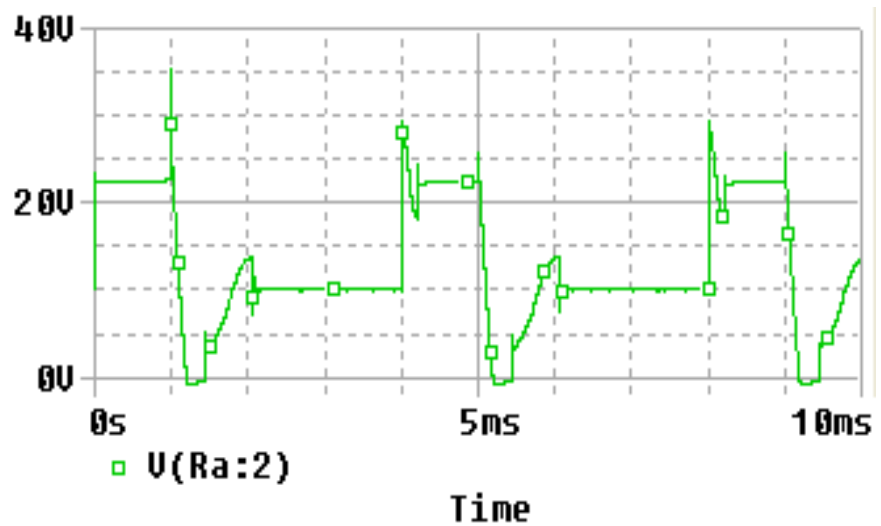


Fig.4.30 Curva de Simulación del Voltaje en la Carga. Ciclo de Trabajo 25%

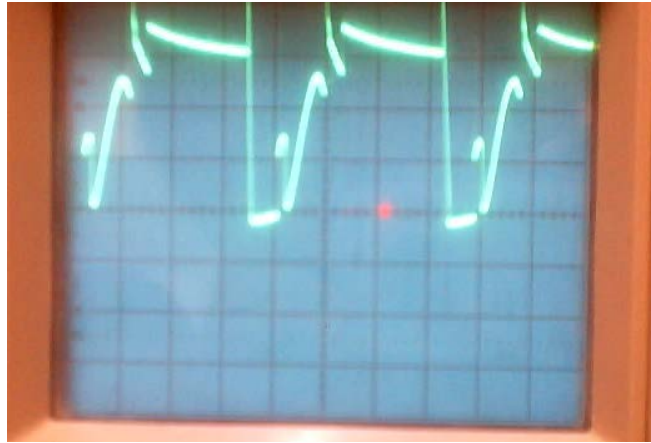


Fig.4.31 Curva Experimental del Voltaje en la Carga.

Ciclo de trabajo al 50%

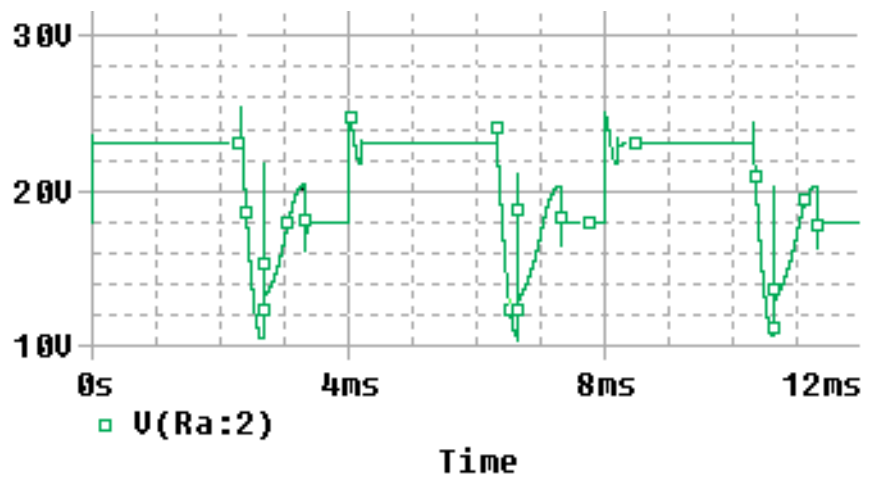


Fig.4.32 Curva de Simulación del Voltaje en la Carga.

Ciclo de trabajo al 50%



Fig.4.33 Curva Experimental de Voltaje en la Carga. Ciclo de Trabajo 90%

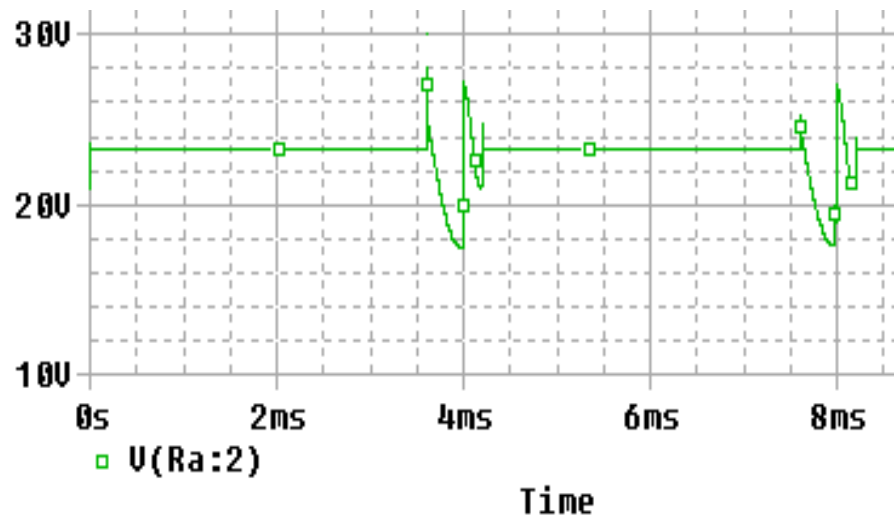


Fig.4.34 Curva de Simulación del Voltaje en la Carga. Ciclo de Trabajo 90%.



Fig.4.35 Curva Experimental de Corriente en la carga.

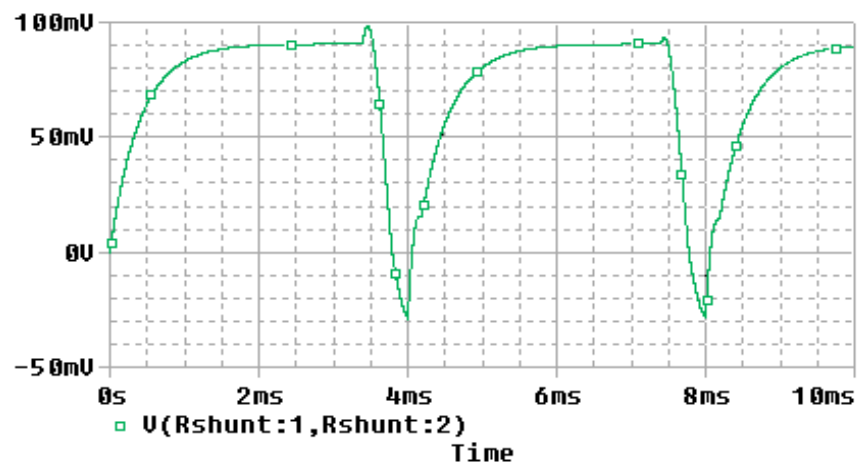


Fig.4.36 Curva de Simulación de Corriente en la carga.



Fig.4.37 Curva Experimental de carga del Capacitor.

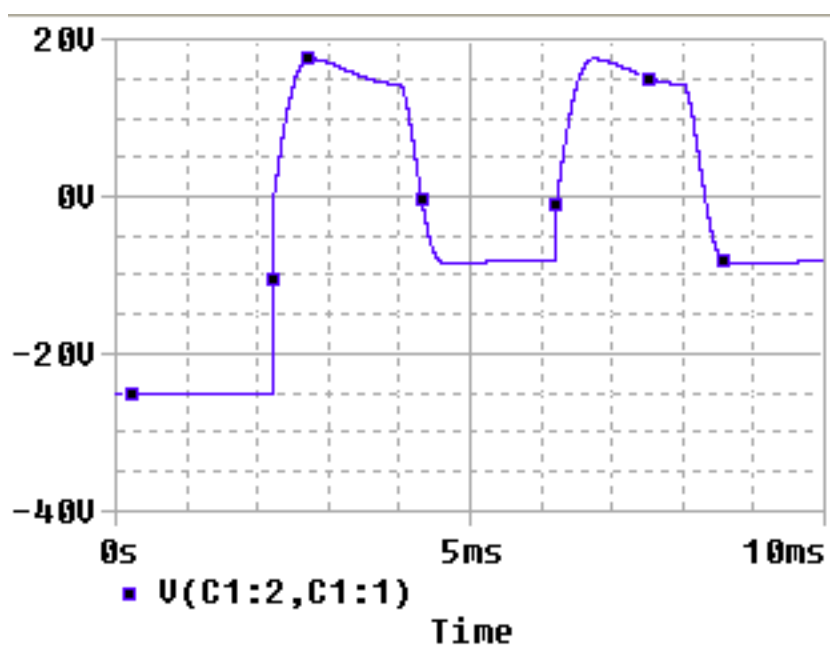


Fig.4.38 Curva de Simulación de carga del Capacitor.

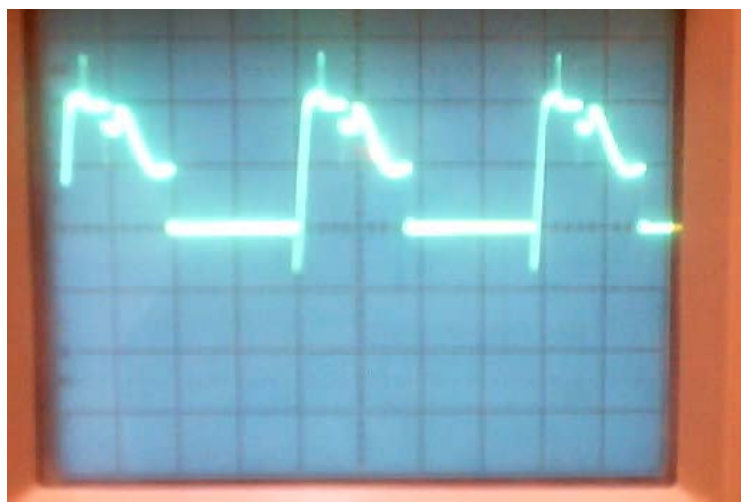


Fig.4.39 Curva Experimental del Voltaje V_{ak1} del Tiristor

Principal

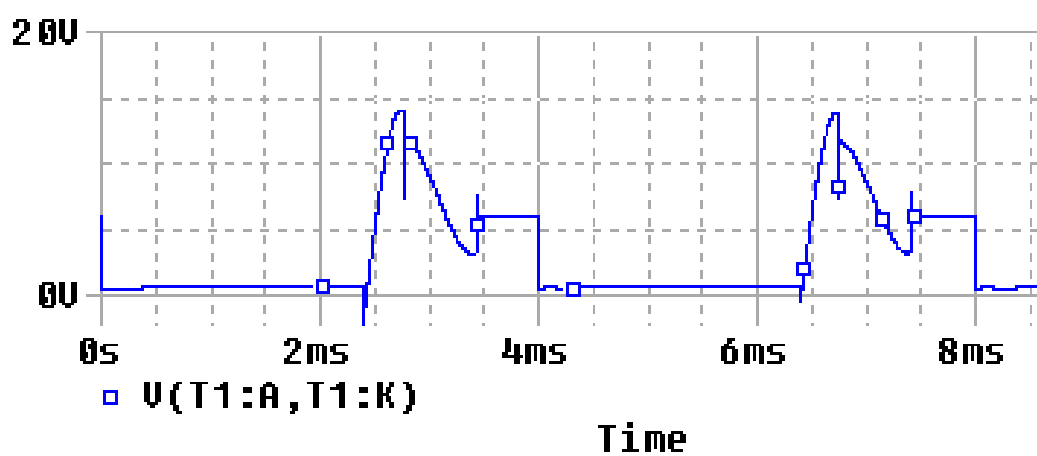


Fig.4.40 Curva de Simulación del Voltaje V_{ak1} del

Tiristor Principal



Fig.4.41 Curva Experimental del Voltaje V_{ak2} del Tiristor de
Conmutación

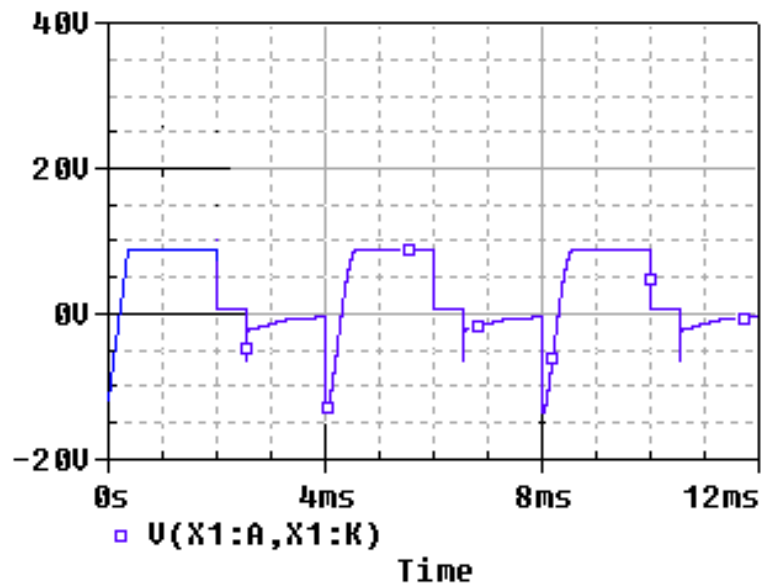


Fig.4.42 Curva de Simulación del Voltaje V_{ak2} del Tiristor
de Conmutación

CAPITULO 5

5. CONSTRUCCION DEL EQUIPO DIDACTICO

5.1. Materiales Utilizados.

3m Cables Número 14 A.W.G.

3m Cables Número 18 A.W.G.

3m Cables Número 20 A.W.G.

1 Cable de Poder

23 Conectores para banana

1 Adhesiva con circuito impreso

1 Caja metálica Construida en hierro negro, 1/16 “, Pintada

23 Terminales de Ojo

1 Placa impresa de 8cm x 9cm

1 Placa impresa de 5cm X 10cm

- 1 Placa impresa de 4cm x 6cm
- 1 Acrílico 40cm x 33cm
- 3 Breaker, un polo, 10 A, 4 A y 4 A
- 1 Porta Fusible
- 1 Fusible 3A , cubierta de vidrio
- 1 Switch 10A 125V

5.2. Lista de Elementos.

3	Resistencia de	1K Ω ,1/2W
1	Resistencia de	5.6K Ω ,1/2W
3	Resistencias de	100 Ω ,1/2W
3	Resistencias de	10K Ω ,1/2W
1	Resistencia de	5K Ω ,1/2W
4	Resistencias Shunt	0.1 Ω ,20W
1	Resistencia Tipo Espiral	10 Ω ,1kW
1	Potenciómetro de	10K Ω
1	Potenciómetro de	2.5K Ω
2	Tiristores 2N685	
8	Diodos D1N4148	

1	Diodo NTE5812	
4	Capacitor Cerámicos de	1nF
1	Capacitor Electrolítico de 16V	0.1 μ F
1	Capacitor para motor 120VAC	30 μ F
4	Transistores 2N2222A	
2	Transistores 2N3904	
3	Integrados MC1741CP	
1	Integrado C2533	
2	Reguladores LM7815, LM7915	
2	Transformadores de Pulso 1/1 LT2003A	
1	Contactador 1HP 24V	
2	Transformadores 30VAC 1A	
1	Autotransformador 2.1mH / 5.8mH	

5.3. Estimación del Costo del Proyecto

Cantidad	Descripción	P. U. (\$)
3	Resistencias de 1K Ω ,1/2W	0.10
1	Resistencia de 5.6K Ω ,1/2W	0.10
3	Resistencias de 100 Ω ,1/2W	0.10

Cantidad	Descripción	P. U. (\$)
3	Resistencias de 10K Ω ,1/2W	0.10
1	Resistencias de 5K Ω ,1/2W	0.10
4	Resistencias Shunt 0.1 Ω ,20W	0.50
1	Resistencia Espiral 10 Ω ,1kW	0.25
1	Potenciómetro de 10K Ω	0.50
1	Potenciómetro de 2.5K Ω	0.50
2	Tiristores 2N685	3.50
8	Diodos D1N4148	0.10
1	Diodo Industrial NTE5812	0.50
4	Capacitores Cerámicos 1nF	0.10
1	Capacitor Electrolítico de 16V, 0.1 μ F	0.20
1	Capacitor para motor 120VAC, 30 μ F	10.00
4	Transistores 2N2222A	0.20
2	Transistores 2N3904	0.20
3	Integrados MC1741CP	0.40
1	Integrado C2533	0.40
2	Reguladores LM7815, LM7915	0.80
2	Transformadores De Pulso 1/1 LT2003A	3.20
1	Porta Fusible	0.50
1	Contactador 1HP 24V	3.00

Cantidad	Descripción	P. U. (\$)
2	Transformadores 30VAC, 1 A	13.0
1	Switch 10A 125V	0.80
1	Auto transformador 2.1mH / 5.8mH	1.00
3m.	Cables Número 14, 18 Y 20	0.15
1	Cable de Poder	1.00
23	Conectores para banana	0.10
1	Adhesiva con circuito impreso	23.0
1	Caja metálica Construida en Fe. negro, 1/16 ", Pintada	35.0
23	Terminales de Ojo	0.10
1	Placa impresa de 8cm x 9cm	5.00
1	Placa impresa de 5cm X 10cm	5.00
1	Placa impresa de 4cm x 6cm	4.00
1	Acrílico 40cm x 33cm	6.00
3	Breaker, un polo, 10 A, 4 A, y 4 A	1.50
1	Porta Fusible	0.50
1	Fusible	0.10
1	Switch 10A 125V	0.25
<hr/>		
Costo total del Proyecto		\$155.65

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Dentro del avance y desarrollo que ha tomado la electrónica a través de los últimos años ha hecho posible que el estudio, tanto del funcionamiento de cada uno de los dispositivos electrónicos como la planificación y elaboración del diseño complejo de una estructura electrónica de control sea más maniobrable, confiable y eficiente logrando aprovechar el tiempo de diseño y montaje de los sistemas de control electrónicos de una manera didáctica y funcional, contribuyendo además con una herramienta poderosa que agiliza el trabajo y comprensión de todo diseño que sea aplicable a cualquier tipo de proceso de control industrial.
2. El PWM (Pulse with modulation) o modulación por ancho de pulso es una técnica de control muy utilizada hoy en día en todo lo que comprende los sistemas de alimentación conmutadas dentro de ellos se encuentran los sistemas de comunicación, sistemas

inteligentes de iluminación y mas comúnmente en el tema tratado en el desarrollo de este proyecto de grado que comprende el control de velocidad de los motores DC. Esta técnica se basa en una señal dada como referencia, en nuestro caso una señal triangular, modular una segunda señal, en nuestro caso será esta vez una señal de voltaje variable, para tener una señal cuadrada de anchura de pulso que varía en función de la comparación de las dos señales de referencia.

3. Los troceadores es una etapa importante dentro de lo que conforman los sistemas de alimentación controlados por conmutación de tiristores. En nuestro trabajo hemos puesto énfasis en detallar el diseño, construcción, montaje, funcionamiento y aplicabilidad de los troceadores en el control de motores DC así como queda la idea de lo que puede ser posible el uso de de los diferentes tipos de convertidores DC- DC en la aplicación de los procesos de control en una industria.

4. Se recomienda optimizar los programas de estudio de ingeniería, así como pensar en la actualización y/o adquisición de nuevos equipos de medición y pruebas de los diferentes laboratorios.

5. Sería importante que la Universidad gestione masivamente proyectos de diseño y aplicaciones de ingeniería en la empresa privada, haciendo participar activamente a los alumnos con el fin de dar la oportunidad de que el estudiante ponga en práctica sus conocimiento y habilidades logrando como objetivo que los futuros ingenieros conozcan la realidad de lo que es un trabajo profesional en el campo industrial.

BIBLIOGRAFÍA

1. S.B. Dewan, G.R. Slemon, A. Straughen, Power Semiconductor Driver Editorial. John Wiley and Sons- 1984
2. Ashfaq Ahmed, Power Electronics for Technology, Editorial Prentice Hall 1999
3. Samir K. Datta, Power Electronics and Controls Editorial. Prentice Hall 1985
4. R. F. Coughlin- F. F. Driscoll, Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales. Cuarta Edición, Editorial Prentice Hall 1993
5. Stephen J. Chapman, Máquinas Eléctricas, Segunda Edición , Editorial Mc Graw Hill Interamericana, S.A.
6. www.uv.es/~emaset/iep00/descargas/IEP1-0102.PDF.
7. www.redeya.com/electronica/tutoriales/pdf/gobtiris.pdf
8. <http://grupos.unican.es/dyvci/ruizrg/postscript/LibroEcaBasica/Tema12.pdf>
9. www.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/lamaqdc.pdf
10. www.elo.utfsm.cl/~elo281/capitulo5.pdf
11. <http://alek.pucp.edu.pe/cursos/pregrado/iee215/motordc/descdc.htm>

12. <http://alek.pucp.edu.pe/cursos/pregrado/iee215/motordc/clasficdc.htm>

NOMENCLATURA

C Capacitor

L Inductor

TX Transformador

Q Transistor

R_L Resistencia externa de carga

T_1 Tiristor Principal

T_2 Tiristor de Conmutación

D Diodo

E_a Voltaje Contraelectromotriz.

V_{cc} Voltaje Directo de alimentación

V_i Voltaje de alimentación

f_i Frecuencia de entrada

V_0 Voltaje de salida

f_0 Frecuencia de salida

V_{ak} Voltaje ánodo cátodo del Tiristor

K Constante del motor

ϕ Flujo de campo

V_a Voltaje de Armadura

I_a Corriente de Armadura

R_a Resistencia de Armadura

V_f Voltaje de Campo

I_f Corriente de Campo

R_f Resistencia de campo

t_p Periodo de conducción del Tiristor Principal.

t_0 Periodo de repetición

t_p / t_0 Ciclo de Trabajo

P_0 Potencia de salida

I_0 Corriente de carga

$V_{0 \text{ med}}$ Voltaje promedio de salida

T_d Par motor