



REPUBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINEROMETALURGICO
"Dr. ANTONIO NUÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECHANICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

Trabajo de Diploma
En Opción al Título de
Ingeniero Eléctrico

Título: Convertidor estático para el control
de la Potencia Reactiva en generadores
asíncronos

Autor: Ernesto Alberto Sera Castillo

Tutor: M.Sc Wilber Acuña Rodríguez

Moa, 2010
Año 52 de la Revolución



DECLARACIÓN DE AUTOR.

Yo: Ernesto Alberto Sera Castillo, autor del trabajo de diploma “Convertidor estático para el control de la Potencia Reactiva en generadores asincrónicos.” certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero- Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo para todos los fines educativos e investigativos que estime necesarios.



PENSAMIENTO.

“Cuando el hombre ya no encuentra placer en su trabajo y trabaja solo para alcanzar sus placeres lo antes posible, entonces será casualidad que no se convierta en delincuente.”

Theodor Mommseu



AGRADECIMIENTOS.

Quisiera dar gracias por todo el apoyo que me han brindado, a una serie de personas que mostraron su interés para conmigo, antes y durante la realización de este trabajo, a todos ellos de corazón, les estaré eternamente agradecido.

A mi tutor el M.Sc Wilber Acuña Rodríguez, quien supo darme en todo momento la atención que merecía.

A mi madre y mi padre, mi familia; los que estuvieron siempre en cuerpo, alma y pensamiento brindándome el sostén moral y espiritual que requería.

A mis amigos inseparables: Reinier Gonzáles Foster, William Casamayor Bravo.

A mis compañeros de cuarto, Socorro, Abdel, Lázaro, Paret, y todos los demás que estuvieron siempre ahí para apoyarme.

Y a mi querido hijo, Anthony Sera Cardoza, que me brindó las fuerzas para seguir cuando no las encontraba.



DEDICATORIA.

Les dedico este trabajo a todas aquellas personas que supieron estar ahí para apoyarme incondicionalmente, en las buenas y en las malas. Les estaré eternamente agradecido. A mi madre; por su perseverancia, y muy en especial a mi querido hijo sin el cual no hubiese tenido fuerzas para continuar.

Para tí, mi niño.



RESUMEN

La presente investigación: Convertidor estático para regular la potencia reactiva en generadores asincrónicos, refiere aspectos relacionados con la existencia de métodos electrónicos que permiten compensar el reactivo de condensadores fijos instalados en la red, garantizando en todo momento que el funcionamiento de los aerogeneradores se encuentre en régimen autónomo. El uso de circuitos con elementos semiconductores, que posibilitan el control de la energía eléctrica alterna, garantizarán la excitación necesaria, en formas de ondas, de esos capacitores.

En el capítulo 1 se establece el contexto teórico de la investigación, donde se hace referencia a las generalidades principales de los dispositivos a utilizar. Se plantea todo lo referente a los diferentes tipos y métodos de regulación de la corriente alterna, así como la selección del más adecuado.

El capítulo 2 plantea el diseño y cálculo de cada uno de los componentes del circuito de mando y de fuerza, también muestra las formas de ondas obtenidas por la simulación general del convertidor.

Por último el capítulo 3 desarrolla la valoración, tanto técnica como económica; social y medio-ambiental de la propuesta, mostrando su factibilidad para nuestro sistema eléctrico nacional.



SUMMARY

The present investigation: Static converter to regulate the reactive power in asynchronous generators, it treats aspects related to the existence of electronic methods that allow compensate the reagent of installed fixed condensers in the network, guaranteeing that the operation of the wind generators at any time works as independent regime. The use of circuits with semiconducting elements, make possible the control of the alternating electrical energy, guaranteeing the necessary excitation of those capacitors in wave forms. It consists of three chapters.

In chapter one the theoretical context of the investigation it establishes, where reference to the main majorities of the used devices. It raises the entire referring one to the different types and methods from regulation of the alternating current, as well as the most suitable selection.

Chapter 2 raises the design and calculation of each components of the control and force circuit, also shows the waveform obtained by the general simulation of the converter.

Finally chapter 3 develops the valuation, Technical as much as economic; social and environmental of the proposal, showing its feasibility for our national electrical system.



Índice.

DECLARACIÓN DE AUTOR.....	I
PENSAMIENTO.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
DEDICATORIA.....	IV
RESUMEN.....	V
SUMMARY.....	VI
Índice.....	VII
INTRODUCCIÓN	1
Situación Problemática:.....	5
Problema:.....	5
Hipótesis:.....	5
Objetivo General:.....	5
Objetivo Específico:.....	5
Resultados esperados:.....	5
Capítulo 1: GENERALIDADES.....	7
1.1 Introducción a la regulación de corriente alterna.....	7
1.1.1 Características de los reguladores de corriente alterna.....	8
1.2 Convertidores estáticos reguladores de corriente alterna.....	9
1.3 Posibles convertidores a utilizar.....	11
1.3.1 Regulador de onda completa.....	11
1.3.2 Regulador de media onda.....	12
1.4 Selección del convertidor más adecuado.....	14
Capítulo 2: EL CONVERTIDOR.....	19
2.1 Diseño del convertidor de fuerza.....	19
2.2 Cálculo y selección de las componentes de fuerza.....	21
2.3 Diseño y cálculo del circuito de mando.....	24
2.3.1 Generación de la onda cuadrada por el LM 555.....	24
2.3.2 Detector de cruce por cero.....	27
2.2.3 Para el desfasador.....	29
2.2.4 Para el amplificador.....	30
Capítulo 3: ANALISIS DE RESULTADOS.....	33
3.1 Valoración técnica de la propuesta.....	33
3.2 Valoración económica.....	34
3.3 Valoración medio ambiental.....	37
3.4 Valoración Social.....	38
Conclusiones Generales.....	39
Recomendaciones.....	40
Bibliografía.....	41
Anexos.....	1



INTRODUCCIÓN

La producción de energía eléctrica a nivel mundial es sin dudas una de las tareas más importantes para la vida económica, política y social, ya que su influencia abarca prácticamente todas las actividades humanas. En la actualidad se están llevando a cabo proyectos que permitan la introducción de las fuentes renovables entre las cuales figuran la energía hidráulica, solar térmica, biomasa y eólica, entre otras. Ésta última, forma parte de una de las menos costosas y perjudiciales, por la implementación de equipos más baratos que reducen el volumen y emisiones de compuestos tóxicos, como son filtros de energía, banco de condensadores, reguladores de corriente alterna, generadores asincrónicos, entre muchos más. Éstos generadores asincrónicos constituyen una máquina de corriente alterna, en la cual la velocidad de rotación del rotor es menor que la del campo magnético del estator y depende de la carga, al igual que otras máquinas eléctricas, tiene la propiedad de ser reversible, es decir, puede funcionar tanto como motor que como generador. Son utilizados para suministrar energía adicional a una carga en un área remota que posee una línea de transmisión aislada. La máquina primaria que la mueve no necesita operar a velocidad sincrónica, sin embargo debe ser equipada con un control que le permita incrementar su velocidad en correspondencia con las cargas eléctricas conectadas a él.

Para su funcionamiento como generador es necesario que estén dadas algunas condiciones tales como:

➤ Se necesita hacer girar la máquina por encima de la velocidad sincrónica. Teóricamente, la velocidad en régimen generador, puede variar en un amplio margen ($n_s < n_r < \infty$), en realidad, velocidades grandes de rotación no son admisibles debido a las condiciones de resistencia mecánica. Físicamente explicado: el campo gira en sentido inverso respecto al régimen motor ocurriendo una inversión en el sentido de las corrientes del rotor respecto al régimen motor, como consecuencia varían los signos de la Fem. del rotor y de la componente activa de la corriente de éste, trayendo consigo que varíe el signo del momento rotacional, o sea, este último actúa en contra del sentido de rotación y será de frenaje.



A consecuencia de la rotación de la corriente del rotor casi 180° , también gira en sentido de las agujas del reloj la corriente del primario, debido a esto las componentes activas de la corriente y la potencia del primario varían de signo, significando esto que ahora la máquina ya no consume como en régimen motor, sino que entrega a la red corriente y potencia activa, o sea trabaja en régimen generador y convierte la energía mecánica consumida e por el eje en potencia eléctrica.

- Se necesita una fuente externa para crear el campo magnético.

Esta máquina en su funcionamiento como generador puede ser operada de las siguientes formas:

1. Generador de inducción (asincrónico) conectado a la línea.
2. Generador de inducción autónoma.

Detallando a gran escala estas formas de trabajo podremos decir que:

- ❖ Generador de inducción (asincrónico) conectado a la línea.

El generador trabaja en paralelo a la línea, consume de ésta una corriente (I_L) igual a la de magnetización (I_m), al tiempo que produce una corriente activa en fase con la tensión de línea (U_a), que es consumida por las cargas eléctricas conectadas. La red al tener una potencia infinita respecto al generador impone la frecuencia, en este caso solo se vela porque las tensiones sean iguales, éste actúa como un compensador de reactivo debido a que la creación de su campo magnético principal lo hace con el reactivo circulante en la línea, y puede asumir así potencia reactiva inductiva de la misma magnitud de la que puede entregar potencia reactiva capacitiva. Siendo ésta forma de trabajo rechazada puesto que necesitamos garantizar que el generador asincrónico, obtenga, sin necesidad de estar conectado al sistema eléctrico nacional, la corriente necesaria para su alimentación, viéndose desatendido de la influencia negativa de los armónicos producidos por su conexión.



❖ Generador de inducción autónoma.

Si el generador asincrónico trabaja alimentado a una red local aislada, es decir, de forma autónoma, que es como se desea en el trabajo de investigación, el reactivo necesario hay que proporcionarlo con condensadores, constituyendo su excitación, con la cual se regula la tensión, mediante la utilización de un circuito de mando, y de esta misma forma debe asegurar la velocidad constante o variable en función de la carga para mantener la frecuencia, conforme con la modulación sinusoidal del ancho de pulso a obtener.

Cuando a sus terminales se conecta un banco de condensadores con una capacidad tal que la corriente consumida por ellos (I_C), sea igual en magnitud pero desfasadas 180° respecto a la corriente de línea se logra anular la corriente de magnetización consumida de la red. Una explicación gráfica de lo anterior se puede ver en la (Figura 1.1) donde se muestra lo antes expuesto de forma vectorial.

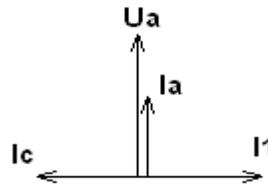


Figura 1.1 Diagrama Vectorial

Una vez establecido el sistema y la carga de los condensadores(por ejemplo: si la carga es puramente activa la potencia de los condensadores debe igualarse a la potencia reactiva de magnetización del generador, si ésta es ahora compleja (R-L) se necesita aumentar la potencia de estos para que cubra también la potencia activa de la carga, si por el contrario, la carga es (R-C) se necesitará entonces de una menor potencia de éstos) el mismo estará en condiciones de trabajar de forma autónoma y con autoexcitación de la red. En este caso, la máquina consume una corriente ($I_L=I_m$) y los condensadores una ($I_C=I_L$).



Como explicación se establece que la corriente (I_m) será consumida por la máquina para crear su campo magnético, como consecuencia de la generación surgirá una corriente activa (I_a) y una reactiva, de la primera se alimentarán las cargas eléctricas y de la segunda, los condensadores, que luego aportarán una corriente ($I_C = I_m$), cerrándose de ésta manera el ciclo de funcionamiento autónomo. Por ende, el proceso de autoexcitación de la máquina se produce por la carga del condensador al valor de la Fem remanente producto del flujo remanente propio del hierro de la máquina y luego la respectiva descarga en la bobina del estator.

Para mantener la tensión constante con las variaciones de la impedancia de carga y con éste el ángulo entre la tensión y corriente, se hace necesario una estricta regulación en tiempo real de la potencia reactiva del banco de condensadores de excitación, para que sea posible el ajuste permanente de la capacidad con respecto a la variación del ángulo de la impedancia para aportar en todo momento solo potencia activa y el reactivo-inductivo que requiere la máquina para crear su campo magnético principal se anule con el reactivo-capacitivo prominente del banco de capacitores fijo y este debe ser en correspondencia a las fluctuaciones de la carga.



Situación Problemática:

Actualmente los generadores asincrónicos utilizados en aerogeneradores trabajan conectados a la red de donde toman la potencia reactiva necesaria para su excitación, en régimen aislados se excitan desde banco de condensadores fijos, que se varían en pasos abruptos para diferentes valor de la carga.

Problema:

Falta de excitación automática en generadores asincrónicos en régimen aislado.

Hipótesis:

Si se tuviera un esquema electrónico capaz de controlar la potencia reactiva desde un banco de condensadores fijo, se pudiera generar energía en régimen autónomo para un generador asincrónico regulado en función de las variaciones instantáneas de la carga.

Objetivo General:

Diseñar y simular un convertidor estático capaz de regular la potencia reactiva en un generador asincrónico en régimen aislado.

Objetivo Específico:

- Diseñar el convertidor de fuerza.
- Diseñar, calcular el circuito de mando y seleccionar sus componentes.
- Simular el esquema general del convertidor.

Resultados esperados:

- Demostrar que se puede realizar la compensación del reactivo.
- Obtener por medio de la simulación los resultados en formas de ondas.



CAPITULO 1



Capítulo 1: GENERALIDADES.

1.1 Introducción a la regulación de corriente alterna.

La utilización de energía eléctrica en todas las esferas de la vida moderna, ha permitido mejorar la calidad de la vida y aumentar el desarrollo de la civilización. La necesidad en la utilización de la energía eléctrica se debe a una serie de ventajas de la misma como son:

- Obtención a partir de fuentes naturales diversas.
- Facilidad de transformación y utilización en cualquier momento.
- Fácil conversión en otros tipos de energía.
- Posibilidad de "control" de esta conversión.

Se conoce que la energía eléctrica se produce y distribuye en forma alterna trifásica a una frecuencia fija (60 ó 50 Hz), pero el desarrollo de los distintos procesos productivos y equipos electrodomésticos exigen utilizar la energía eléctrica con parámetros diferentes de voltajes y frecuencia a los de la red, de ahí que sea necesario transformar la energía en los parámetros requeridos por el consumidor y a la vez ejercer control sobre este proceso de conversión como exigen los diferentes procesos productivos.

El regulador de corriente alterna permite variar los valores de voltaje y corriente a la salida manteniendo la frecuencia constante; dentro de la gran variedad de estos se puede mencionar:

1. Regulador de corriente alterna monofásico:
 - De media onda.
 - De onda completa.
 - De control parcial, también llamado regulador con tomas intermedias.
 - De tipo puente.
2. Regulador de corriente alterna trifásico
 - En estrella.
 - En delta.



Para el caso trifásico siempre consiste en la aplicación de convertidores monofásicos por cada fase. Cada uno de estos reguladores tienen una regulación diferente, pero los métodos de regulación son los mismos.

1.1.1 Características de los reguladores de corriente alterna.

Los reguladores de corriente alterna están formados por dos llaves electrónicas estáticas conectadas en anti paralelo. Las aplicaciones más comunes de los controladores de voltaje de CA son: calefacción industrial, de derivaciones de transformadores cambio con carga, control de luces, control de la velocidad de motores de inducción polifásicos y control de los electros magnetos de CA.

La regulación de voltaje se logra:

a) A través del principio de abrir y cerrar; si un tiristor conmutador se conecta entre la alimentación de CA y la carga, es posible controlar el flujo de potencia variando el valor (V_{rms}) del voltaje de CA aplicado a la carga, este tipo de circuito se conoce como un controlador de voltaje de CA. En el control de abrir y cerrar, los tiristores conectan la carga a la fuente de CA durante unos cuantos ciclos de voltaje de entrada y a continuación la desconectan por unos cuantos ciclos más.

b) Manipulando una parte de la onda sinusoidal mediante el cierre y apertura de los interruptores estáticos, que a su vez son dominados por circuitos de control, o sea controlando el ángulo de disparo, a esta acción se le denomina: Corrimiento del ángulo de fase o Principio de control de fase.



1.2 Convertidores estáticos reguladores de corriente alterna

Un salto de calidad se logró con el uso de convertidores estáticos mediante la utilización de válvulas de vacío y mercurio (Tiratrones e ignitrones). Esto elevó la eficiencia, disminuyó el peso de las instalaciones, pero no fue hasta la introducción de los semiconductores donde se logró una verdadera revolución en esta técnica y se logró:

- Disminución del peso y dimensiones de las instalaciones de 3 a 7 veces.
- Disminución de las pérdidas en conducción.
- Aumento de la eficiencia aproximadamente en un 90%.

Para convertir la energía eléctrica se utilizan inicialmente estaciones mecánicas y electromagnéticas. Aunque fue un avance, se presentaban grandes pérdidas en la transformación, los dispositivos tenían mucha inercia, el control era complicado y los equipos resultaban pesados y voluminosos.

Los reguladores estáticos de tensión de CA se ocupan de transformar valores de alterna en la entrada a valores de alterna en la salida pero variable, por lo general trabajarán a la frecuencia de la red y pueden ser mono o trifásicos.

[\(Ver Anexo 1\)](#)



A continuación detallaremos a gran escala sus expresiones más comunes y básicamente en qué consiste cada una de estas operaciones.

La expresión del voltaje de salida del regulador se obtiene a través del trabajo con operaciones matemáticas, como matrices y desarrollos en series de Fourier, esta es:

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_e t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos(\omega + \omega_e)t + \delta + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos(\omega - \omega_e)t - \delta \quad (1.1)$$

Donde:

k : Constante correspondiente al valor que la frecuencia de trabajo superará a la de la red.

δ : Ángulo de retraso de la tensión respecto a la corriente.

V_m : Valor del voltaje medio.

Como se observa, esta ecuación tiene componentes cuya pulsación de salida es igual a la de entrada, el primer término de la ecuación siempre tiene una frecuencia ω_e independientemente de la frecuencia de conmutación del interruptor y por tanto da una onda sinusoidal de frecuencia estimada.

Luego para obtener a la salida una frecuencia igual a la frecuencia de entrada hay que acudir al tercer término (ya que el segundo nunca cumplirá que $\omega + \omega_e = \omega_e$ puesto que siempre es distinto de cero), donde debe cumplirse que $\omega - \omega_e = \omega_e$ por tanto $\omega = 2\omega_e$, de aquí se deduce que el período de conmutación que se escoge generalmente sea:

$$\frac{2\pi}{f} = 2 \frac{2\pi}{F} \quad (1.2)$$

O sea:

$$T = \frac{T_e}{2} \quad (1.3)$$

Donde:

T_e : Período de conmutación



De esta expresión se deduce que el interruptor debe abrirse y cerrarse dos veces por ciclo, una por cada semiciclo. Esta condición en el regulador se logra disparando un tiristor en semiciclo positivo y el otro en el semiciclo negativo, con un ángulo de desfasaje α , pasando posteriormente ambos al estado de bloqueo de forma natural cuando la intensidad de la carga se invierte (paso por cero).

1.3 Posibles convertidores a utilizar

1.3.1 Regulador de onda completa

En la (Figura 1.2) podemos analizar cómo se obtiene la regulación de la onda de entrada a la salida de este tipo de regulador.

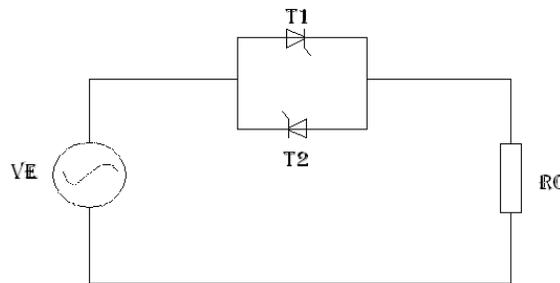


Figura 1.2 Regulador de onda completa

Inicialmente se dispara el T1 en presencia del semiciclo positivo con un ángulo de retardo α después que la onda cruza por cero (en este momento T2 se encuentra bloqueado por efecto de tensión inversa). Cuando la corriente de sostén en este semiciclo se hace menor que la corriente de sostén del T1, éste se apaga de forma natural.

Luego se enciende T2, con un ángulo de retardo α después que la onda realice el cruce por cero, para dar comienzo al semiciclo negativo.

A través de este procedimiento se obtendrá a la salida del regulador una onda sinusoidal con un valor medio menor que el valor medio de la onda de entrada, que está dado por la ecuación (1.1).

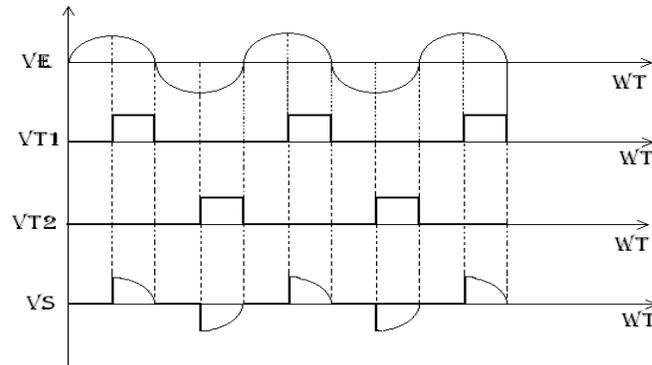


Figura 1.3 Oscilograma del regulador de un impulso por semiperíodo

Éste circuito tiene la propiedad de controlar ambos semiciclos y por ésta razón es llamado regulador de onda completa y su forma de onda está representada en la (Figura 1.3).

De la forma descrita anteriormente, se logra mediante estos dispositivos, variar los valores medios y eficaces de las ondas sinusoidales. Esta propiedad es muy utilizada en diferentes aplicaciones que tienen una alta inercia mecánica y una alta constante de tiempo térmica (por ejemplo, en la calefacción industrial y en el control de velocidad).

1.3.2 Regulador de media onda

En ocasiones es posible realizar las regulaciones conectando un tiristor y un diodo en anti paralelo (Figura 1.4), controlando un semiciclo y dejando intacto al otro. El flujo de potencia hacia la carga queda controlado retrasando el ángulo de disparo del tiristor T_1 . Debido a la presencia del diodo D_1 , el rango de control está limitado y el voltaje (V_{rms}) efectivo de salida solo puede variar entre 70.7 y 100%.



El voltaje de salida y la corriente de entrada son asimétricos y contienen una componente de CD. Si hay un transformador de entrada, puede ocurrir un problema de saturación.

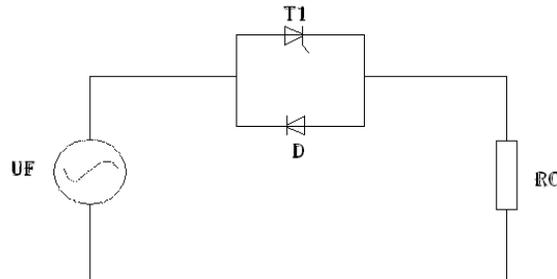


Figura 1.4.Regulador de media onda

En este caso la regulación se realizará sobre un semiciclo de la onda de entrada, por este motivo, el circuito es conocido como regulador de media onda o como *controlador unidireccional*, dado que el flujo de potencia está controlado durante el semiciclo del voltaje de entrada.

A la salida de éste se obtendrá una asimétrica, en el cual el valor es distinto de cero observándose en la (Figura 1.5).

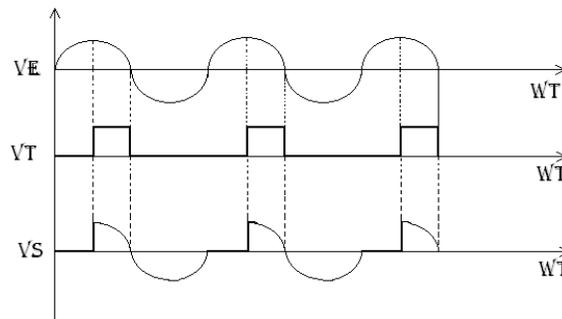


Figura 1.5.Forma de onda del regulador de media onda



Para obtener la expresión de la tensión media para el regulador de media onda se sigue una metodología igual que en el caso de la ecuación (1.1) y se obtiene:

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_e t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos(\omega + \omega_e)t + \delta + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{\cos \delta} \quad (1.4)$$

Como apreciamos en esta expresión solo varió el tercer término con respecto a la ecuación (1.1), esto se debe a que para obtener el valor medio se iguala $\omega = \omega_e$.

1.4 Selección del convertidor más adecuado

Otra forma existente de variar el valor medio de las ondas sinusoidales es haciendo $\omega \neq \omega_e$ en este caso tenemos la expresión (1.1) en la que el primer término es el que da la pulsación ω_e .

Por lo antes expuesto se han logrado dos variantes de regulación:

1. Regulación por ciclos completos: En este caso ω es mucho menor que ω_e , por tanto, $T \gg T_e$, o sea, la frecuencia de conmutación de los tiristores es mucho menor que la frecuencia de la onda de trabajo.



En este tipo de regulación representado en la (Figura 1.5), consiste en disparar ambos tiristores con ángulo $\alpha = 0$ durante el transcurso de varios ciclos, y posteriormente son bloqueados de manera natural al retirarle los pulsos por el gate durante el paso de otra cantidad determinada de ciclos.

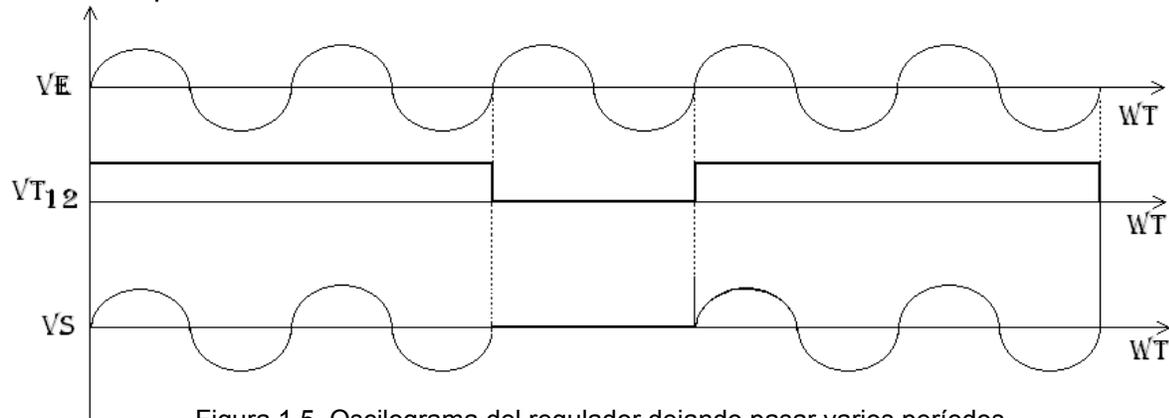


Figura 1.5. Oscilograma del regulador dejando pasar varios períodos

La magnitud de los valores eficaces y medios estará determinada por la cantidad de ciclos que se bloqueen y los que se dejen pasar hacia la carga. Esta regulación tiene como inconveniente que la corriente en la carga debe tener valor cero durante el tiempo de bloqueo de los tiristores, dando lugar a un régimen intermitente de trabajo, por esta razón esta regulación es poco utilizada.

2. Regulación por control de impulsos múltiples: La regulación representada en la (Figura 1.6), se logra haciendo $\omega \gg \omega_e$ por lo que $T \ll T_e$ lo que significa que la frecuencia de conmutación de los tiristores es mucho mayor que la frecuencia de la onda de trabajo.

Determinando que cada tiristor será encendido y apagado varias veces en cada semiciclo de la onda de entrada. A la salida de este tipo de regulador se obtiene una onda formada por varios pulsos.

Hay que destacar que los valores medios y eficaces de ésta, estarán en dependencia con la cantidad de pulsos que conformarán la misma.

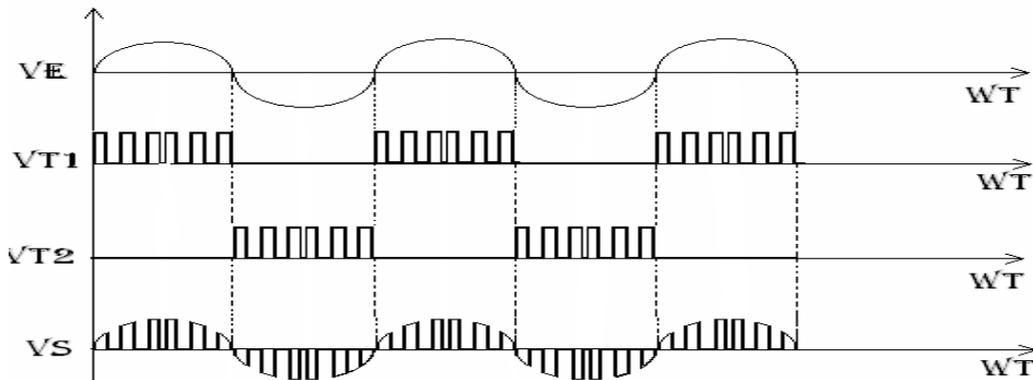


Figura 1.6. Oscilograma del regulador por control de impulsos múltiples

En este caso la variación de la salida se obtiene como sigue, si el voltaje de alimentación es:

$U_{el} = \sqrt{2}U_{el} \sin \omega t$ y se dejan pasar n ciclos y no se dejan pasar m ciclos entonces el voltaje en la carga efectivo será:

$$U_{Lrms} = \left[\frac{n}{2\pi(n+m)} \int_0^{2\pi} 2U_{el}^2 \sin^2 \omega t d\omega t \right]^{\frac{1}{2}} = U_{el} \sqrt{k} \text{ donde } k = \frac{n}{m+n} \quad (1.5)$$

Donde k : se denomina ciclo de trabajo o ciclo útil.

Este tipo de regulación también es poco utilizada en la práctica. Debido que para su funcionamiento son necesarios transistores de mucha rapidez, además el apagado de estos hay que realizarlo de manera forzada, teniéndose que emplear obligatoriamente, con este fin, circuitos adicionales de bloqueo, que carecen y complican considerablemente el sistema.

Sin embargo, como una forma de evitar tener que utilizar los circuitos adicionales de bloqueo, y teniendo en cuenta que ésta forma de regulación tiene la ventaja que los armónicos que se producen son de mayor orden y por lo tanto de más fácil eliminación, se pueden utilizar como llaves electrónicas, transistores.



Trabajo de Diploma

Además, es más efectivo para conmutar la corriente de carga de los condensadores ya que como la onda se conforma sinusoidal con la modulación se tendrá un mínimo de oscilaciones y por entender que es bastante sencillo su funcionamiento e implementación a pesar de conocer las dificultades técnicas que pueda presentar, como el fenómeno de los armónicos.



CAPITULO 2



Capítulo 2: EL CONVERTIDOR.

2.1 Diseño del convertidor de fuerza

Este trabajo es solo un estudio que llega hasta la filosofía del diseño, en el cual solo se propone el esquema general; así como sus formas de cálculos fundamentales, que puede ser llevado a cabo en trabajos posteriores, en los cuales se pueda contar con los elementos necesarios para su puesta en marcha.

Para llevar a cabo la realización del mismo, contamos con el apoyo del software Multisim, herramienta esencial en la carrera de Ingeniería eléctrica y sin el cual no se hubiese podido llevar a cabo la simulación general del equipo.

La propuesta de lograr controlar la potencia reactiva a través del uso de convertidores estáticos, los cuales están compuestos por una serie de pasos que controlan y regulan la energía de la red, es algo novedoso en el sentido de la utilización de dispositivos electrónicos capaces de realizar estas operaciones con una mayor rapidez, seguridad y confianza (IGBT ,BJT, etc.). Además de tener la factibilidad de ser económicamente posible gracias a la integración de todos estos dispositivos en una sola unidad como los conformadores de onda, como el ICL 8038 y el XR-2206, que son generadores de señal triangular, sinusoidal y de onda cuadrada. Estos dispositivos y sistemas, consisten generalmente en transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía, ya sea mecánica, calorífica, o ella misma, pero con características diferentes.

En general existen dos tipos de convertidores: los electromecánicos y los electrónicos, estos últimos con algunas ventajas frente a los primeros, como son:

- Mayor flexibilidad y posibilidad de control superior.
- Mejor estabilidad y rapidez de respuesta.
- Vida útil más larga.

Entre sus desventajas podemos destacar algunas:

- Resultan más caros sus montajes en algunas aplicaciones.
- Menor capacidad de soportar condiciones eléctricas duras.



Todos los convertidores tienen estructuras similares, pues están compuestos por dispositivos de conmutación encargados de conectar y desconectar el sistema a accionar. En la (Figura 2.1) se muestra la estructura de un convertidor de potencia.

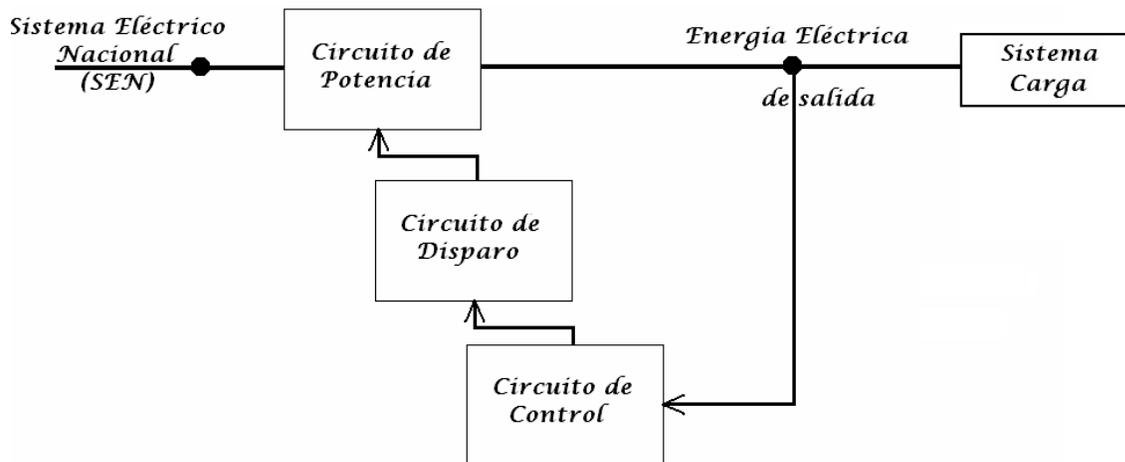


Figura 2.1. Diagrama en bloques de un convertidor electrónico de potencia

El circuito de potencia conformado por el convertidor, que en éste caso será el de onda completa. El segundo bloque, acciona al circuito de potencia cerrando u abriendo los dispositivos semiconductores. Por último y no menos importante, es el circuito de mando, que es el encargado de decidir de acuerdo con las necesidades de la carga, cuándo y cómo el circuito de disparo y bloqueo ha de accionar al de potencia.

En esta parte solo se desea controlar las válvulas reguladoras, por lo que se debe definir las características de trabajo de este considerando sus elementos de potencia y la carga, como son: tensión de salida, frecuencia de trabajo y contenido de trabajo, para luego, cumpliendo con estas exigencias, diseñar el circuito de mando.



2.2 Cálculo y selección de las componentes de fuerza

Para esta parte contamos con el esquema representado en la (Figura 2.2). El circuito de fuerza conformado por rectificadores de onda completa, que por ser el circuito trifásico, se utilizará uno por cada fase. Donde mediante la modulación por ancho de pulso obtendremos una tensión de salida que formada por una sucesión de ondas rectangulares de amplitud igual a la tensión continua de alimentación y duración variable según la ley de modulación escogida (el control de cebado/polarizado de T1 y T2). Cuando la carga presenta una constante de tiempo elevada, como es el caso de un motor, la ondulación de la corriente de carga es pequeña, y en consecuencia la corriente de carga sólo cambia de polaridad cada semiperíodo. Si, en estas condiciones, se controlan los dos transistores siguiendo un modelo sinusoidal, la tensión fundamental de salida y la corriente de carga se aproximan a una senoide.

[\(Ver anexo 2\)](#)

Para motores de inducción a jaula, y en el rango de las bajas y medias potencias (hasta aproximadamente 500 kW), se utiliza la tecnología de los Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBT) o Transistores de Efecto de Campo (MOSFET). Existe la ventaja adicional que el convertidor exhibe entonces una amplia banda de control. Los tiristores se emplean en el rango de 500 kW en adelante.

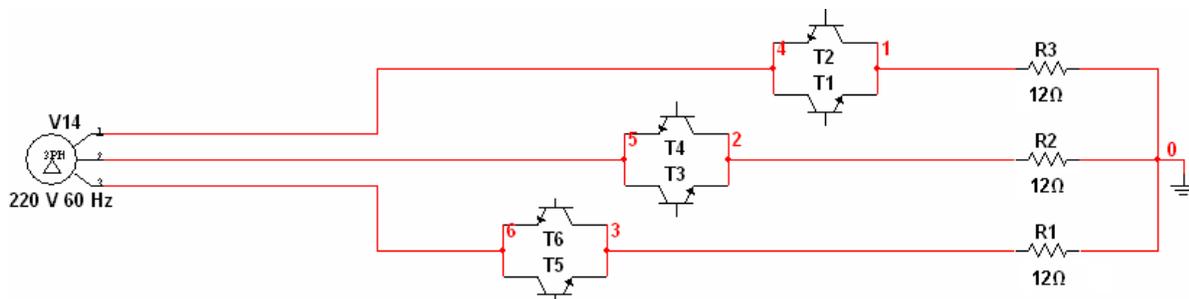


Figura 2.2 Esquema de fuerza del convertidor estático



Con la simulación del convertidor estático se logró obtener, mediante el circuito de mando y a la utilización de éste tipo de regulador, una forma de onda que es la que llega a la carga como se muestra en la (Figura 2.3).

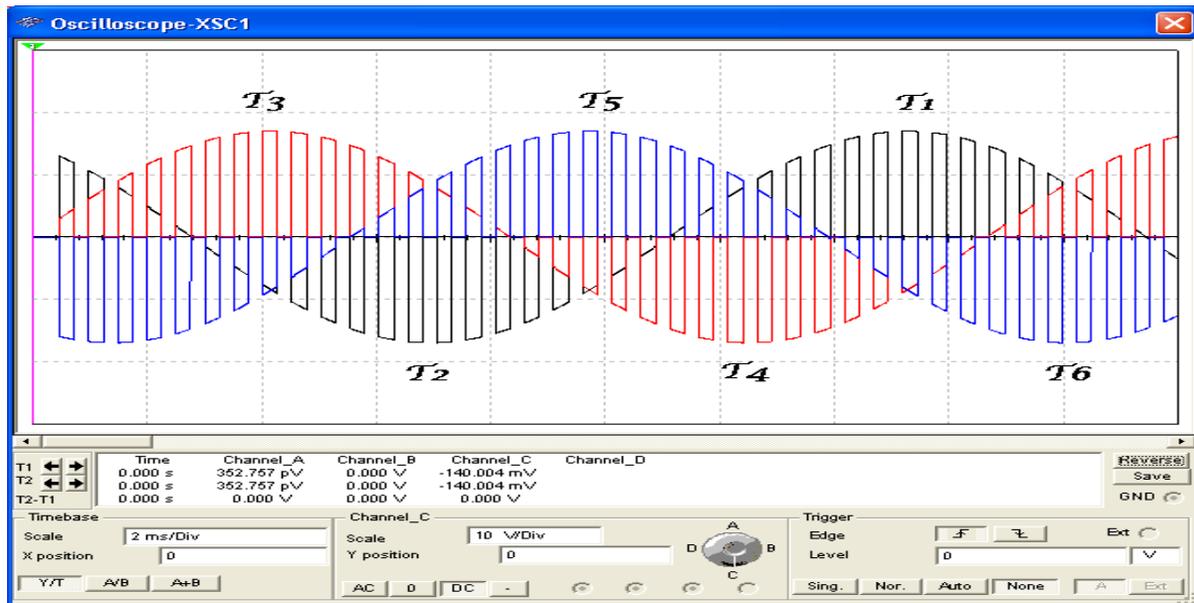


Figura 2.3. Forma de onda a la salida de los reguladores

Lo primero a determinar sería el tipo de transistor a utilizar, con el valor de la carga y el voltaje de la red podemos decir que:

$$I_{CT1} = I_{CT2} = \frac{V_{ef}}{R_c} \quad (2.1)$$

Donde:

V_{ef} : es el voltaje que suministra la red o el sistema (eficaz).

R_c : resistencia de la carga.

Si sustituimos y calculamos:

$$I_{CT1} = I_{CT2} = \frac{220V}{15\Omega} = 14.66A$$



Trabajo de Diploma

El transistor de potencia a seleccionar debe cumplir que el $V_{CE} \geq U_{ef}$, y que $F_T \geq F_{red}$. Por ende seleccionamos, por catálogos, un transistor que cumpla estos requisitos.

La tabla 1 nos muestra los datos del elemento seleccionado.

Código	Tipo	Ic(A)	V _{CE} (V)	P(W)	H _{FE}	F _T (MHz)	Encapsulado
MJ15024	NPN	16	250	250	15 - 60	4	TO-3

Tabla 1 Propiedades del transistor seleccionado.

La corriente de base para estos transistores será determinada por la ecuación:

$$I_{BT1} = I_{BT2} = \frac{I_c}{\beta} \quad (2.2)$$

Donde:

I_c: es la corriente de colector del transistor seleccionado.

β: es la ganancia del transistor de potencia seleccionado

$$I_{BT1} = I_{BT2} = \frac{16}{60} = 0.26A$$



2.3 Diseño y cálculo del circuito de mando.

En este trabajo se ha diseñado un circuito de mando con modulación sinusoidal por ancho de pulso, considerando como circuito de potencia un regulador de onda completa monofásico, ya que para el caso en cuestión, el trifásico, sería solamente la aplicación de éstos mismos por cada fase del circuito, compuestos por dos transistores como elementos de potencia o de de conmutación.

El principio de funcionamiento de éste circuito se basa en obtener una modulación sinusoidal por ancho de pulso comparando una onda sinusoidal de frecuencia igual a la deseada a la salida del regulador, con una onda cuadrada generada a partir de un oscilador LM 555, de frecuencia conocida.

Para hacer más fácil y tangible la comprensión del diseño en cuestión, se ha decidido separar cada una de las etapas del circuito, con sus cálculos específicos y formas de ondas obtenidas.

2.3.1 Generación de la onda cuadrada por el LM 555.

La (Figura 2.4) muestra una de las tantas configuraciones que tiene el circuito integrado 555 (The IC Time Machine), como también se le llamó, el cual surgió alrededor de los años 1971, por la corporación Signetics, con la denominación SE555/NE555, pasando a ser uno de los dispositivos de tiempo más utilizado por sus excelentes características.

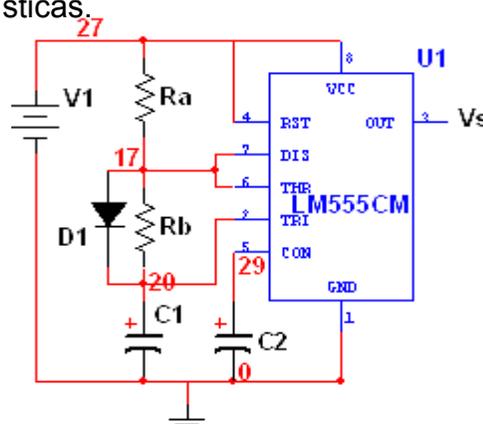


Figura 2.4 Generador de onda cuadrada LM 555.



La forma de onda que se obtiene a la salida de este circuito se muestra en la (Figura 2.5).

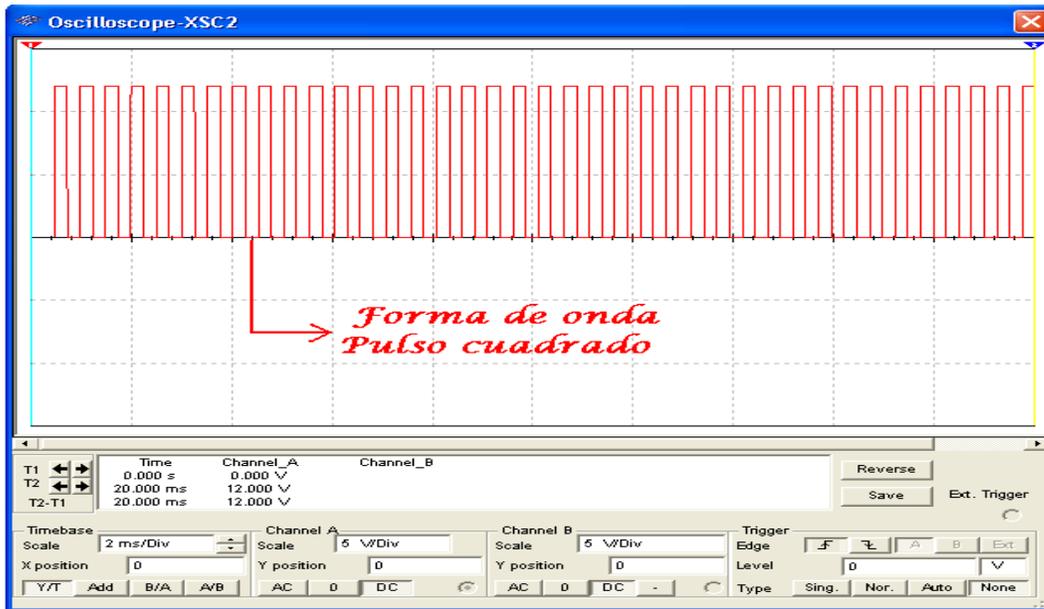


Figura 2.5 Forma de onda a la salida del generador de pulso LM 555

Lo más importante a conocer del mismo, son sus características de trabajo, como su frecuencia de trabajo y de salida. Para ello disponemos de la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{1}{T} \quad (2.3)$$

Donde:

T: es el período de conmutación.



Primeramente fijamos el valor de la frecuencia de trabajo del generador de onda así como los valores de las resistencias R_a y R_b para luego calcular el valor del capacitor C_1 .

De la fórmula 2.3, despejando T podemos decir:

$$T = \frac{1}{F_t} \quad (2.4)$$

Para luego plantear que:

$$T = 0.7 * C_1 * (R_a + R_b) \quad (2.5)$$

Para determinar el valor de C_1 en 2.3, tenemos que F_t (frecuencia de la onda cuadrada generada por el oscilador) debe ser mucho mayor que la frecuencia de la onda sinusoidal proporcionada por el sistema (F_s) la cual se calcula:

$$T_t = K * F_s \quad (2.6)$$

Donde:

K : Numero de veces que superará la frecuencia de la onda cuadrada a la sinusoidal. Para éste cálculo se tomará a $K=6$.

Sustituyendo a T en la ecuación 2.4 por su fórmula en 2.5, y despejando a C_1 , tendríamos:

$$C_1 = \frac{1}{0.7 * F_t * (R_a + R_b)} \quad (2.7)$$

Para obtener una onda simétrica cuadrada solo se igualan los valores de las resistencias $R_a=R_b=820\Omega$.



2.3.2 Detector de cruce por cero

La (Figura 2.6) muestra el circuito que será capaz de determinar el punto por donde la onda hará su cruce por cero, logrando transformar y desfasar una forma de onda sinusoidal a la entrada de la resistencia R12, para garantizar así la obtención de un voltaje a la salida del opto acoplador en un pulso cuadrado.

Los valores de los componentes de este circuito estarán determinados por las siguientes ecuaciones

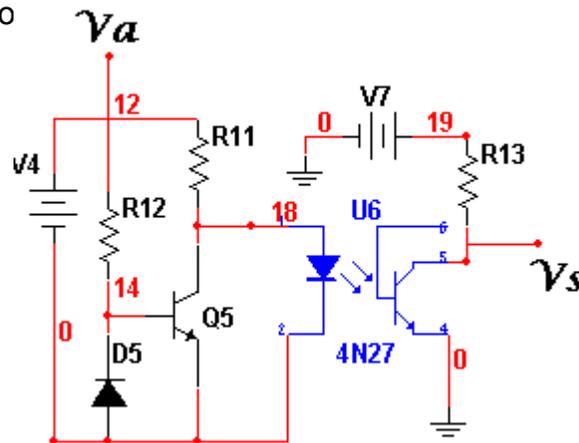


Figura 2.6. Amplificador operacional LM 311

El valor de la resistencia R12 estará determinado, por la expresión que parte de la ley de Ohm, y si fijamos el valor de la corriente que circula por esa resistencia en ese momento, quedaría:

$$U = I * R \tag{2.8}$$

De la ecuación 2.8 se despeja la resistencia:

$$\frac{U_a}{I_{R12}} = R_{12}$$

Donde:

U_a : es la tensión eficaz o de alimentación que provee el sistema.

I_{R12} : es el valor de la corriente que circula por la resistencia.



Trabajo de Diploma

El transistor a seleccionar estará dado por la corriente que soporta por su base que será la fijada.

Código	Tipo	I _c (mA)	V _{CE} (V)	P(W)	H _{FE}	F _T (MHz)
2N3819	NPN	200	25	0.4	30	3

Tabla 2 Características del transistor

Así mismo se puede determinar el valor de la resistencia R11, lo que se utilizaría el valor de la tensión aplicada a él y la corriente del colector seleccionado.

$$\frac{V_4}{I_{c(Q5)}} = R_{12} \quad (2.9)$$

En dependencia de la corriente que se obtenga a la salida de este transistor sera el opto acoplador a seleccionar.

El opto acoplador escogido es el OPB866T55 con los siguientes datos:

$$I_c = 3mA$$

$$I_F = 10mA$$

$$t_{off} = 5\mu S$$

$$U_N = 4.5V - 20V$$

$$V_{CE(SAT)} = 0.4V$$

$$t_{on} = 5\mu S$$

$$F_T = 100kHz$$

Con estos datos se formula la misma expresión para determinar y seleccionar el transistor R13. Partiendo de la ley de Ohm.

$$\frac{V_7}{I_{c(opto)}} = R_{12} \quad (2.10)$$

Los diodos utilizados son los mismos (IN47320) para cada uno de estos elementos pues contribuirán a la etapa de rectificación en el semiciclo de la onda negativa.

Este procedimiento es el mismo para los demás circuito, por esto el cálculo se simplifica y sus resultados en formas de onda se muestran en el anexo 3, 4 y 5.

[\(Ver anexo 3, 4 y 5\)](#)



2.2.3 Para el desfasador.

El circuito se muestra en la (Figura 2.7), en la cual el inversor NOT, es el que recibe el mayor peso pues es el encargado de garantizar que la onda de entrada, en forma de pulso cuadrado, rectifique en el semiciclo negativo y por ende desfasado a la salida. Las formas de ondas para los demás circuitos se refieren en el anexo 7 y 8. ([Ver anexo 7 y 8](#))

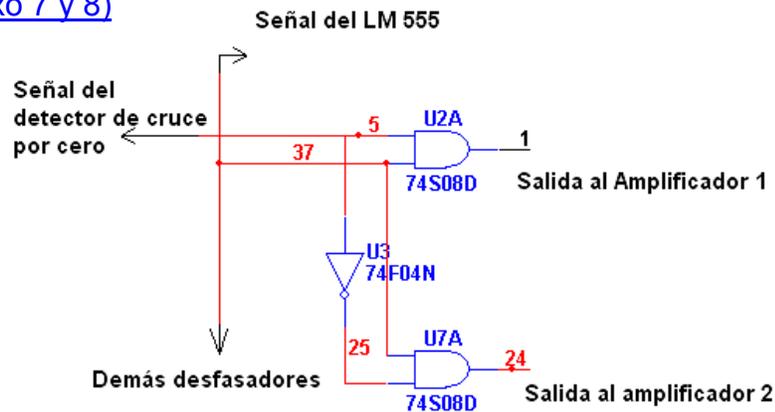


Figura 2.7. Esquema desfasador utilizando compuertas lógicas

Su forma de onda resultante es la mostrada en la (Figura 2.8)



Figura 2.8. Esquema desfasador utilizando compuertas lógicas



2.2.4 Para el amplificador

El circuito se muestra en la (Figura 2.9), para el diseño del circuito de mando se tiene que utilizar tres salidas de amplificación, dos para cada fases, por lo que el circuito es igual y con los mismos valores de resistencias, transistores y opto acopladores, simplificando el cálculo a éste solo esquema.

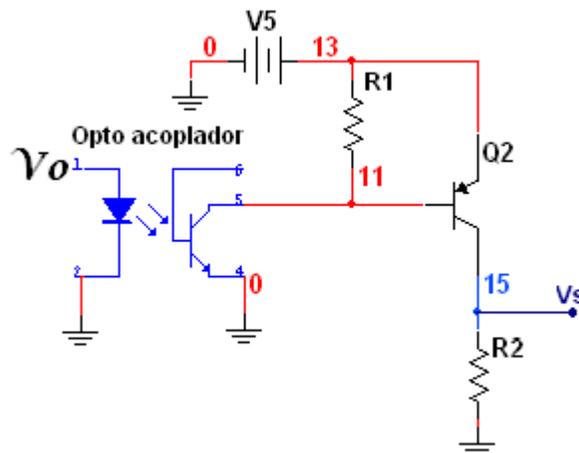


Figura 2.9. Amplificador operacional LM 311

La forma de onda para éste circuito se muestra en la (Figura 2.10).

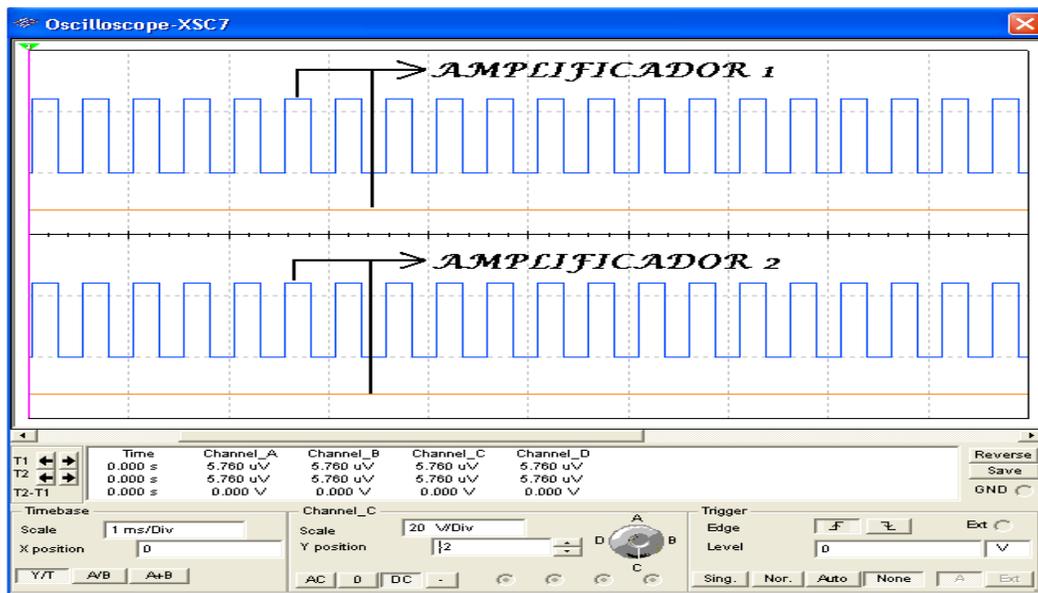


Figura 2.10. Forma de onda del circuito rectificador.



El transistor escogido es el MJ11032, puesto que se puede expresar que la corriente del colector de éste transistor debe ser mayor o igual que la corriente de base del transistor de potencia seleccionado. Según la ecuación 2.2:

$$I_{BT1} = I_{BT2} = \frac{I_c}{\beta} = 0.26A$$

Tenemos entonces que el transistor Q2 será:

$$I_{c_{MAX}} = 50 A$$

$$P_{Total} = 300W$$

$$U_{CE(MAX)} = 120V$$

$$F_T = 50MHz$$

$$T_e = 25^\circ C$$

$$h_{fe} = 1K - 18K$$

El cálculo de la resistencia R1 se realiza mediante:

$$R1 = \frac{V_{CC} - V_{CE(SAT)OPTO}}{I_{C(OPTO)}} \quad (2.11)$$

Donde:

$V_{CE(SAT)OPTO}$: es el voltaje colector-emisor de saturación del opto acoplador.

$I_{C(OPTO)}$: es la corriente del colector del transistor del opto acoplador.

Para la resistencia R2.

$$R2 = \frac{V_{CC}}{I_{CTQ2}}$$

Donde:

V_{CC} : es la tensión de alimentación de la fuente de corriente.

I_{CTQ2} : es la corriente de colector del transistor.



CAPITULO 3



Capítulo 3: ANALISIS DE RESULTADOS.

3.1 Valoración técnica de la propuesta.

El mercado actual revoluciona con el paso de los días, y la mejora de los componentes electrónicos asciende considerablemente. Existen nuevos y mejores equipos que posibilitarían la reducción del circuito, garantizando así, un resultado mucho más económico y factible. Tal es el caso de los equipos de alta integración de conformadores de onda, como el ICL 8038 y el XR-2206, que son generadores de señal triangular, sinusoidal y de onda cuadrada a la vez. Así mismo existen mandos por PWM integrados, como el TA 1060.

Podemos expresar que es viable la implementación en el circuito de mando de técnicas de modulación por ancho de pulso con elementos como son los transistores, diodos y capacitores, puesto que permite una mejor forma de onda a la salida del circuito de mando, aunque resulte desfavorable, pues la cantidad de elementos o componentes a utilizar sea mayor, es equiparable económicamente al tener el convertidor un funcionamiento más eficiente y una reducción considerable en la introducción de armónicos en la red, por dar a la salida una onda más sinusoidal, aspecto éste que no lograría el equipo a instalar (el convertidor) sin modulación.



3.2 Valoración económica

Todo trabajo técnico requiere de una valoración económica que sirva de aval para invertir o no en la ejecución del proyecto, lo que muchas veces requiere el montaje y puesta en marcha para su correcta valoración. Para llevar a cabo la realización del mismo, se tuvo en cuenta, en todo momento, cuán factible podría ser para la economía del país la aplicación del mismo.

Para ello se contó con una de las formas de cálculo económico para estimar los costos, la pre estimación. Este método permite realizar importantes análisis para determinar si es económicamente factible la puesta en marcha de la propuesta del convertidor estático.

Lo primero que se necesita realizar es una lista de todos los componentes que intervienen en el circuito en cuestión, siendo ésta el presupuesto básico. En la tabla 3 se muestra la relación de los elementos, la cantidad, costo unitario y costo total de todos los elementos del circuito de mando y de fuerza en MLC.



Elementos	Cantidad(u)	Costo unitario(\$)	Costo total(\$)
LM555	1	1.75	1.75
Diodo IN47320	4	0.15	0.6
Resistencia 500Ω	15	0.08	1.2
Resistencia 820Ω	2	0.08	0.16
Resistencia 120kΩ	12	0.10	1.2
Condensador 152 pF	1	0.20	0.20
Condensador 500 nF	1	0.30	0.30
Transistor MJ15024	6	1.5	9
Transistor 2N3819	3	1.01	3.03
Transistor MJ11032	6	1.32	7.92
Opto acoplador OPB866T55	9	2.05	18.45
Total de los componentes			43.81

Tabla 3 Relación de los componentes utilizados en el circuito

Tomando en cuenta que el trabajo será montado, pues el equipo ya fue diseñado, se requiere que su montaje sea llevado a cabo por un técnico medio en electrónica y un ingeniero para su ajuste, los cuales tienen como salario \$. 1.21/ hora y \$. 1.71/ hora respectivamente. Además, la realización de este trabajo no supera las 24 horas de trabajo, el costo en salario del equipo (Cs) será:

$$Cs = \$ 1.21/ h * 24 h + \$ 1.71/ h * 24 h$$

$$Cs = \$ 29.04 + \$ 41.04 = \$ 70.08$$



Trabajo de Diploma

Entonces el costo total del proyecto será el costo en salario (Cs) más el costo de los componentes (Cc):

$$C_p = C_s + C_c$$

$$C_p = \$70.08 + \$43.81$$

$$C_p = \$113.89$$

Lo que implica un costo total de 2733,36 CUP. Siendo ésta inversión muy factible y de fácil recuperación por parte de la entidad que realice la operación financiera.



3.3 Valoración medio ambiental

El uso de los transistores en circuitos integrados, como los convertidores estáticos para regulación de la potencia reactiva, control de velocidad en motores, calefacción industrial, control de luces, influyen positivamente en el medio que nos rodea, ya que no contribuyen al empobrecimiento del mismo por:

- ❖ Al tener un tiempo de conmutación en el orden de un microsegundo y la frecuencia de conmutación inferior, en el orden de los 16 kHz, por encima del rango audible, y al ser componentes magnéticos, no producen ruidos acústicos objetables.

- ❖ El circuito de fuerza y el de mando fueron diseñados con elementos que no producen ni desprenden materiales tóxicos o nocivos para el medio, ni para las personas.



3.4 Valoración Social

Del trabajo realizado se puede llegar a las siguientes conclusiones como impacto del mismo en nuestra sociedad:

- El estudio posibilita un paso de avance en cuanto a la compensación estática de reactivos, posibilitando mejorar en forma electrónica el factor de potencia en los equipos a utilizar, una gran disminución en las pérdidas de la energía, garantizando así una mayor fiabilidad a la economía nacional.

- Con la implementación de rectificadores de potencia que pueden operar en los cuatro cuadrantes de potencia alterna, se logra filtrar armónicas de la red en un número considerable, así como la reducción del tamaño de las instalaciones en un mínimo de 3 a 7 veces su tamaño original. Existe la ventaja adicional que el inversor exhibe entonces una amplia banda de control.

- No resulta factor de riesgo para el medio ambiente, pues no emite radiación, ni otros elementos contaminantes, como el ruido en grandes proporciones y es una técnica más ecológica pues no provoca efectos secundarios peligrosos para el personal del área de trabajo y consumidores.

Da pie al desarrollo de trabajo futuristas en este campo, propiciando modernizar un número de equipos de uso industrial, entre los que se puede citar, fuentes conmutadas, rectificadores, accionamientos electrónicos para máquinas eléctricas, filtros activos, compensadores estáticos de reactivos y sistemas de control de convertidores de potencia, posibilitando así alcanzar una eficiencia de hasta el 90% en los circuitos eléctricos de potencia.



Conclusiones Generales

Hemos podido observar, con la realización de este trabajo que:

- ❖ El modulador obtenido responde a la necesidad de regulación del diseño inicial.
- ❖ Se pudo comprobar que mediante la utilización de las técnicas de modulación por ancho de pulso, es posible alcanzar las formas de ondas pronosticadas.
- ❖ Los reguladores de corriente influyen grandemente en el proceso de filtrado de la energía eléctrica así como el mejoramiento de la calidad de la misma.
- ❖ El método escogido de modulación de varios impulsos por semiperíodo permite obtener un mínimo de oscilaciones, ya que la onda se conforma sinusoidal, y por entender que es bastante sencillo su funcionamiento e implementación a pesar de conocer las dificultades técnicas que pueda presentar.
- ❖ El convertidor seleccionado para esta aplicación, por estar compuesto por elementos de conmutación, facilita el diseño del circuito de mando y lograr una modulación sin dificultad con el apagado.
- ❖ Los condensadores serán fuentes de corriente reactiva de magnetización para el generador ($I_L = I_m$).



Recomendaciones

Para futuros trabajos se recomienda:

- ❖ Implementar de forma práctica el diseño del circuito realizado.
- ❖ Utilizar dispositivos rápidos y potentes, como los IGBT.
- ❖ Realizar pruebas de comportamiento del banco de condensadores ante una senoide modulada.
 - ❖ Comprobar la tasa de distribución de armónicos (THD) introducido por el convertidor a elaborar donde se coloque.
 - ❖ Encontrar el valor óptimo de frecuencia de hasta donde es posible regular la potencia de los condensadores sin afectar su funcionamiento



Bibliografía

1. ACUNA RODRIGUEZ, WILBER. Investigación sobre componentes de un aerogenerador utilizando maquinas asincrónicas. Trabajo de Maestría. Facultad de Electromecánica.2000.67p.
2. ACUNA RODRIGUEZ, WILBER. Estudio de las características eólicas de Moa para su utilización en la generación eléctrica alterna sinusoidal. Trabajo de Diploma. ISMM. 1995. 43p.
3. BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. *Electrónica: Teoría de Circuitos*. Cap. III. : 114 - 140.
4. CRUZ HERNADEZ, C., GARCIA VALDEZ, M., TOLEDO AMADOR,N.*Manual de circuitos integrados. Familia TTL*, Editorial ISPJAE. 1991. 164p.
5. CRESPO INFANTE, E. Compensación de potencia reactiva en presencia de convertidores estáticos Parte II. Ingeniería Energética, 1987, VIII (4): 327-331.
6. Dallas Semiconductors. Digital Resistor with OP AMP. DS1667
7. DIAZ CALVO, J. *Electrónica digital*. Editorial pueblo y educación; 1989.
8. *Electrónica industrial. Componentes, circuitos y sistemas de potencia*. 1^{ra} ed. 1991.
9. *Electrónica industrial. Componentes, circuitos y sistemas de potencia*. 2^{da} ed. 1991.
10. *Farnell Electronic components* 2^{da} ed. Internacional Editions.
11. GARCIA L, A., ROMULEROUX, D.. *Materiales y componentes electrónicos*. Editorial pueblo y educación. 1995.
12. GONZALEZ CASER, D. *Convertidor estático para mejoramiento del factor de potencia*. Wilber Acuña Rodríguez. Trabajo de diploma. ISMM, 2004; 60p.
13. LASTRES CAPOTE, A.; TORRES COLON, A. [en línea]. Cuba. el diodo semiconductor y sus aplicaciones. Centro de Investigaciones en Microelectrónica, Facultad de Ingeniería Eléctrica ISPJAE. [consultado: 2010 -01-26]. Disponible en: [Http://www.monografias.com](http://www.monografias.com).



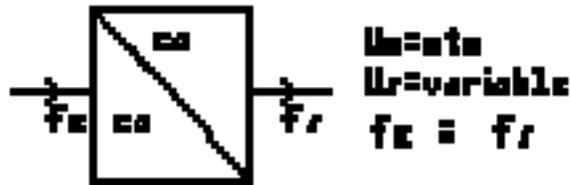
14. LOPEZ SANTOS, R. *Propuesta de montaje y diseño de la automatización de un convertidor estático para el control de flujo de un equipo de muestreo de gases y polvos contaminantes*. Wilber Acuña Rodríguez; Liban Montes de Oca González. Trabajo de diploma. ISMM, 2004; 60p.
15. L. Voldek; *Máquinas Eléctricas*. Tomo II. La Habana: Editorial- Pueblo y Educacion, 1984.
16. MOHAN, N.; UNDERLAND, T. ; ROBBINS, W. *Power Electronics: converters, Applications and Design*. 2^{da} ed. :John Wiley and Sons, Inc. 1995.
17. RASHID, M. H. *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 1^{ra} ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A: New York; s.a. 702p.
18. RASHID, M. H. *Electrónica de potencia: Circuitos, dispositivos y aplicaciones*. 2^{da} ed. Prentice Hall Hispanoamericana S.A: New York; s.a. 702p.
19. SILVA MEDINA, J.R. *Diseño y fabricación de puestos de trabajo para laboratorios reales de Electrónica de Potencia I y II*. Wilber Acuña Rodríguez. Trabajo de diploma. ISMM. 2004; 60p.
20. TAMAYO DOMINGUEZ, Y. *Estudio del comportamiento funcional del convertidor electrónico de potencia para corte por plasma en el combinado Mecánico del Níquel*. Wilber Acuña Rodríguez; Manuel Matos Elías; Eulier Fernández Marisma. Trabajo de diploma. ISMM, 2006; 110p.
21. TORRES GONZALES, M. *Diseño de un circuito de mando para inversores trifásicos*. Trabajo de diploma, 2001. 85p.



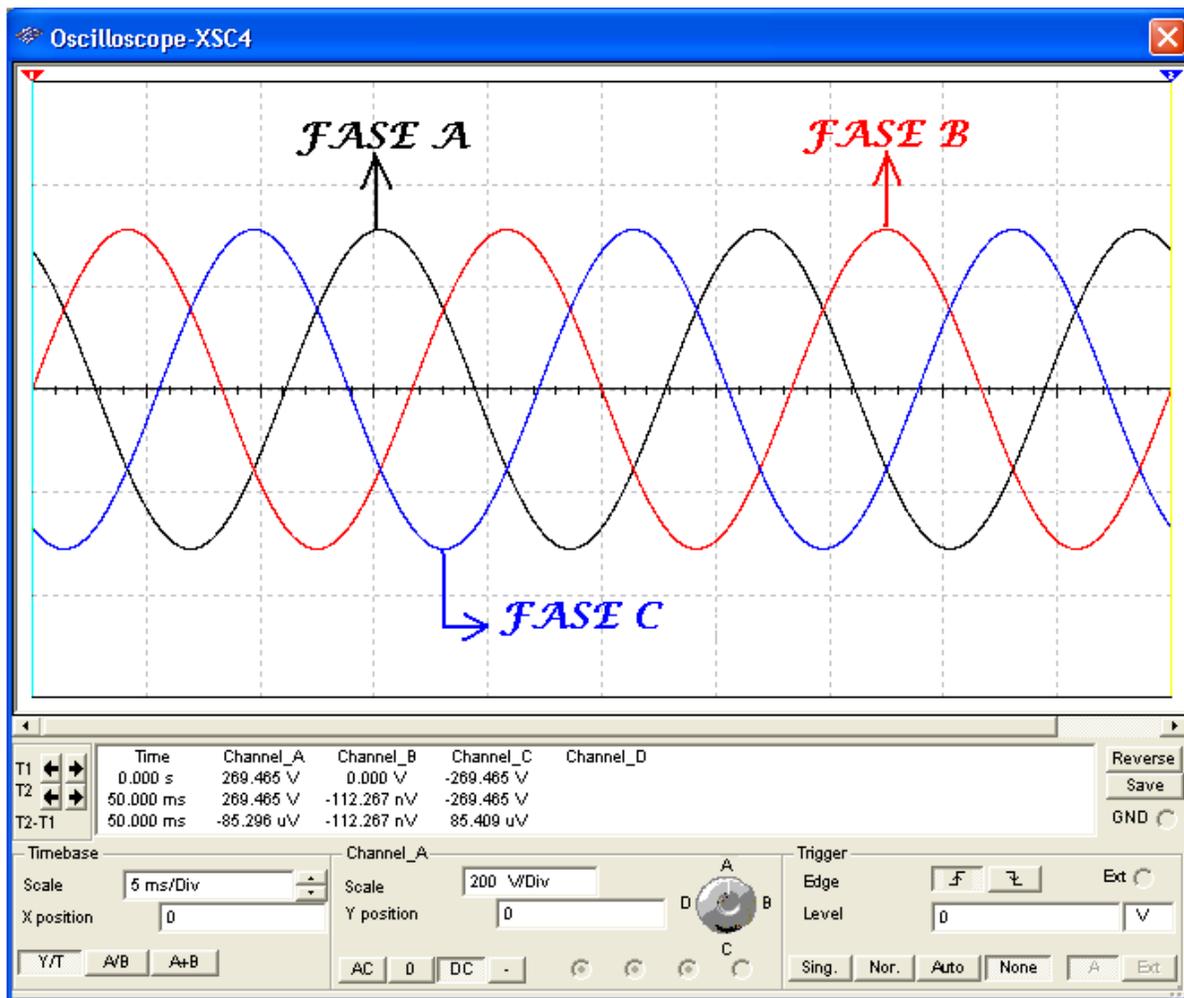
Anexos

Anexo 1: Diagrama de bloque de los reguladores estáticos de tensión de CA.

[\(Volver\)](#)



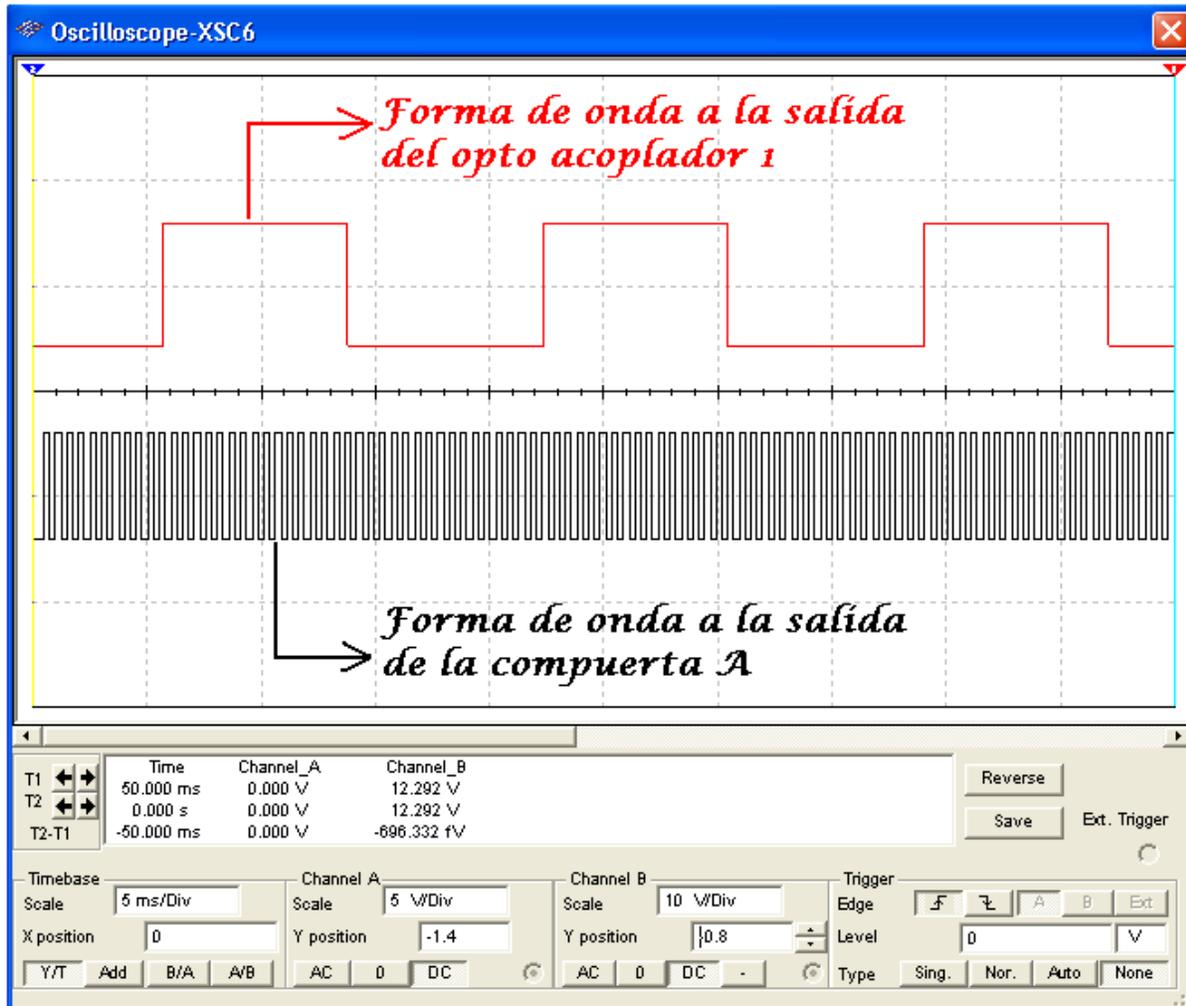
Anexo 2: Forma de onda suministrada por la red. [\(Volver\)](#)





Trabajo de Diploma

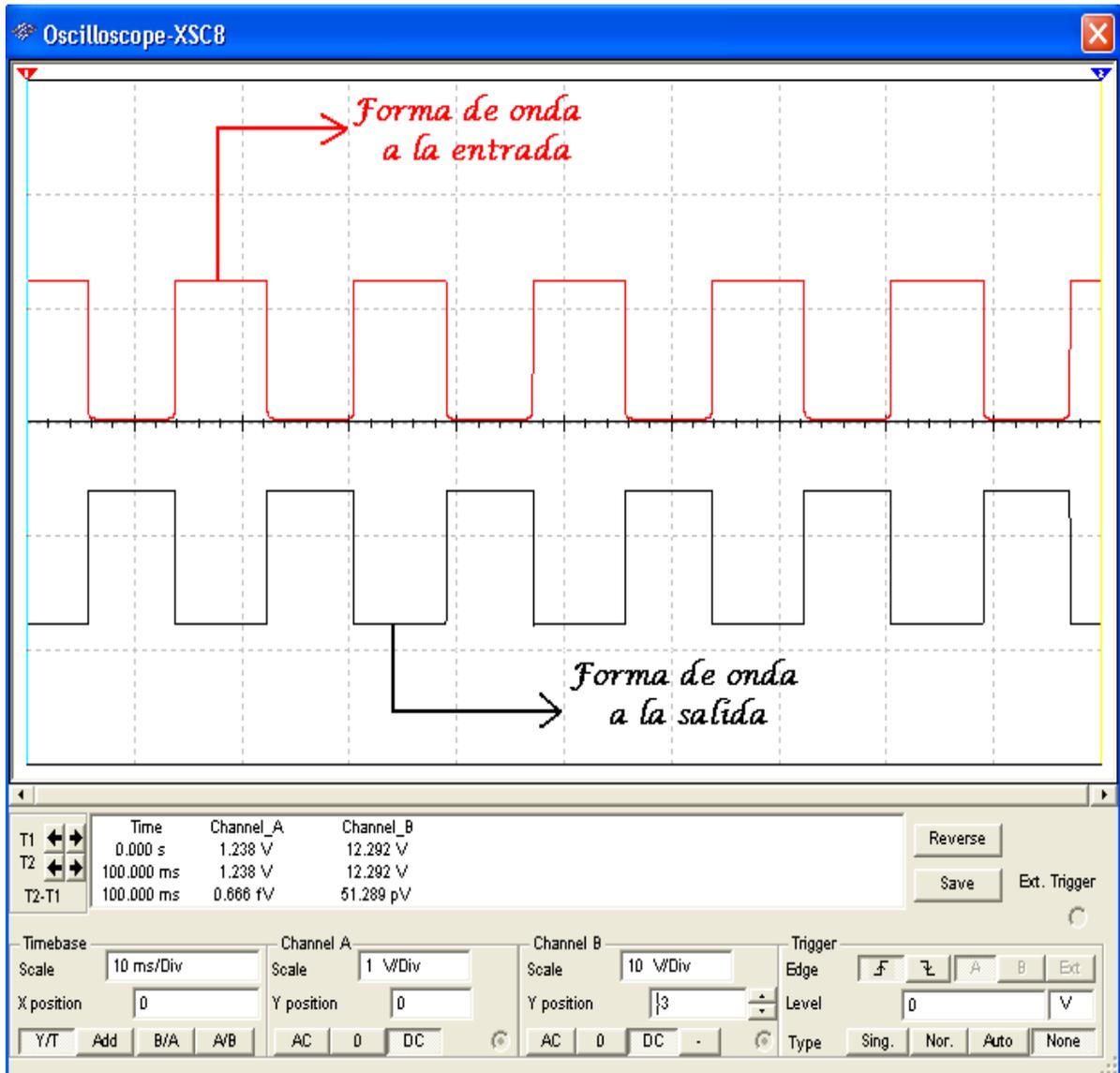
Anexo 3 Forma de onda a la salida del opto acoplador. [\(Volver\)](#)





Trabajo de Diploma

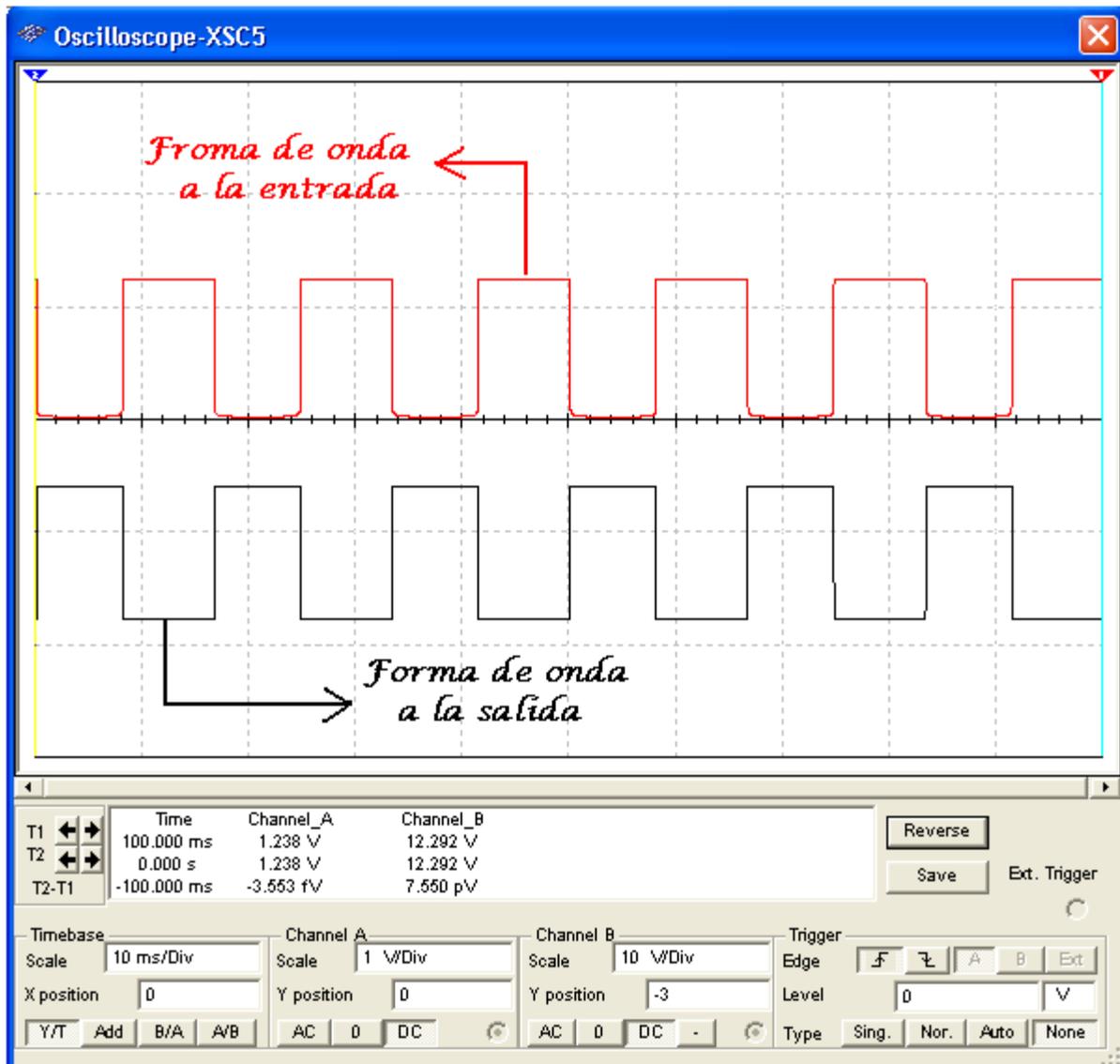
Anexo 4 Forma de onda del detector de cruce por cero 1. [\(Volver\)](#)





Trabajo de Diploma

Anexo 5 Forma de onda del detector de cruce por cero 2. [\(Volver\)](#)

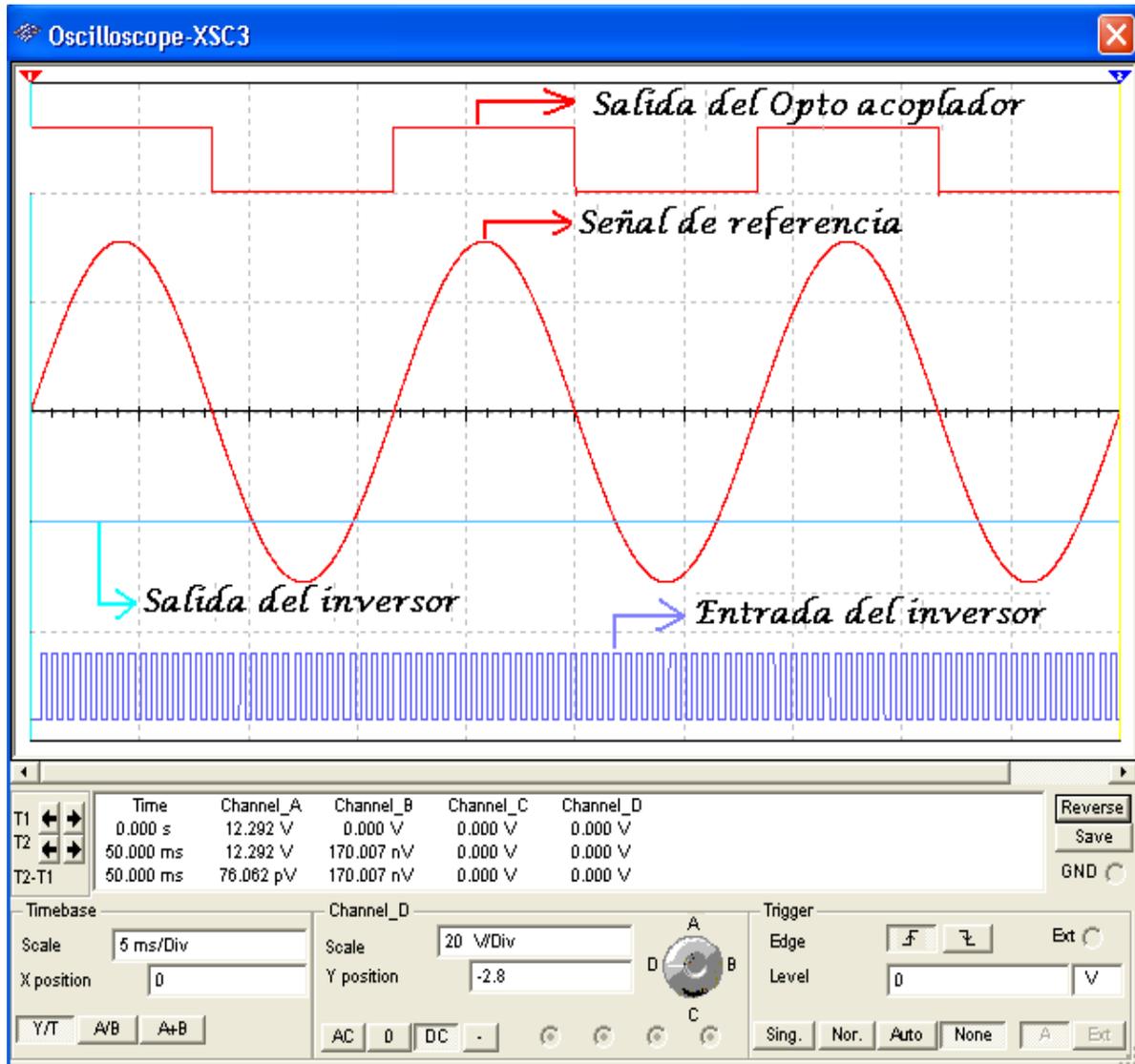




Trabajo de Diploma

Anexo 6 Formas de ondas tomadas para hacer una comparación visual.

[\(Volver\)](#)

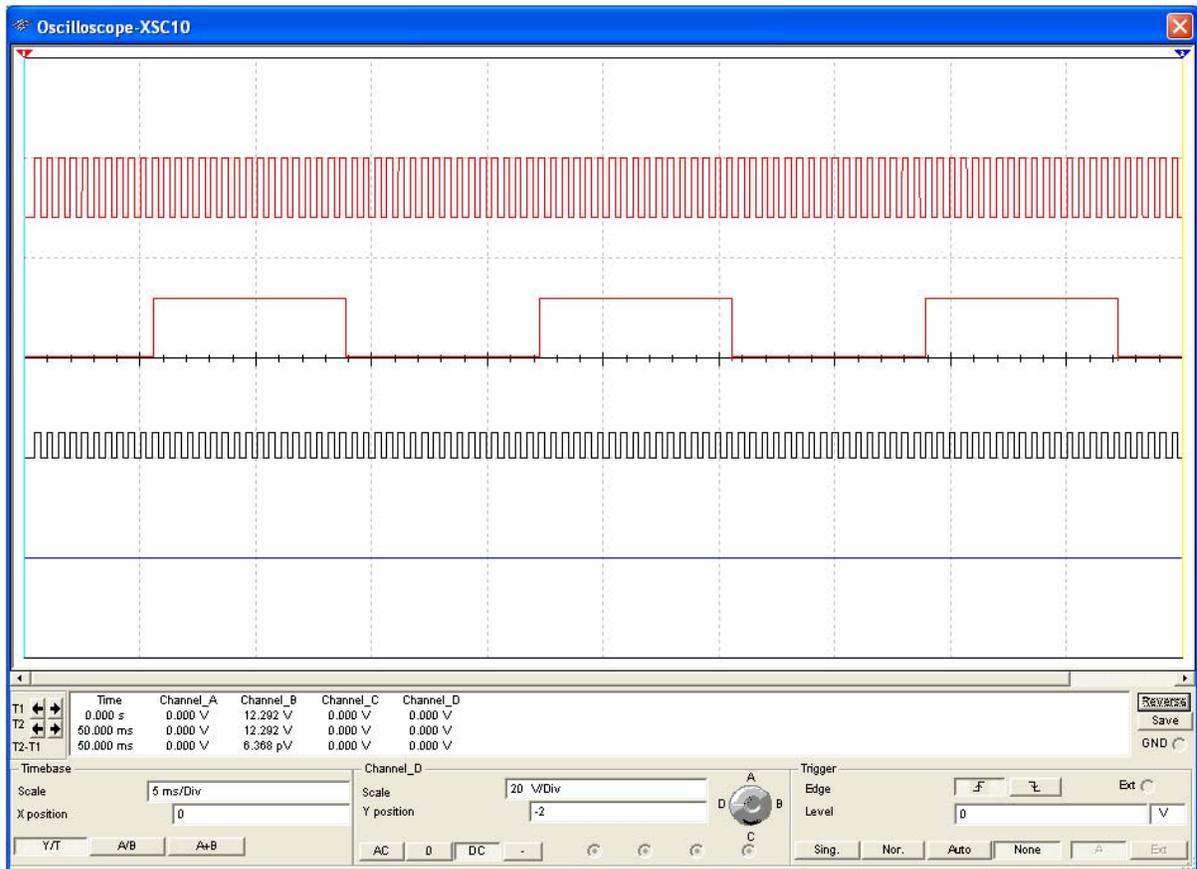




Trabajo de Diploma

Anexo 7 Formas de ondas tomadas para hacer una comparación del uso de los defasadores 1 y 2.

[\(Volver\)](#)

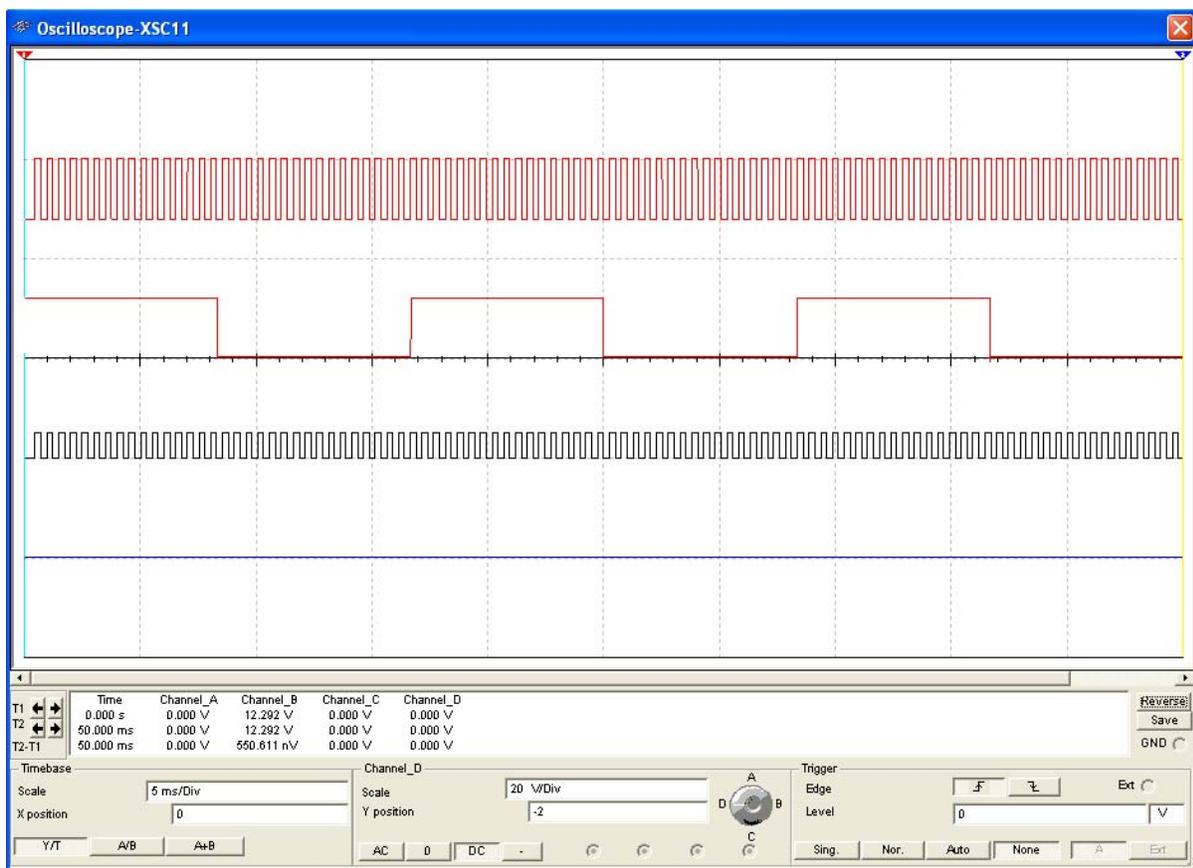




Trabajo de Diploma

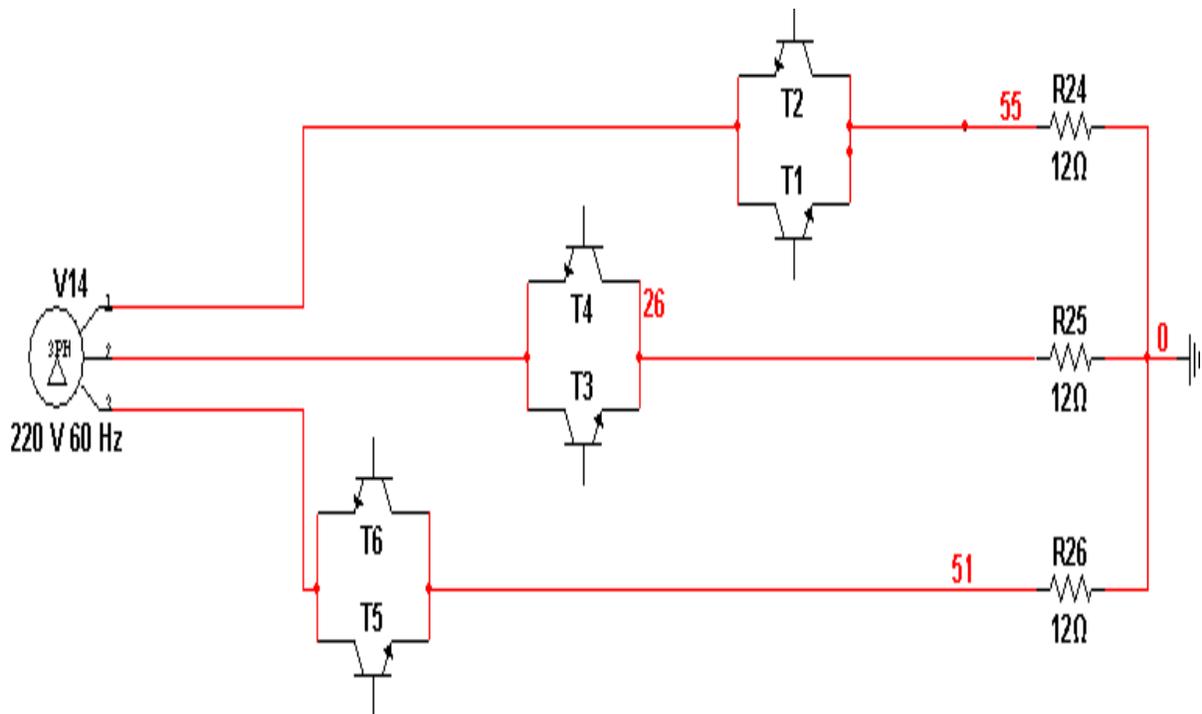
Anexo 8 Formas de ondas tomadas para hacer una comparación del uso de los desfases 3 y 4.

[\(Volver\)](#)





Anexo 9 Esquema del regulador instalado en la red.





Trabajo de Diploma

Anexo 10 Configuración del circuito de mando.

