



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
FACULTAD DE METALURGIA - ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

# Trabajo de Diploma en Opción al Título Ingeniero Eléctrico

**Título:** Circuito de mando para el control de la excitación del  
generador asincrónico en régimen autónomo.

**Autor:** Roger Rafael Fonseca Bles.

**Tutor:** M.Sc. Wilbert Acuña Rodríguez.

Moa, Holguín  
Junio 2010  
“Año 52 de la Revolución”

### Declaración de autoridad

Yo, Roger Rafael Fonseca Bles, autor de este trabajo de diploma con título: “Circuito de mando para el control de la excitación del generador asincrónico”, certifico su propiedad intelectual a favor del **Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”**, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

---

Roger Rafael Fonseca Bles

Diplomante

---

M.Sc. Wilbert Acuña Rodríguez

Tutor

---

Título: Circuito de mando para el control de la excitación del generador asincrónico en régimen autónomo  
Autor: Roger Rafael Fonseca Bles.

## **Pensamiento**

*“Educar es depositar en cada hombre toda la obra humana que le ha antecedido: es hacer a cada hombre resumen del mundo viviente, hasta el día en que vive: es ponerlo a nivel de su tiempo, para que flote sobre él, y no dejarlo debajo de su tiempo, con lo que no podrá salir a flote; es preparar al hombre para la vida”.*

*José Martí.*

### **Dedicatoria**

Dedico este trabajo de diploma a mi hermano Rafael Fonseca, mi cuñada Zenia, mi padre Eugenio Rafael Fonseca, mi novia Yarisbel Osorio y de manera muy especial a mi mamá Santa Bles Noa, que es la razón de que todo esto sea posible.

## Agradecimientos

Agradezco a mi madre Santa Bles, por el inmenso amor que me ha dado toda la vida, por su apoyo maternal y cariño, y por depositar en mí toda la confianza del mundo.

A mi padre Eugenio Rafael Fonseca, por su exigencia constante y por su apoyo ayudándome a ser cada día mejor.

A mi hermano Rafael Fonseca, por toda la ayuda que me brindó cuando lo necesite y por creer en mí.

A mi novia Yarisbel Osorio, por mantener en mí esa felicidad que me ayuda definitivamente a dar lo mejor de mí cada día, y por su apoyo incondicional en todo momento.

A mi cuñada Zenia Montero, por ayudarme en todo lo que estuvo a su alcance.

A mi tutor Wilbert Acuña, a quien admiro y respeto mucho, por sus consejos y orientación no solo en este trabajo, sino también en mi formación como profesional.

A todos los profesores del departamento que de una forma u otra me enseñaron a ser una persona mejor al trasmitirme parte de sus conocimientos con la profesionalidad y el entusiasmo que los caracteriza.

A mis amigos y compañeros por estar ahí cuando los necesité, brindándome su apoyo y ayuda necesaria de forma incondicional.

A la Revolución Cubana por darme la oportunidad de superarme como profesional con la única primicia de ser cultos cada día más.

## Índice

Introducción General.....	- 3 -
Capítulo I. Generalidades .....	- 6 -
1.1 Breves aspectos sobre energía eólica.....	- 6 -
1.2 La máquina asincrónica como generador. ....	- 7 -
1.2.1 <i>Deslizamiento del generador.</i> .....	- 12 -
1.2.2 <i>Requerimientos de conexión a la red.</i> .....	- 12 -
1.3 Reguladores estáticos de corriente alterna.....	- 13 -
1.4 Diferentes tipos de reguladores estáticos; métodos principales de regulación.-	- 14 -
Capítulo II. Diseño y simulación del circuito de mando.....	- 19 -
2.1 Introducción. ....	- 19 -
2.2 Esquema en bloques del circuito propuesto. ....	- 19 -
2.3 Bloque de sensado de tensión y corriente. ....	- 21 -
2.4 El detector de fase. ....	- 21 -
2.5 El regulador. ....	- 23 -
2.5.1 <i>El temporizador integrado 555.</i> .....	- 24 -
2.5.2 <i>El contador y el decodificador.</i> .....	- 29 -
2.5.3 <i>El “selector de nivel de tensión”.</i> ....	- 30 -
2.6 El oscilador controlado por voltaje (VCO). ....	- 33 -
2.8 El detector de cruce por cero.....	- 34 -
2.7 Modulación y Amplificación.....	- 35 -
2.8 Simulación electrónica en Multisim. ....	- 36 -
Capítulo III. Análisis de los resultados .....	- 37 -
3.1 Valoración económica. ....	- 37 -
3.1.1 <i>Cálculo económico.</i> .....	- 37 -
3.2 Valoración ecológico-social.....	- 40 -
3.3 Análisis de los resultados obtenidos. ....	- 41 -
Conclusiones: .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Recomendaciones:.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
<b>Bibliografía</b> .....	- 44 -
<b>Anexo 1. Hoja de datos del optoacoplador y del amplificador operacional.</b> .....	- 42 -
<b>Anexo 2. Hoja de datos de la 74163 (contador) y la 74159 (decodificador).</b> .....	- 43 -
Título: Circuito de mando para el control de la excitación del generador asincrónico en régimen autónomo	
Autor: Roger Rafael Fonseca Bles.	

<b>Anexo 3. Hoja de datos de la 74AS04N (NOT) y la 74S08N (AND). .....</b>	<b>- 44 -</b>
<b>Anexo 4. Esquema interno básico y hoja de datos del 555.....</b>	<b>- 45 -</b>

## **Resumen**

En el trabajo, se realiza la simulación de un circuito de mando para el control de la excitación de la máquina asincrónica con rotor en jaula trabajando como aerogenerador en régimen autónomo o aislado, con el objetivo de suprimir el reactivo inductivo demandado por la máquina para la creación de su campo magnético principal y de asumir los cambios posibles del carácter reactivo de la carga.

Se diseñó primeramente un circuito capaz de detectar la diferencia de fase en la carga, lo que permitió generar una señal suficiente para el control de la excitación con un control de pulsos múltiples por ciclos.

Como resultado principal se logra una variación de aproximadamente seis a veinte pulsos por ciclo en proporción directa al ángulo de fase ( $\varphi$ ).



## **Abstract**

In this work, it's carried out the simulation of a control circuit for the control of the excitement of the asynchronous machine with rotor in cage working as wind generator in autonomous or isolated régime, with the objective of suppressing the inductive reagent demanded by the machine for the creation of its main magnetic field and of assuming the possible changes of the reagent character of the load.

Firstly, it was designed a circuit able to detect the phase difference in the load generating this way an enough sign for the control of the excitement with a control of pulses multiple by cycles.

As main result, a variation is achieved of approximately six to twenty pulses by cycles in direct proportion to the phase angle( $\varphi$ ).

## Introducción General.

---

Con la crisis petrolera de los años 70 se hizo ver al mundo que los combustibles fósiles tendrían fin un día y que todas las reservas de combustibles convencionales se agotarían mucho antes de lo que el hombre moderno estimaba. La utilización del viento como fuente de energía es remota, remontada incluso a la antigüedad, y como fin energético se verifica históricamente desde 1900, desde que el científico y profesor danés Paul le Court realizara su primer aerogenerador con éxito. Luego, las dos guerras mundiales provocaron que esta técnica quedara un poco olvidada e inutilizada por la abundancia del petróleo y el descubrimiento de nuevos yacimientos que prometían grandes reservas hasta la década del 70. La intención inicial con éxito fue el uso de aerogeneradores de corriente continua y luego la regulación electrónica de forma que se obtuviera tensión alterna con una considerable regulación de frecuencia y tensión para garantizar de algún modo la calidad de la energía. Con la inserción de grandes parques eólicos en América del Norte y Europa se abrió una nueva escalada de la tecnología de los aerogeneradores, aplicando así las tecnologías más avanzadas y llegando a garantizar diseños aerodinámicos más acabados y una mayor potencia instalada por máquinas, así como la explotación de generadores de corriente alterna como las máquinas asincrónicas con rotor en jaula de ardilla conectadas a la red, propio de los años 80 y 90 y las máquinas sincrónicas multipolos a baja velocidad, propia de mediados de la década del 90.

En el caso particular de ambas, no hay grandes problemas cuando estas trabajan conectadas a la red, pues la red consigue con facilidad mantener los índices de calidad como estabilidad de tensión y frecuencia, disponibilidad y fiabilidad, al tener potencia infinita comparada con la que puede dar un aerogenerador o campo de aerogeneradores.

Si bien la naturaleza aleatoria del viento no cambia por más tecnología aplicada a la fabricación de turbinas eólicas y a la implementación de sofisticados sistemas automáticos de regulación, el problema sigue siendo en el régimen de trabajo autónomo o aislado.

Particularmente en el trabajo, se realiza el estudio del régimen aislado de turbina eólica con motor de inducción con rotor en Jaula, de ahí la necesidad de controlar la velocidad

---

Título: Circuito de mando para el control de la excitación del generador asincrónico en régimen autónomo

Autor: Roger Rafael Fonseca Bles.

de rotación del rotor eólico para mantener o regular la frecuencia, y el sensado del carácter reactivo de la carga permanentemente para regular la tensión generada a través de la excitación. Específicamente, se aborda el diseño del circuito electrónico para el control autónomo de la excitación.

La excitación de un generador asincrónico se realiza por medio de la conexión de condensadores en el devanado del estator con el objetivo de absorber todo el reactivo inductivo que demanda el motor para crear su campo magnético principal, en estas condiciones la ubicación del banco de condensadores permite la absorción del reactivo inductivo con un sumidero capacitivo, en términos vectoriales con la intrusión de los condensadores se genera un vector capacitivo defasado 180 grados del vector inductivo generado por el estator, logrando de esta manera solo la generación de un vector de corriente activa en fase con la tensión generada. El vector resultante sin la aplicación de los condensadores sería el que se obtiene vectorialmente por el método del paralelogramo de la corriente activa generada con la corriente inductiva necesitada por la máquina para generar su campo magnético, evidentemente tendría más componente reactiva que activa por ser de mayor módulo, y estaría en dependencia del ángulo de esta corriente.

Establecer un circuito que pueda sensar permanentemente el carácter reactivo de la carga mediante la detección del ángulo de fase, sería de gran importancia, ya que permitiría conocer en cuanto tiene que variar la capacidad del banco para generar en cada momento un vector con igual módulo que el inductivo en correspondencia a las variaciones que pueda tener la carga instantáneamente, pero defasado 180 grados.

**Problema:**

Impedimento de regular la excitación en aerogeneradores asincrónicos en régimen autónomo o aislado en dependencia de los cambios de la carga.

**Objetivo:**

Diseñar y simular un circuito eléctrico capaz de detectar fase en la carga, que permita regular la excitación del aerogenerador asincrónico en régimen autónomo con carga variable.

**Hipótesis:**

Si se logra encontrar un esquema (circuito) capaz de detectar la diferencia de fase entre la tensión y la corriente en la carga, se podrá generar la señal suficiente para el control de un convertidor estático que pueda regular el reactivo de un banco de capacitores fijos para la excitación del aerogenerador asincrónico en régimen autónomo o aislado.

**Objeto:**

Aerogenerador asincrónico.

**Objetivos específicos:**

- Diseñar el circuito eléctrico.
- Simular el circuito.
- Comprobar el funcionamiento por las formas de ondas obtenidas.

**Tareas a realizar:**

- Diseñar el circuito de mando.
- Simular el funcionamiento.

**Resultados esperados:**

Obtener un control autónomo de la excitación del generador asincrónico con carga variable en aerogeneradores.

# CAPÍTULO I

## Capítulo I. Generalidades

### 1.1 Breves aspectos sobre energía eólica.

---

Para enfrentar los problemas de las fuentes convencionales, la humanidad necesita desarrollar y aplicar tecnologías generadoras de electricidad basadas en fuentes de energía renovables, que emanen menos gases de efecto invernadero a la atmósfera. Entre las fuentes de energía, la del viento se destaca en varios aspectos decisivos: La energía eólica es renovable, es abundante en muchas regiones del planeta, la tecnología para su aprovechamiento está disponible, no emite gases de efecto invernadero ni otros contaminantes ambientales, y tampoco requiere grandes áreas de captación. Por ello, cada vez más países optan por la producción masiva de electricidad a partir del viento.

Se denomina energía eólica a la energía cinética obtenida a partir del viento, la cual, luego es convertida en energía mecánica de rotación en el eje de la máquina. Esta conversión ocurre a través de un rotor eólico o simplemente dicho, hélice. En el caso de aerogeneradores eléctricos, donde es muy importante mantener la velocidad constante en ciertos límites, se hace indispensable una regulación, pudiendo ser esta de origen mecánico o eléctrico, con un objetivo final de mantener constantes la tensión y la frecuencia, magnitudes que determinarán la calidad de la energía generada. La compatibilidad de las velocidades entre la hélice y el generador se logra a través de una caja de engranajes fijos o con cambios si se establece una regulación mecánica.

La generación de electricidad a partir del viento se ha convertido en una rama muy dinámica de la energética, y muchos países se han propuesto cubrir en un futuro no lejano una parte importante de sus necesidades eléctricas con ella, mediante la implementación de parques eólicos.

La conexión de los parques eólicos a las redes eléctricas presenta problemas de diferentes naturalezas. Estos problemas se derivan de la naturaleza del elemento de conversión electromecánico de energía (la máquina asíncrona o síncrona) y de la característica aleatoria de la fuente de energía primaria (el viento). La máquina asíncrona (la cual se aborda en cuestión) carece de capacidad de regulación de

tensión y frecuencia, y absorbe potencia reactiva en todo su margen de funcionamiento. Es preciso pues, que la red a la que está conectada proporcione la potencia reactiva que necesita y mantenga la tensión y frecuencia en sus bornes ante variaciones de la carga.

Por otro lado, se tiene el funcionamiento del generador asincrónico en régimen aislado donde la máquina trabajará de forma autónoma sin estar conectada a la red. Para este régimen de funcionamiento, se hace necesaria la conexión de un banco de capacitores que suministre al generador asincrónico el reactivo suficiente que el mismo demanda para crear su campo magnético principal, como muestra la figura 1.1.

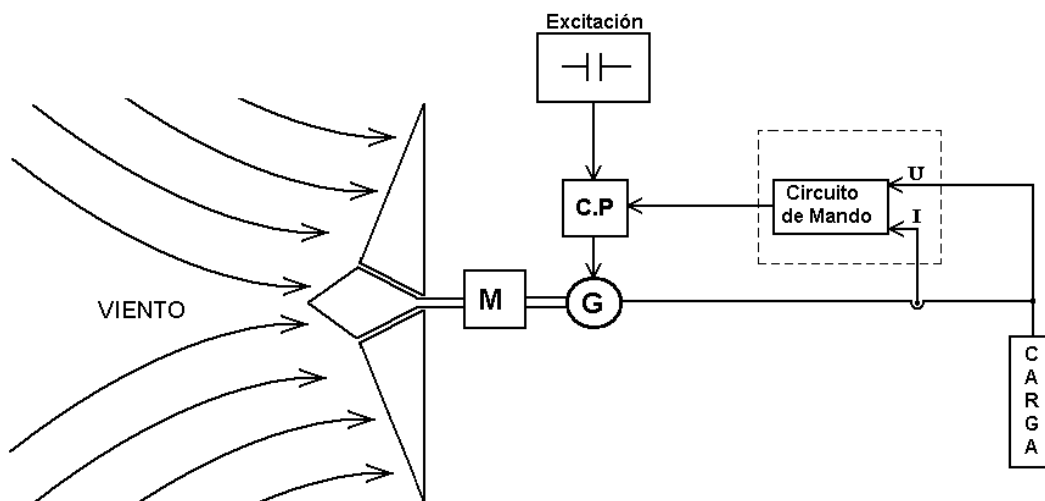


Figura 1.1 Esquema general del aerogenerador en régimen aislado.

## 1.2 La máquina asincrónica como generador.

La máquina asincrónica constituye 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, como generador. Los generadores asincrónicos son usualmente utilizados en sistemas de energía eólica e hidráulica, para suministrar la energía adicional a una carga en un área remota que posee una línea de transmisión aislada. Ser fuertes y baratos los hace muy ventajosos en esta aplicación, así como que la máquina primaria que la mueve no necesita operar a velocidad sincrónica, sin embargo debe ser equipada con un control que le permita

incrementar la velocidad en correspondencia con el aumento de 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 el 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. Este proceso físicamente se explica de la siguiente manera: el campo gira en sentido inverso respecto al régimen motor ocurriendo una inversión del 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 este, 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 a  $180^\circ$ , también gira en sentido de rotación 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 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 por el eje, en potencia eléctrica.

- Se requiere de un deslizamiento negativo para esta operación, conllevando a que la cantidad  $1-S$  sea mayor que la unidad, pero solo ligeramente. En este caso el deslizamiento no debe ser menor que el deslizamiento crítico, debido a que en esta región, el funcionamiento de la máquina se torna inestable. De acuerdo con las condiciones de restricción de las pérdidas, del calentamiento y de la conservación de una alta eficiencia, en este régimen son posibles valores de deslizamiento del mismo orden que en régimen motor, este puede tomar valores entre -0.02 y -0.05 para su funcionamiento óptimo, necesitándose que este muestre valores lo más cercano posible a cero para así disminuir las pérdidas, alcanzando la máquina un mejor rendimiento.



La ecuación de la velocidad de rotación de la máquina, está directamente relacionada con el deslizamiento.

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1-1)$$

Aquí se evidencia lo antes expuesto,  $n_r$  será la velocidad del rotor que debe crecer por encima de la velocidad del campo magnético del estator ( $n_s$ ) hasta hacer al deslizamiento ( $S$ ) negativo, solo así se logra invertir el momento sin variar el sentido de giro. De esta manera puede encontrarse la cuantía de velocidad ( $n_r$ ) que hay que proporcionar por el eje a la máquina para que esta funcione como generador.

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

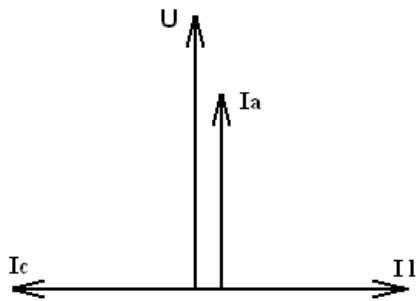
- Generador de inducción conectado a línea.
- Generador de inducción autónomo.

El generador trabajando en paralelo a la línea, consume de esta una corriente ( $I_L$ ) igual a la de magnetización ( $I_M$ ), al tiempo que produce una corriente activa ( $I_a$ ) en fase con la tensión de línea ( $U_a$ ) que es entregada, y consumida por las cargas eléctricas conectadas. La red, al tener potencia infinita respecto al generador, impone la frecuencia. Si el generador asincrónico trabaja alimentando a una red local aislada, es decir, de forma autónoma, el reactivo necesario hay que proporcionarlo con condensadores, constituyendo su excitación lo que regula la tensión, y de esta misma forma se debe asegurar la velocidad constante o variable en función de la carga para mantener la frecuencia. 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 defasada  $180^\circ$  respecto a la corriente de línea ( $I_L$ ), se logra anular la corriente de magnetización consumida por la máquina. De aquí se deduce que:

$$I_L + I_C = 0 \quad (1-2)$$

$$I_L = - I_C \quad (1-3)$$

Una explicación gráfica de lo anterior se puede ver en la figura 1.2 donde lo antes expuesto se muestra de forma vectorial.



**Figura 1.2 Diagrama vectorial del generador asincrónico.**

Una vez establecido el circuito y la carga de los condensadores, el sistema estará en condiciones de trabajar de forma autónoma. En este caso la máquina consume una corriente  $I_L = I_M$  y los condensadores consumen una corriente  $I_C = I_L$ .

Como explicación, se establece que la corriente  $I_M$  va a ser consumida por la máquina para crear su campo magnético, como consecuencia, de la generación surgirá una corriente activa ( $I_a$ ) y una reactiva ( $I_L$ ), de la primera se alimentarán las cargas eléctricas y la segunda será consumida por los condensadores, que aportarán una corriente ( $I_C$ ) cerrándose de esta manera el ciclo de funcionamiento autónomo.

De lo explicado anteriormente se deduce que:

1. Los condensadores serán fuentes de corriente reactiva de magnetización para el generador.
2. La máquina asincrónica consume de la red corriente reactiva inductiva y entrega una corriente activa.
3. Los condensadores entregan a la red ó al generador una corriente capacitiva defasada en  $180^0$  a la corriente inductiva útil del generador.
4. La capacidad de este banco de condensadores varía en dependencia de la carga.
5. Si la carga es puramente activa la potencia de los condensadores debe

igualarse a la reactiva de magnetización del generador.

6. Si esta es ahora compleja (R-L) se necesita aumentar la potencia de estos para que cubra también la potencia reactiva de la carga.
7. Si por el contrario, la carga entonces es (R-C) se necesitará entonces de una menor potencia de estos.

De forma general, la capacidad necesaria para la obtención de la tensión nominal del generador asincrónico con conexión de diferentes tipos de carga a sus terminales, estará dada por la siguiente expresión:

$$Q_C = \frac{m_S * U_C^2}{X_C} = Q_G + Q_L = P_G * tg\varphi_G + P_L * tg\varphi_L \quad (1-4)$$

Tomándose a ( $P_{nom} = P_G = P_L$ ) tenemos que:

$$C = \frac{P_{nom} * (tg\varphi_G + tg\varphi_L)}{2 * \pi * f * m * U_C^2} \quad (1-5)$$

Donde:

$P_L$ : Potencia activa de la carga.

$P_G$ : Potencia activa del generador.

$P_{nom}$ : Potencia nominal del sistema.

$Q_G$ : Potencia reactiva consumida por el generador.

$Q_C$ : Potencia reactiva que aportan los generadores.

$Q_L$ : Potencia reactiva consumida por las cargas eléctricas.

C: Capacidad del banco de condensadores.

m: Número de fases del estator.

f: Frecuencia.

### **1.2.1 Deslizamiento del generador.**

La velocidad de un generador asíncrono variará con la fuerza de giro (momento) que se le aplique. En la práctica, la diferencia entre la velocidad de rotación a potencia máxima y en vacío es muy pequeña, alrededor de un 1 por ciento. Esta diferencia en porcentaje de la velocidad sincrónica es el llamado deslizamiento del generador. El hecho de que el generador aumente o disminuya ligeramente su velocidad si su momento varía, es una propiedad mecánica muy útil. Esto significa que habrá menor rotura y desgaste en la caja multiplicadora (menor par máximo). Esta es una de las razones más importantes para la utilización de generadores asíncronos en lugar de generadores sincrónicos en aerogeneradores directamente conectados a la red eléctrica.

El deslizamiento debe ser negativo, por eso la velocidad de rotación obtenida desde el rotor eólico debe ser ligeramente superior a la nominal del generador, eso hará que se desplace el punto de operación de la máquina hasta un valor de deslizamiento menor que cero y mayor que  $-S_{crit}$ .

### **1.2.2 Requerimientos de conexión a la red.**

Un generador precisa que el estator esté magnetizado por la red antes de funcionar. Sin embargo, se puede hacer funcionar un generador asíncrono de forma autónoma si se le provee de condensadores que le suministren la corriente magnetizante necesaria para generar su campo magnético principal, siendo este el objetivo principal por el cual se lleva a cabo este trabajo (funcionamiento autónomo del generador asíncrono).

La conexión a la red del generador asíncrono se puede realizar sin los tradicionales métodos de sincronización como en el caso cuando el generador es sincrónico, solo se tiene que velar por el previo faseamiento y que el nivel de tensiones sean aproximadamente iguales para evitar la motorización de la turbina. La red, al tener potencia prácticamente infinita respecto al aerogenerador, impone la frecuencia y arrastra literalmente a la turbina permitiendo solo la inyección de potencia activa a

través de la corriente generada, en ese momento se puede prescindir del banco de condensadores de excitación para caso autónomo.

### 1.3 Reguladores estáticos de corriente alterna.

En muchas ocasiones se necesita en la carga valores de CA variables, donde la frecuencia normalmente se mantenga igual a la de la entrada, es decir, que solo varía la magnitud del voltaje (medio y eficaz) y/o corriente en la carga, esto se puede lograr con los circuitos electrónicos de potencia llamados Reguladores Estáticos de Corriente Alterna (RET de CA), los cuales se conectan entre la red y la carga y pueden ser monofásicos o polifásicos.

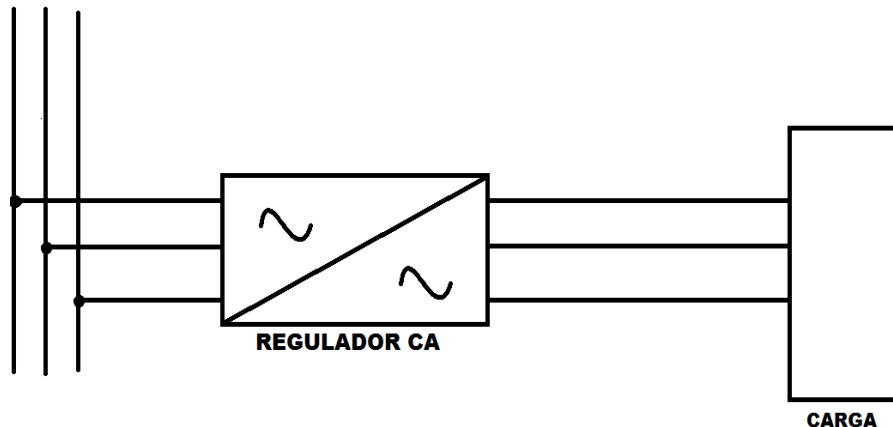


Fig. 1.3 Diagrama en bloques del regulador de corriente alterna.

La figura 1.3 muestra el esquema genérico en bloques del regulador de CA, como en los demás convertidores, la conversión de la energía a la salida se logra mediante la apertura o cierre de interruptores electrónicos, que son comandados por un circuito de control diseñado específicamente para lograr uno de los varios métodos de control existentes.

En muchas ocasiones, además de una tensión variable, se necesita también que esté estabilizada, con lo cual, escogido el valor de voltaje que se requiere a la salida, este debe variar en márgenes estrechos, aunque el voltaje a la entrada tenga una variación en márgenes más amplios.

En este caso, los reguladores se diseñan a lazo cerrado (ver figura 1.4), o como comúnmente lo llamamos “régimen automático”.

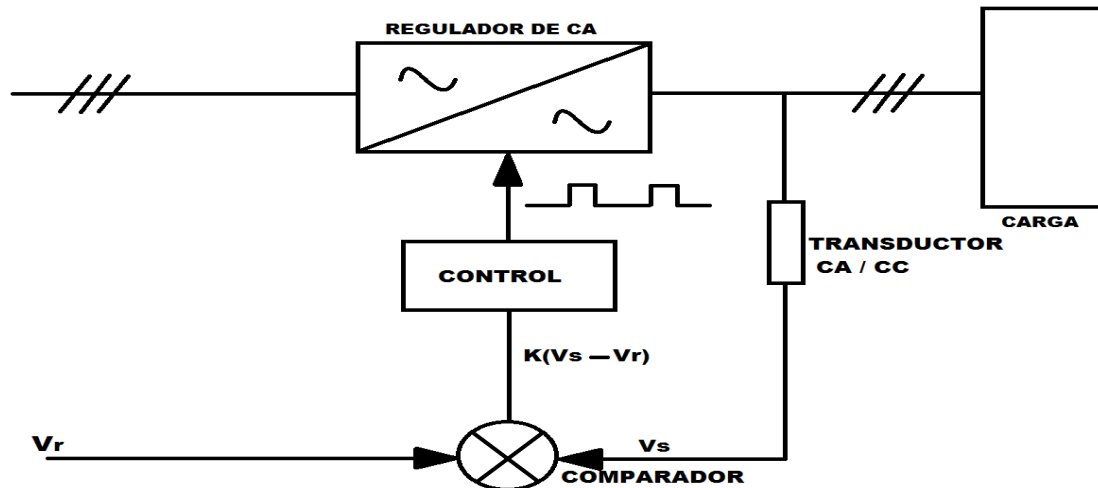


Fig. 1.4 Regulador con bucle cerrado.

El precedente circuito consiste en fijar una señal de referencia la cual se compara con el voltaje de la carga mediante el comparador, enviando este una señal de error que es inducida en el circuito de control el cual por último produce los impulsos que retrasan o adelantan el disparo de los tiristores del regulador, para mantener constante una determinada magnitud a la salida como por ejemplo la tensión, también pudiera regularse cualquier otra como la corriente o velocidad de un motor previamente sensada y convertida a una magnitud de tensión.

#### 1.4 Diferentes tipos de reguladores estáticos; métodos principales de regulación.

La configuración básica de estos circuitos es la unión antiparalela de dos tiristores, dos transistores, un tiristor y un diodo, etc., ya que ellos deben dejar pasar la corriente en ambos sentidos.

Existen muchas variantes de circuitos, los más usados se describen en lo que sigue:

Los Reguladores Estáticos de Tensión de Corriente Alterna (RET de CA) se dividen en dos grandes grupos, los semicontrolados y los totalmente controlados (ver Fig. 1.3 y 1.4). La variación del voltaje de salida se logra variando el ángulo de disparo de los tiristores conectados entre la fuente y la carga, este control se denomina de "corrimiento del ángulo de fase". El RET de CA semicontrolado contiene una componente de directa y el rango de variación del voltaje de salida de estos reguladores por influir

solamente en una componente de la tensión, ya sea en la positiva o la negativa, se encuentra en un rango del 70 al 100% del voltaje de entrada, mientras que el totalmente controlado por tener una forma de onda simétrica ya que puede modificar las dos componentes de la tensión, logra variar el voltaje de salida del 0 al 100% del de entrada. Para variar el valor de la magnitud de la onda de salida estos circuitos por lo general la cortan y aparecen armónicas, las cuales hay que filtrar cuando se quiere ondas sinusoidales en la carga.

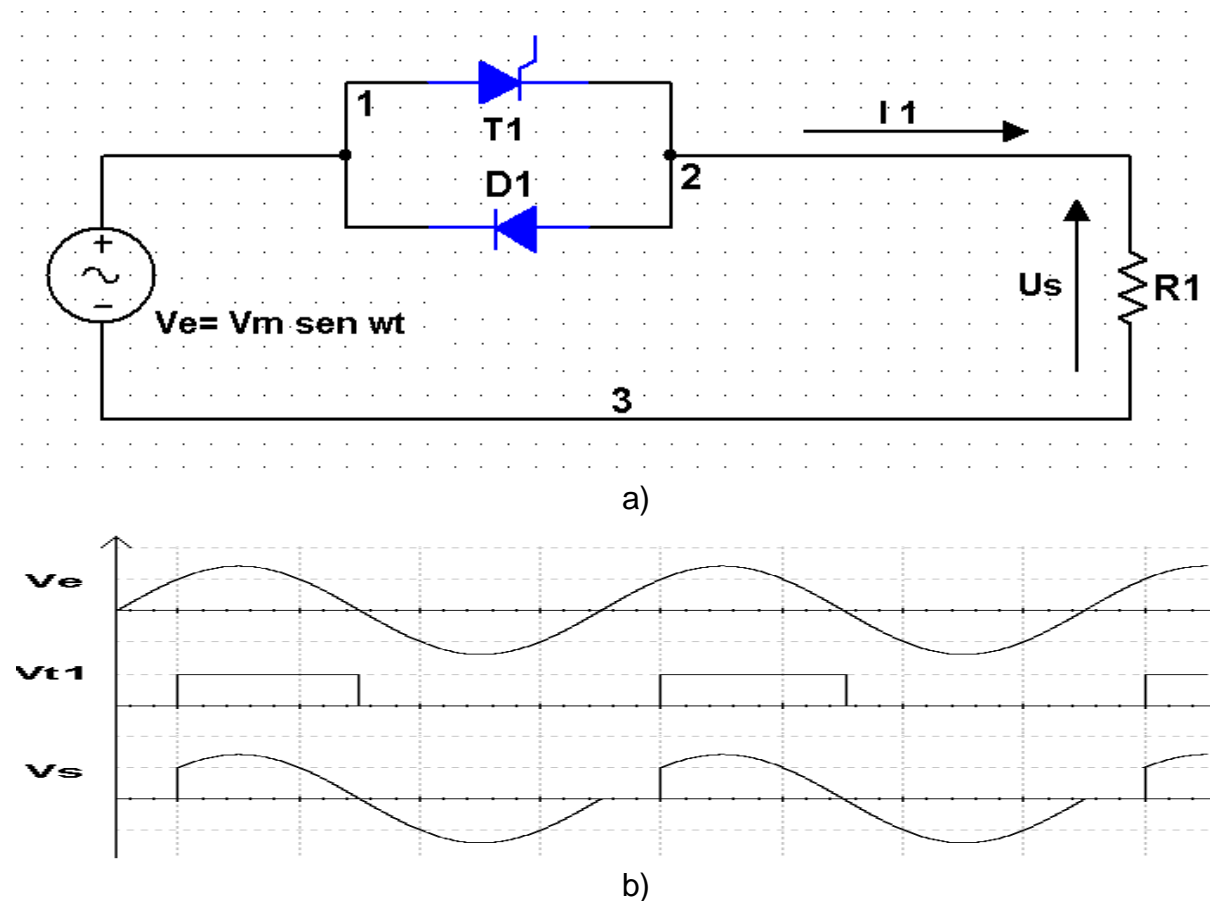
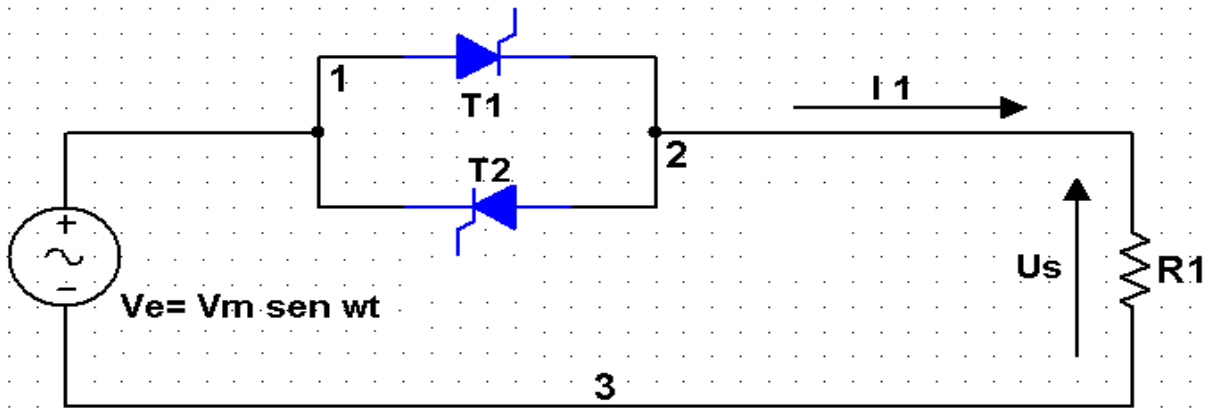


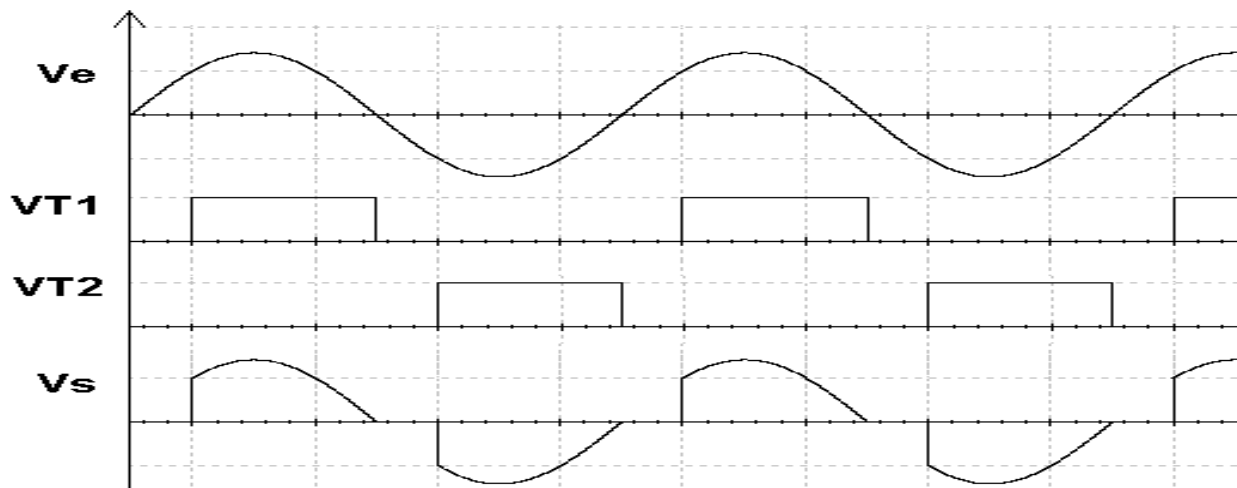
Fig. 1.3 a) Circuito del RET de CA semicontrolado (monofásico).

b) Grafico del comportamiento del RET de CA con control de pulso por ciclo.

El funcionamiento de del RET semicontrolado que se muestra en la figura antecedente consiste en la conexión de un tiristor y un diodo en antiparalelo, donde solo circulará corriente cuando además de estar en el ciclo positivo de la tensión se produce el disparo del tiristor, mientras que por el diodo va a circular la componente negativa de la tensión, este control se denomina control de pulso por ciclo, logrando así variar el valor medio y eficaz de la misma en solo un 30%.



a)



b)

Fig. 1.4 a) Circuito del RET de CA totalmente controlado (monofásico).

b) Gráfico del comportamiento del RET de CA con control de pulso por semiciclo.

Como se muestra en la figura 1.4, en el RET totalmente controlado se regula tanto la componente negativa como la positiva de la tensión conectando dos tiristores en antiparalelo y controlando sus respectivos ángulos de disparo, logrando de esta manera una variación del valor eficaz de la tensión en un rango del 100%.

Basados en este mismo principio de funcionamiento podemos encontrar los RET de control por ciclos completos (Fig. 1.5) que consiste en la conexión de dos transistores en antiparalelo, y el control se basa en saturar ambos transistores durante uno o varios ciclos completos y luego abrirlos durante los ciclos que se requiera para lograr la tensión de salida deseada.



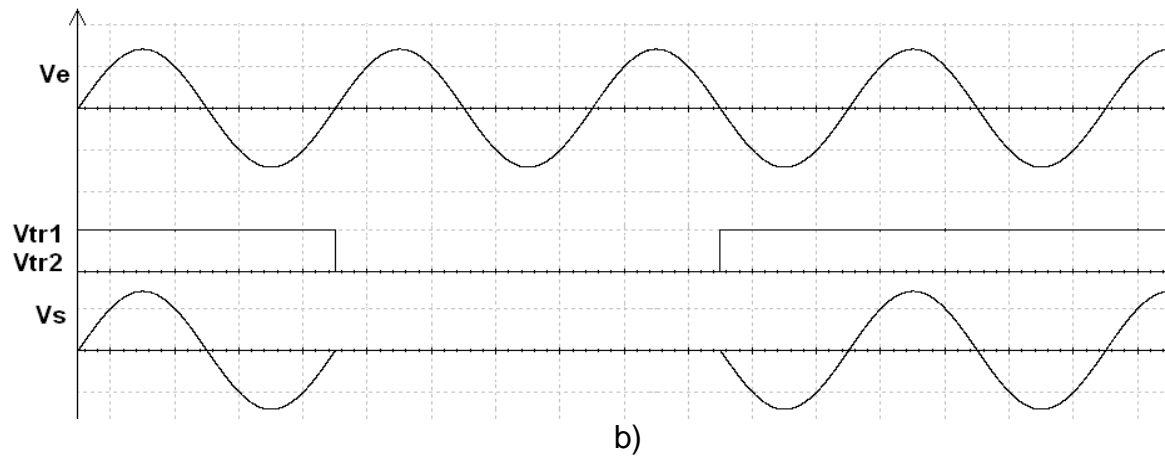
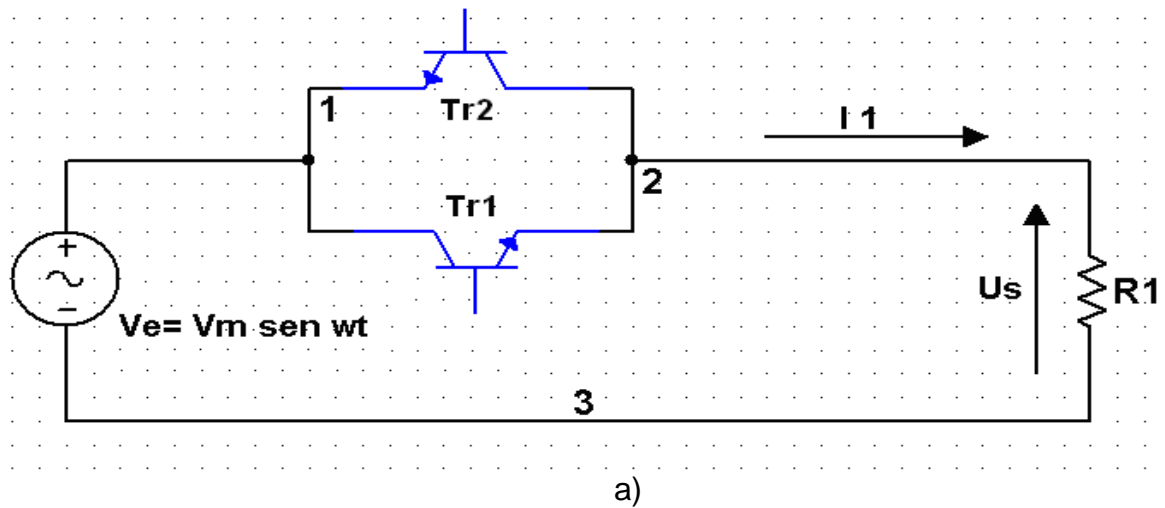
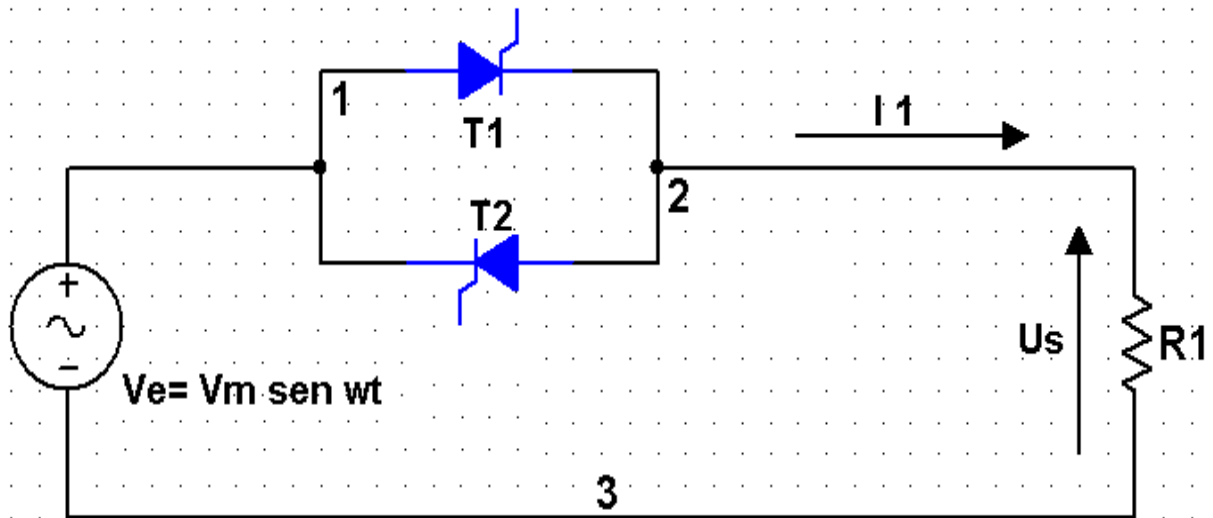


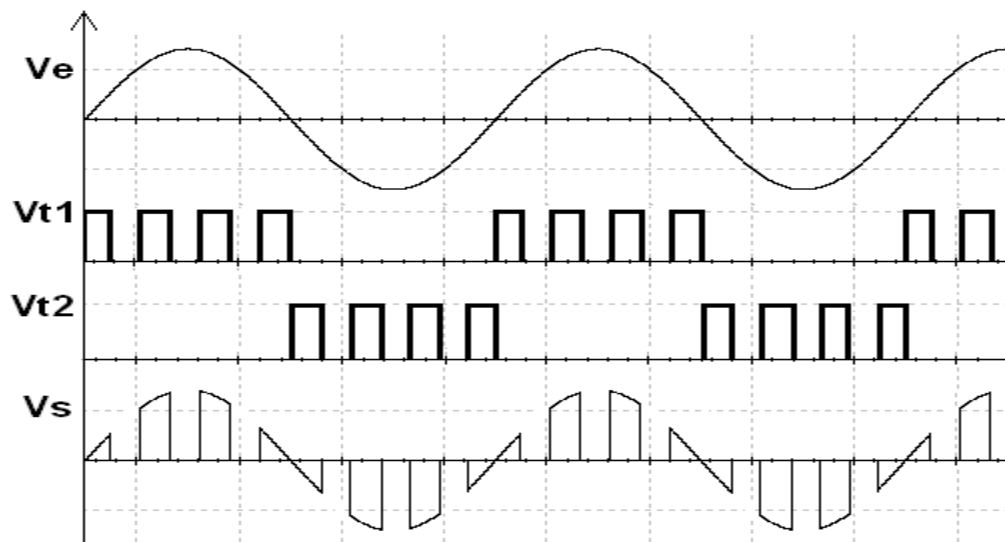
Fig. 1.5 a) Circuito del RET de CA con control por ciclos completos.

b) Gráfico del comportamiento del RET de CA con control por ciclos completos.

También podemos encontrar los RET de control de pulsos múltiples por ciclo (Fig. 1.6), que como se muestra en la figura (b), el control se basa en disparar varias veces cada tiristor en un mismo semiciclo según corresponda.



a)



b)

Fig. 1.6 a) Circuito del RET de CA con control de pulsos múltiples por ciclo.

b) Gráfico del comportamiento del RET de CA con control de pulsos múltiples por ciclo.

# CAPÍTULO II

## **Capítulo II. Diseño y simulación del circuito de mando**

### **2.1 Introducción.**

---

Como ya es conocido, un circuito de mando no es más que el encargado de conmutar los interruptores electrónicos de potencia del estado de bloqueo a conducción en los momentos precisos de acuerdo a una estrategia de mando ya escogida que pudiera ser cualquiera de las vistas en el Capítulo I. En muchos casos la forma de diseñar estos circuitos depende de las características del convertidor de potencia las cuales dependen en mucho de las características de la carga.

En este trabajo se diseña un circuito de mando que brinda un control de pulsos múltiples por ciclos, con un objetivo principal de tratar de suprimir al máximo el reactivo inductivo demandado por el generador asincrónico para crear su campo magnético principal además de asumir también los cambios dinámicos de la carga cuando el mismo se encuentra trabajando en régimen autónomo o aislado. La variación de pulsos por semiciclo en este caso será proporcional al defasaje existente entre las sinusoides tensión y corriente lo que permite que en el circuito aparezcan variaciones en la carga como se menciona anteriormente.

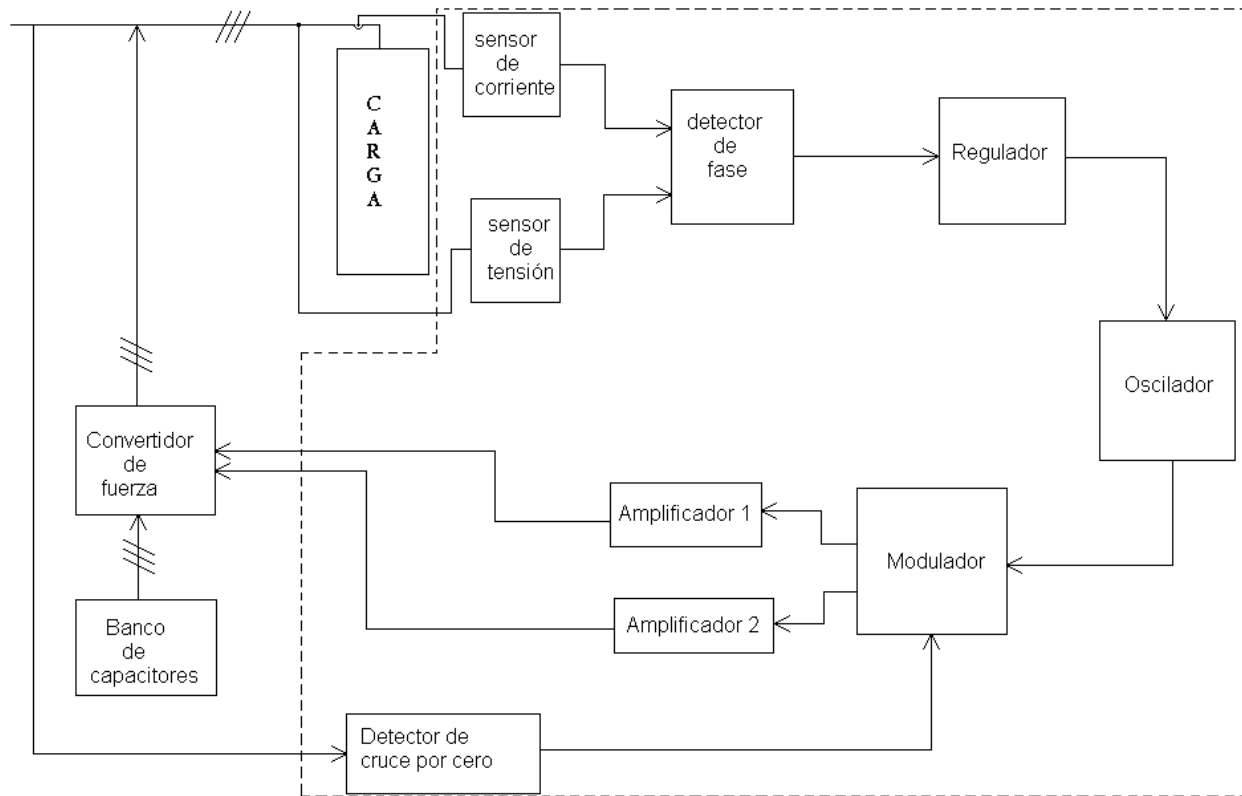
El principio de funcionamiento de este circuito se basa en el sensado previo del defasaje entre la tensión y la corriente para luego generar un tren de pulsos a una frecuencia variable en proporción lo más directo posible a la diferencia previamente obtenida. La frecuencia será proporcionada por un temporizador integrado conectado como oscilador controlado por voltaje, en este caso el LM555CN.

### **2.2 Esquema en bloques del circuito propuesto.**

---

Se hace la proposición de un circuito que básicamente estará formado por un bloque de sensado (de tensión y corriente), un bloque de detección de fase, un bloque de regulación, un bloque de generación de frecuencia (Oscilador), un bloque de

modulación, un bloque de detección de cruce por cero y por último un bloque de amplificación.



**Fig. 2.1 Esquema en bloques del circuito propuesto.**

En la figura 2.1 se muestra el esquema en bloques del circuito que se propone para la regulación de la excitación, o como se nombra en este trabajo, circuito de mando. Primeramente se tienen los sensores tanto de tensión como de corriente, los que básicamente trabajarán con transformadores de corriente y tensión que se encargaran de llevar las señales reducidas en amplitud al detector de fase, el cual estará compuesto por un circuito que tendrá como señal de entrada dos señales sinusoidales (en este caso tensión y corriente a 60Hz) defasadas o no, y se encargará de sacar una señal positiva cuadrada (a 60Hz) con un tiempo de encendido ( $T_{ON}$ ) proporcional al defasaje entre las dos señales de entrada. Esta onda cuadrada llegará al bloque de regulación, el cual deberá a través de un circuito obtener una señal de salida de tensión lineal variable en proporción al  $T_{ON}$  del pulso de la entrada, para con esta comandar el siguiente bloque formado por un oscilador controlado por voltaje (VCO) quien oscilará a diferentes frecuencias en función de los diferentes niveles de tensión. El modulador,

Título: Circuito de mando para el control de la excitación del generador asincrónico en régimen autónomo  
 Autor: Roger Rafael Fonseca Bles.

quien como señal principal tendrá la detección de cruce por cero de la senoide de la línea, defasará estas oscilaciones a  $180^\circ$  una de la otra para luego amplificarlas y enviarlas al convertidor de fuerza. La tensión de salida en el convertidor de fuerza será proporcional al valor de frecuencia que llega del circuito de mando.

### 2.3 Bloque de sensado de tensión y corriente.

Como explicábamos anteriormente, este bloque está compuesto por un transformador de tensión y uno de corriente como se muestra en la siguiente figura 2.2.



Fig. 2.2 a) Transformador de tensión. b) Transformador de corriente.

Para escoger el transformador de tensión calcularemos solamente el coeficiente de transformación (K), teniendo en cuenta que la tensión de salida (U2) que queremos es 12V y la tensión de entrada (U1) es 220V tendríamos que:

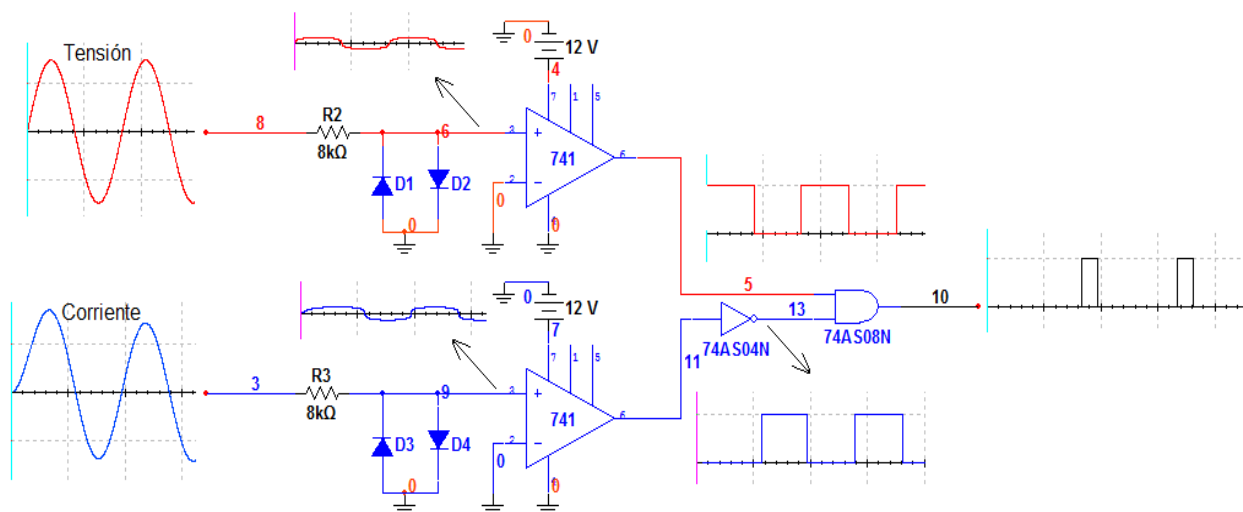
$$K = \frac{U1}{U2} = \frac{220}{12} = 18.3 \quad (2-1)$$

Para el transformador de corriente sería lo mismo ya que su principio de funcionamiento es igual, solo que este tipo de transformador (para bornes) es un tipo especial toroidal proyectado para colocarse en los bornes aislados de los aparatos, actuando el conductor del borne como devanado primario.

### 2.4 El detector de fase.

El detector de fase será el circuito a utilizar para monitorear de forma constante el comportamiento reactivo de la carga. Este segundo bloque, el cual tendrá como señal

de entrada las sinusoides de tensión y de corriente (ya reducidas en magnitud a través de los transformadores) estará formado por una resistencia quien solo tendrá como función limitar la señal de entrada del operacional. Luego se conectan dos diodos en antiparalelo que se encargarán de recortar la señal de tensión de entrada a la tensión umbral de los mismos (0.7 asumiendo que sean de silicio), siendo esta la señal de entrada del operacional (741) de quien depende la salida cuadrada positiva coincidiendo solo con el positivo de la onda recortada por los diodos, esto se debe al principio de funcionamiento y conexión de la 741 ([ver hoja de datos en anexo 1](#)) que se basa en una amplificación idealmente infinita con una salida de señal recortada al valor del voltaje de saturación menos aproximadamente dos volts. Como se muestra en la figura 2.3, lo explicado anteriormente sucede tanto para la tensión como la corriente, con la única diferencia de que para el segundo la salida del operacional se niega logrando así que al multiplicarlas se obtenga una señal digital cuadrada pulsante con un  $T_{ON}$  directamente proporcional al defasaje existente entre las ondas de tensión y corriente.



**Fig. 2.3 Esquema del detector de fase.**

La resistencia se puede calcular de la siguiente forma.

Para obtener una corriente de aproximadamente 1.4 mA sería:

Recordemos que  $I = (V_e - V_Y)/R$  donde:

$V_Y \rightarrow$  Tensión umbral del diodo

Despejando R tendríamos:

$$R = \frac{V_e - V_\delta}{I} = \frac{12\text{ V} - 0.7\text{ V}}{1.4e^{-3}\text{ A}} = 8.071\text{ k}\Omega$$

Por lo que se escoge una resistencia de 8 kΩ

## 2.5 El regulador.

Este circuito aparece por la necesidad de convertir esta señal cuadrada positiva obtenida del detector de fase que como sabemos puede variar su  $T_{ON}$ , en una señal continua positiva variable en proporción a este tiempo de encendido, es decir, la función principal de este bloque es lograr convertir tiempo de encendido en nivel de tensión.

Para lograr esto se diseñó un circuito formado por un temporizador integrado 555 como astable, un contador, un demultiplexor y un “selector de nivel de tensión” que como se explica más adelante deberá obtener distintos niveles de tensión en correspondencia con la señal del decodificador además de retener la misma en el tiempo en que esta se haga cero debido al sistema de muestreo diseñado.

En la figura 2.4 se muestra el conjunto de dispositivos que conforman el regulador. Para mayor entendimiento explicaremos cada uno de estos dispositivos y principio de funcionamiento por separado comenzando por el 555.

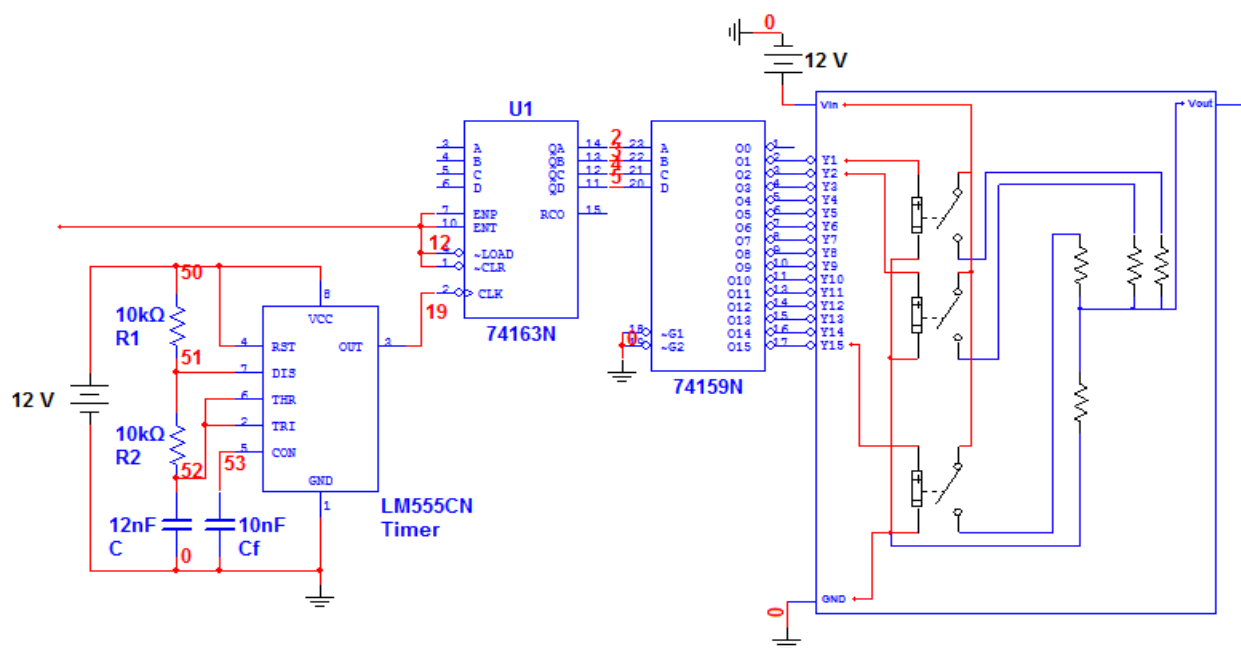


Fig. 2.4 Esquema del regulador.



### **2.5.1 El temporizador integrado 555.**

El 555 es un circuito integrado que incorpora dentro de sí dos comparadores de voltaje, un flip-flop (FF), una etapa de salida de corriente, un divisor de voltaje resistor y un transistor de descarga ([ver anexo 4](#)). Dependiendo de cómo se interconecten estas funciones utilizando componentes externos es posible conseguir que dicho circuito realice un gran número de funciones tales como la del multivibrador astable y la del circuito monoestable.

El 555 tiene diversas aplicaciones, como: Control de sistemas secuenciales, divisor de frecuencias, modulación por ancho de pulso, generación de tiempos de retraso, repetición de pulsos, etc.

➤ **Funcionamiento:**

Se alimenta de una fuente externa conectada entre sus terminales 8 (+Vcc) y 1(GND) tierra; el valor de esta fuente, puede variar desde 5 V hasta 15 V de corriente continua, la misma fuente exterior se conecta a un circuito pasivo RC exterior, que proporciona por medio de la descarga de su capacitor una señal de voltaje que está en función del tiempo, esta señal de tensión es de  $1/3$  de Vcc y se compara contra el voltaje aplicado externamente sobre la terminal 2 (TRIGGER) que es la entrada de un comparador. El terminal 6 (THRESHOLD) se ofrece como la entrada de otro comparador, en la cual se compara  $2/3$  del Vcc contra la amplitud de señal externa que le sirve de disparo.

El terminal 5 (CONTROL VOLTAGE) se dispone para producir modulación por anchura de pulsos, la descarga del condensador exterior se hace por medio del terminal 7 (DISCHARGE), se descarga cuando el transistor (NPN) T1, se encuentra en saturación, se puede descargar prematuramente el capacitor por medio de la polarización del transistor (PNP) T2.

Se dispone de la base de T2 en el terminal 4 (RESET) del circuito integrado 555, si no se desea descargar antes de que se termine el periodo, este terminal debe conectarse

directamente a  $V_{cc}$ , con esto se logra mantener cortado al transistor T2 de otro modo se puede poner a cero la salida involuntariamente, aun cuando no se desee.

La salida está provista en el terminal (3) del microcircuito y es además la salida de un amplificador de corriente (buffer), este hecho le da más versatilidad al circuito de tiempo 555, ya que la corriente máxima que se puede obtener cuando la terminal (3) sea conecta directamente al nivel de tierra es de 200 mA.

La salida del comparador "A" y la salida del comparador "B" están conectadas al Reset y Set del FF tipo SR respectivamente, la salida del FF-SR actúa como señal de entrada para el amplificador de corriente (Buffer), mientras que en el terminal 6 el nivel de tensión sea más pequeño que el nivel de voltaje contra el que se compara la entrada Reset del FF-SR no se activará, por otra parte mientras que el nivel de tensión presente en la terminal 2 sea más grande que el nivel de tensión contra el que se compara la entrada Set del FF-SR, este tampoco se activará.

➤ Circuito astable básico:

Si se usa en este modo el circuito, su principal característica es una forma de onda rectangular a la salida, en la cual el ancho de la onda puede ser manejado con los valores de ciertos elementos en el diseño.

Para esto debemos aplicar las siguientes formulas:

$$T_A = 0.693 * (R_1 + R_2) * C_1 \quad (2-2)$$

$$T_B = 0.693 * R_2 * C_1 \quad (2-3)$$

Donde  $T_A$  es el tiempo del nivel alto de la señal y  $T_B$  es el tiempo del nivel bajo de la señal. Estos tiempos dependen de los valores de  $R_1$  y  $R_2$ .

Recordemos que el periodo es:

$$T = \frac{1}{f} \quad (2-6)$$

La frecuencia con que la señal de salida oscila está dada por la fórmula:

$$f = \frac{1}{0.693 * C1 * (R1 + 2 * R2)} \quad (2-7)$$

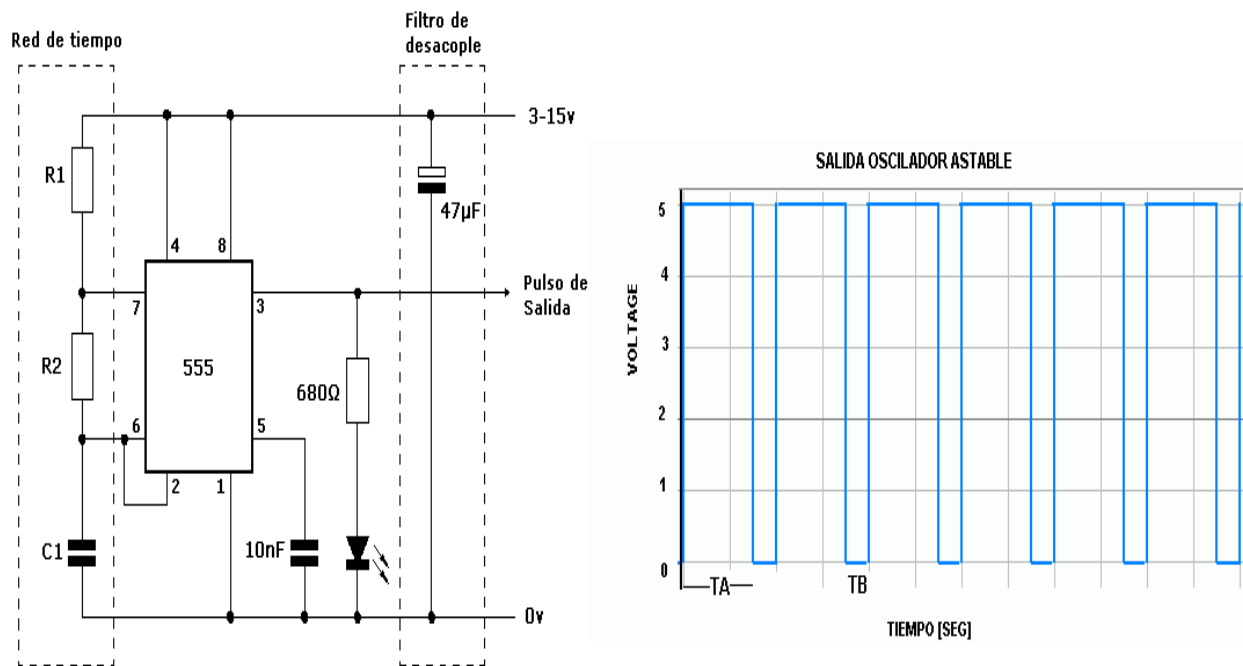


Fig. 2.5 El 555 como astable.

➤ Circuito monoestable:

En este caso el timer (temporizador) 555 en su modo monoestable funcionará como un circuito de un tiro. Dentro del 555 hay un transistor que mantiene a C1 descargado inicialmente. Cuando un pulso negativo de disparo se aplica al terminal 2, el flip-flop interno se setea, lo que quita el corto de C1 y esto causa una salida alta (high) en el terminal 3 (el terminal de salida).

La salida a través del capacitor aumenta exponencialmente con la constante de tiempo

$$t = R1 * C1 \quad (2-8)$$

Cuando el voltaje a través de C1 iguala dos tercios de Vcc el comparador interno del 555 se resetea el flip-flop, que entonces descarga el capacitor C1 rápidamente y lleva

al terminal de salida a su estado bajo (low). El circuito es activado con un impulso de entrada que va en dirección negativa cuando el nivel llega a un tercio de  $V_{cc}$ . Una vez disparado, el circuito permanece en ese estado hasta que pasa el tiempo de seteo, aun si se vuelve a disparar el circuito.

La duración del estado alto (high) es dada por la ecuación:

$$T = 1.1(R1 * C1) \quad (2-9)$$

El intervalo es independiente del voltaje de  $V_{cc}$ . Cuando el terminal reset no se usa, debe atarse a un nivel alto para evitar disparos espontáneos o falsos.

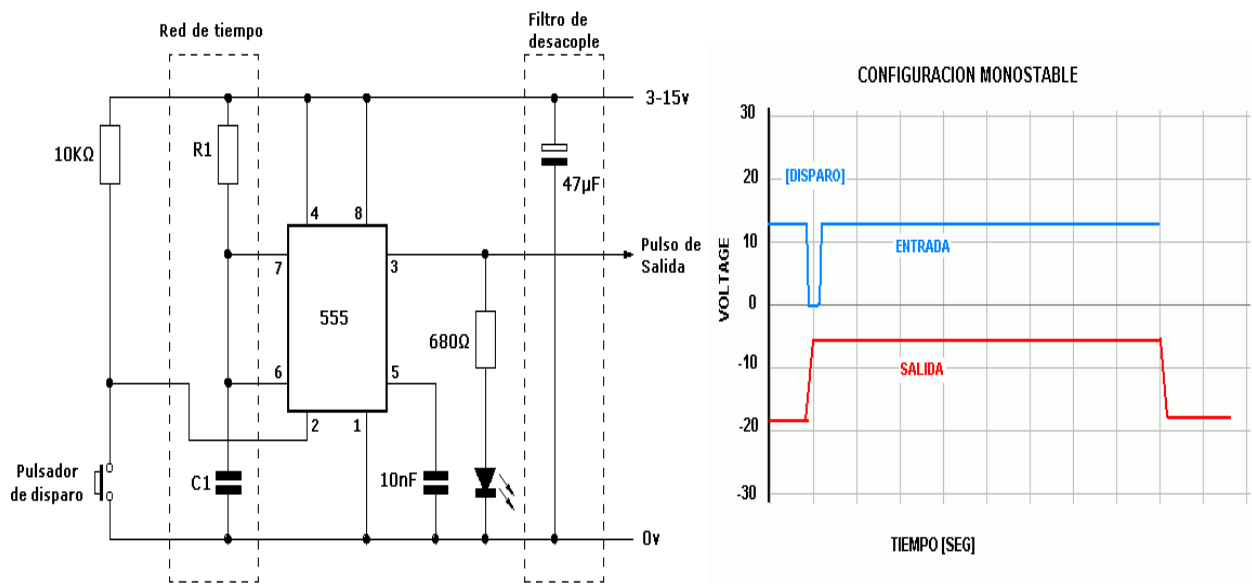


Fig. 2.6 El 555 como monoestable.

➤ Circuito escogido

En este caso se utiliza la conexión como multivibrador astable y el esquema se muestra a continuación en la figura 2.7.

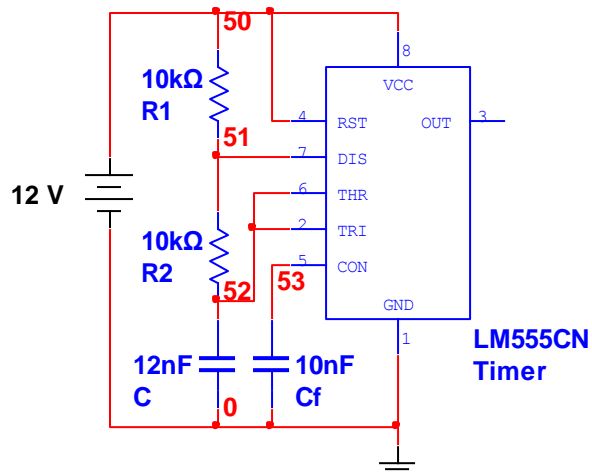
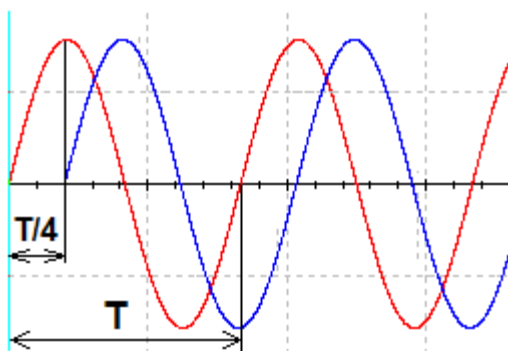


Fig. 2.7 Esquema de la aplicación de multivibrador astable del 555.

En este trabajo el multivibrador se calcula para generar una frecuencia de  $4 \cdot 16$  veces mayor a la de la frecuencia de salida del detector de fase (60 Hz), lo que sería  $4 \cdot 16 \cdot 60 = 3840$ , esto se debe a que su función es generar 16 pulsos para el defasaje máximo que aparezca entre tensión y corriente que como sabemos solo puede alcanzar una cuarta parte de su periodo como se muestra a continuación en la figura 2.8, nótese que para este momento  $\varphi$  alcanza su máximo valor ( $90^\circ$ ).



■ Tensión

■ Corriente

Fig. 2.8 Defasaje máximo entre tensión y corriente (corriente en atraso).

Entonces, teniendo la frecuencia deseada y según la ecuación (2-9), se hace el cálculo del capacitor prefijando los valores de las resistencias, en este caso  $R1 = R2 = 10 \text{ k}\Omega$ .

$$C1 = \frac{1}{0.693 * f * (R1 + 2 * R2)} = \frac{1}{0.693 * 3840 * 3R} = \frac{1}{2661.12 * 30000} = 12.5e^{-9}$$

Y se escoge un capacitor de 12 nF como se muestra en la figura 2.7.

### 2.5.2 El contador y el decodificador.

- El contador. [\(ver hoja de datos en anexo 2\)](#)

El C.I. (74163) es un contador sincrónico de cuatro bits que da una respuesta binaria y se utiliza en este circuito con la función de registrar la cantidad de pulsos (a 3840 Hz) contados en el tiempo de encendido de la señal dada por el detector de fase, o lo que es lo mismo en el tiempo de defasaje entre la tensión y la corriente.

Primeramente, para lograr que la 74163 cuente solamente durante el tiempo de encendido de la señal de entrada y luego se restee, sencillamente conectaremos al pin CLR (clear) esta señal de entrada que al mismo tiempo suministrará un nivel alto a los pines ENT, ENP y LOAD para el correcto funcionamiento de la misma como se puede ver en la figura 2.9.

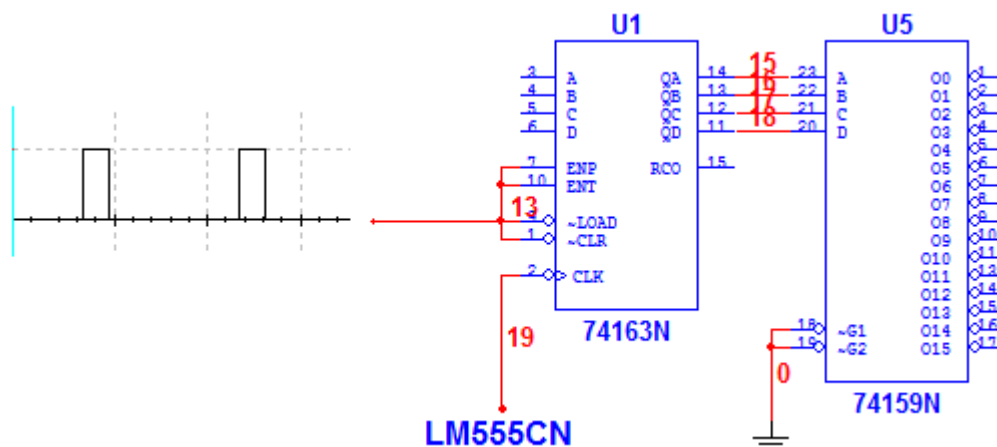


Fig. 2.9 Esquema y conexión del contador y el decodificador.

Como veíamos antes, la 74163 solo nos brinda un código binario que no es compatible con el último bloque debido al diseño del mismo, por lo que se hace necesario un decodificador para “sincronizarlos”.

1. El decodificador-demúltiplex. ([ver hoja de datos en anexo 2](#))

En un sistema digital pueden transmitirse tanto instrucciones como números mediante niveles binarios o trenes de impulsos. Si por ejemplo los cuatro bit de un mensaje se disponen para transmitir instrucciones se pueden lograr 16 órdenes distintas y se dice que esta información está codificada en sistema binario.

Frecuentemente se precisa de un conmutador de varias posiciones que pueda funcionar de acuerdo con este código. Dicho de otra forma: para cada uno de los 16 códigos una, y sólo una línea debe ser excitada. Esta forma de identificar un código particular se denomina decodificación.

Existe una gran variedad de decodificadores, entre los más frecuentes están los decodificadores-demúltiplex de 2 a cuatro líneas (74139), de 3 a 8 (74138), etc.

En este trabajo utilizamos un 74159, cuya hoja de datos se muestra en el anexo 2, que es un decodificador-demúltiplex de 4 a 16 líneas. Tiene 4 líneas de selección, 16 de salida y dos entradas de habilitación que se activan con un nivel bajo (low) como se muestra en la figura 2.9.

### **2.5.3 El “selector de nivel de tensión”.**

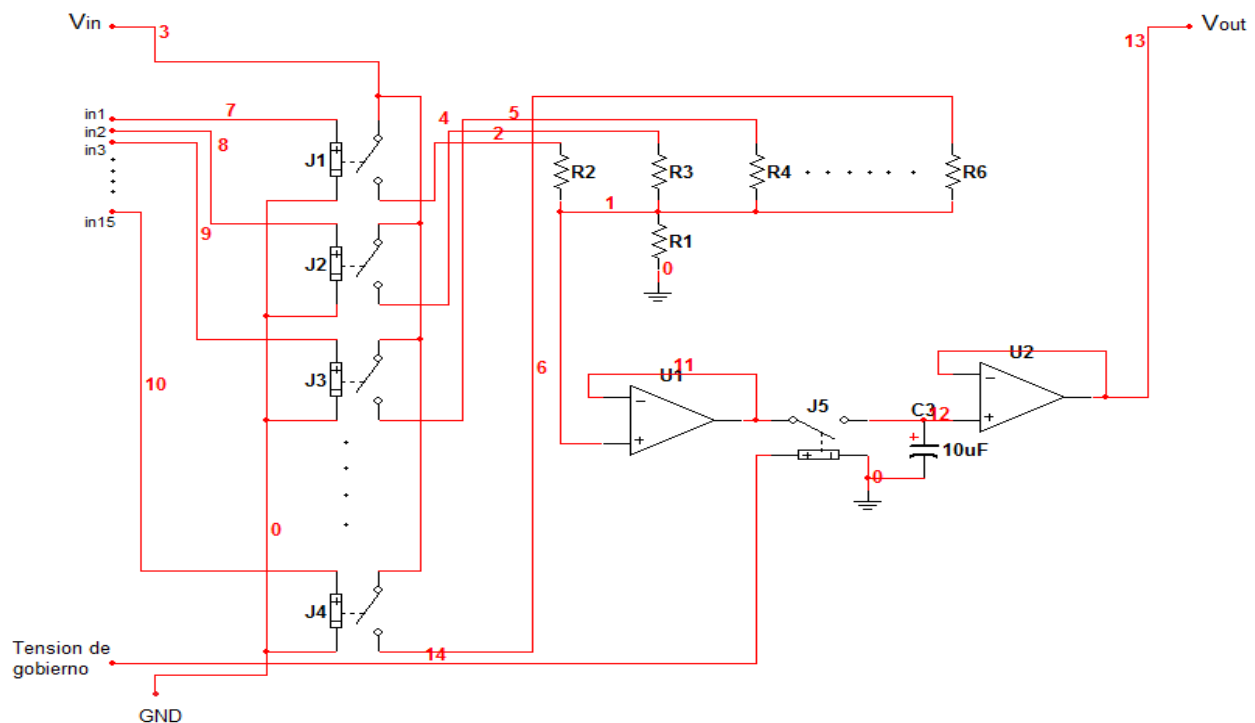
Este circuito aparece por la necesidad de generar distintos niveles de tensión de acuerdo a la salida que proporciona la 74159. Esto se logra con un banco de resistencias de diferentes valores conectadas en divisor de tensión, con una fuente de alimentación con el valor máximo que se desee, y luego excitando una y solo una de estas resistencias obteniendo a la salida un valor de tensión variable de acuerdo a la resistencia que se conecte.

Como es de saber la 74159 nos proporciona un pulso alto en uno y solo uno de sus terminales de acuerdo al conteo de la 74163, mas sin embargo esto no es suficiente para hacer funcionar el circuito, haciendo necesaria la intromisión de interruptores

controlados por voltaje logrando así el resultado necesario. En la figura 2.10 se muestra de forma más entendible lo antes expuesto.

Por último se necesita mantener esta señal generada que solo aparece durante el tiempo de conteo de la 74163, que como sabemos solo durará máximo una cuarta parte del tiempo en que esta vuelve a aparecer. Para lograr esto se añade un circuito de muestreo y retención en su configuración más sencilla que consta de dos operacionales seguidores de tensión, un capacitor y una puerta de gobierno, en este caso un interruptor controlado por voltaje (Voltage Controlled Switch (VCS)).

Un impulso positivo en el VCS pone en conducción al interruptor y el condensador de retención C carga hacia el valor instantáneo de la tensión de entrada, con una constante de tiempo  $R_o + R_{VCS(ON)}$ , siendo  $R_o$  la resistencia de salida (verdaderamente baja) del Amp-Op seguidor de tensión de entrada U1 y  $R_{VCS(ON)}$  la resistencia en conducción del VCS. En ausencia de un impulso positivo se corta el interruptor y el condensador queda aislado de cualquier carga a través del Amp-Op U2, manteniendo la tensión alcanzada.



**Fig. 2.10 El selector de tensión.**



Para calcular los valores de resistencia debemos ver primero como se comporta el oscilador controlado por voltaje que vamos a utilizar (ver sección 2.6), para entonces aplicar un divisor de tensión para cada resistencia. Para mayor entendimiento se muestra la figura 2.11.

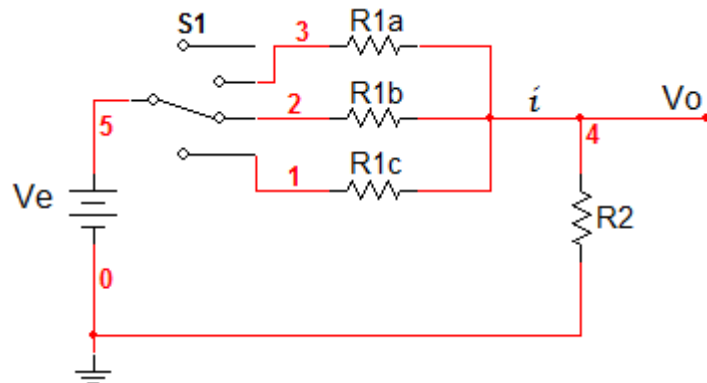


Fig. 2.11 El divisor de tensión.

Recordemos que el divisor de tensión es:

$$V_o = iR_2 = \frac{V_e}{R_1 + R_2} * R_2 = V_e * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2-10)$$

Los valores de tensión que se necesitan (en voltios) son: 11, 10.65, 10.25, 9.8, 9.3, 8.8, 8.2, 7.7, 7, 6.5, 5.9, 5.2, 4.3, 4 y 1.7.

Seria:

Teniendo una fuente de alimentación de 12 V y una resistencia fija (R2) de 1K, para obtener 11 V, seria:

$$11 = 12 V * \frac{1000 \Omega}{R_1 + 1000 \Omega}$$

Despejando R1.

$$R_1 = 12 V * \frac{1000 \Omega}{11 V} - 1000 \Omega = 90.90 \Omega \approx 91 \Omega$$

Del mismo modo se encuentran todos lo demás valores de resistencias (en ohmios) mostrados a continuación: 127, 171, 224, 290, 364, 463, 558, 714, 846, 1034, 1308, 1791, 2000 y 6060.

## 2.6 El oscilador controlado por voltaje (VCO).

El oscilador controlado por voltaje no es más que la conexión de un 555 como VCO donde sencillamente conectamos el pin de control de voltaje (terminal 5) a una señal de tensión variable, logrando a la salida una señal de frecuencia variable.

Esta frecuencia de salida tiene un impedimento, y es que también variará en su tiempo de encendido debido a que si variamos la tensión de referencia o control (terminal 5) de un 555, para poder obtener una señal simétrica cuadrada como la que se requiere a la salida, tendríamos que variar constantemente las resistencias externas del temporizador. Para dar solución a esto se conecta a la salida del 555 un flip-flop JK que funciona como divisor de frecuencia, logrando así una forma de onda simétrica cuadrada.

El comportamiento del circuito en conjunto se muestra en la tabla a continuación donde se exponen las diferentes frecuencias de salida ( $F_s$ ) en función a las distintas tensiones de entrada ( $U_e$ )

$U_e$ (V)	$F_s$ (Hz)
11.00	306
10.65	362
10.25	419
9.80	475
9.30	531
8.80	587
8.20	647
7.70	702
7.00	761
6.50	810
5.90	866
5.20	925
4.30	990
4.00	1050
1.70	1110

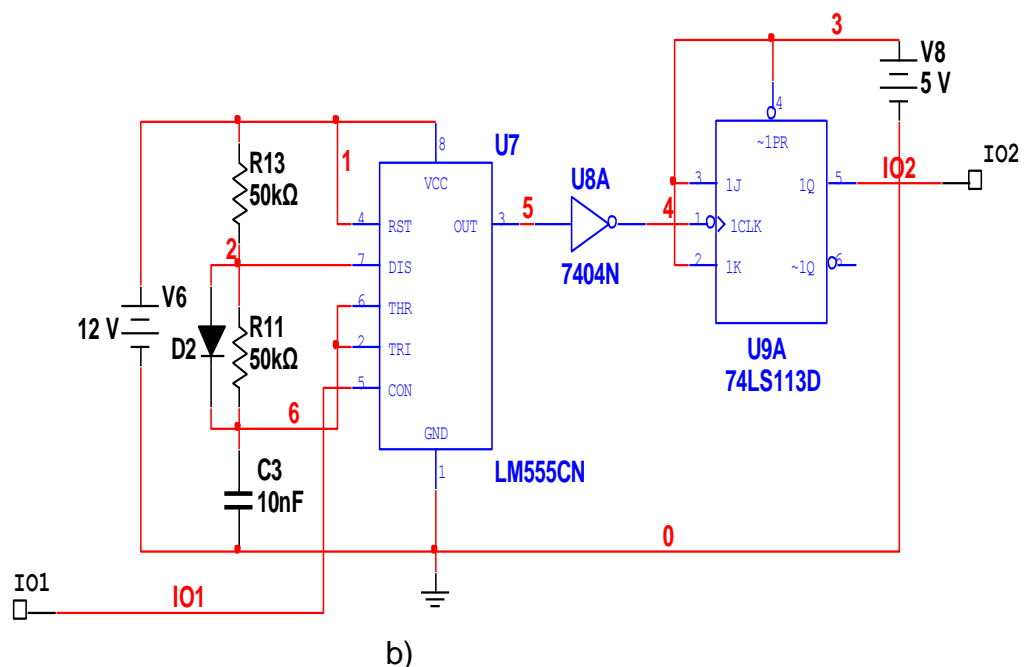


Figura 2.12 a) Tabla de comportamiento del VCO. b) Esquema del VCO.

## 2.8 El detector de cruce por cero.

---

Se utiliza un detector de cruce por cero para generar la onda moduladora que luego será proporcionada al bloque de modulación. Su funcionamiento consiste en sensar la señal de tensión en la línea como se muestra en la figura 2.13, para generar un tren de pulsos cuadrados positivos con un valor de frecuencia igual al de la señal de entrada, en este caso con un tiempo de apagado ( $T_{OFF}$ ) igual al semiciclo positivo de la sinusoide, y un tiempo de encendido ( $T_{ON}$ ) igual al semiciclo negativo de la misma.

Como se puede ver está formado por tres resistencias, un diodo, un optoacoplador y una fuente. La primera resistencia tiene como objetivo limitar la corriente que llega al diodo, el que se encarga de mantener el semiciclo positivo y llevar a tierra el negativo (como un rectificador de media onda), luego se encuentra la segunda resistencia con la misma función que la primera pero ahora para el optoacoplador, el cual tiene como función aislar la señal eléctricamente. Los optoacopladores, combinan un diodo emisor de luz infrarroja (ILED) y un fototransistor formando un acople unidireccional (ILED al fototransistor) que permite un aislamiento eléctrico de hasta 7500 voltios, al no existir conexión eléctrica entre la entrada y la salida, en este caso se utilizó el optoacoplador 4N27 ([ver hoja de datos en anexo 1](#)). Como es fácil de deducir por la figura, el optoacoplador (fototransistor) se saturará con la señal positiva que llega a él (diodo), llevando el voltaje de la fuente a tierra, mientras que cuando no se satura se mantiene el voltaje de la fuente a la salida. De esta forma se logra convertir la señal de tensión de la entrada (220 V) a un pulso cuadrado positivo (24 V) sincronizado con la misma.

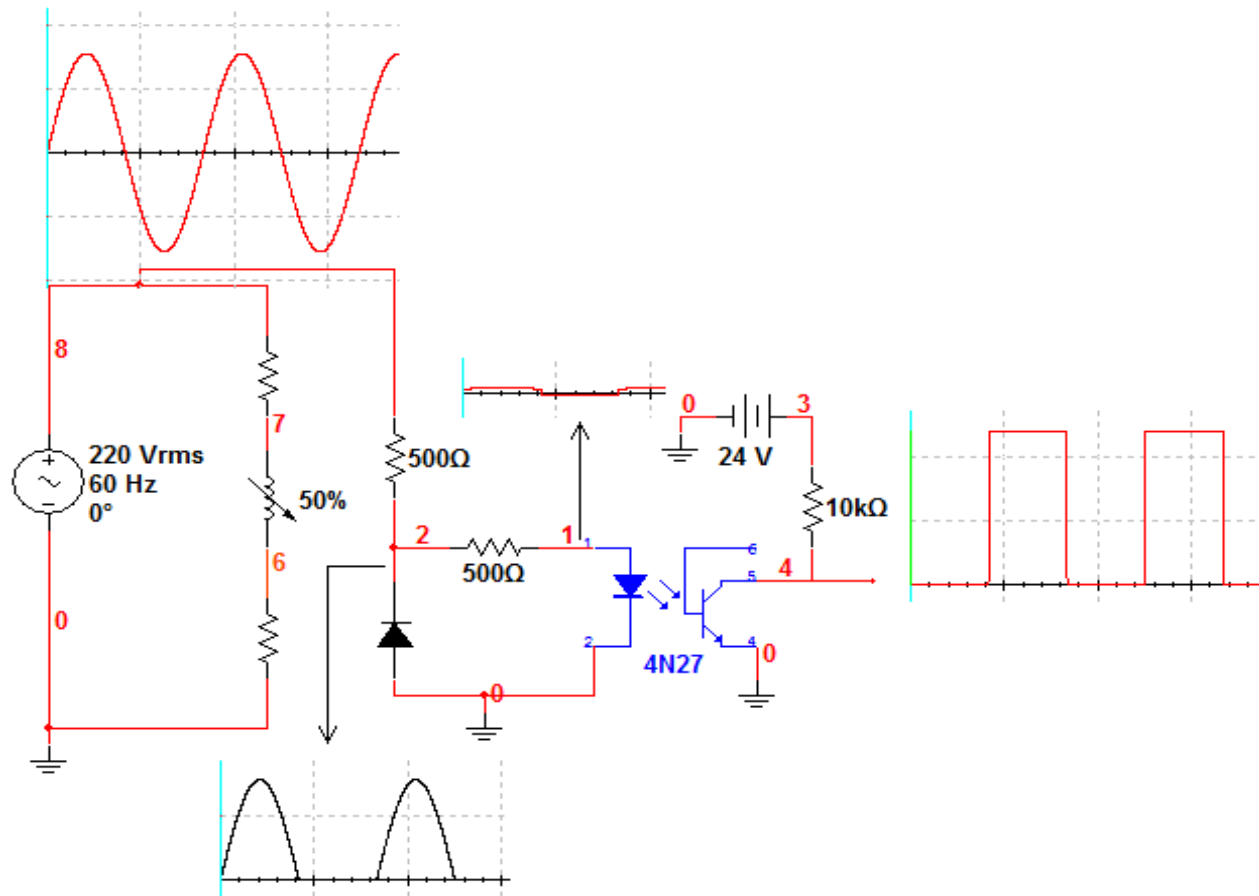


Fig. 2.13 Circuito del detector de cruce por cero

## 2.7 Modulación y Amplificación.

Este último bloque será el que proporcione al circuito o esquema de fuerza la señal de mando de forma autónoma para el control de la excitación de generador asincrónico en régimen aislado. Como se puede ver en la figura 2.14, consiste en dos compuertas NAND de dos entradas, las cuales tendrán a una entrada una señal común (onda modulada), en este caso la frecuencia generada por el VCO, y la otra entrada tendrá por señal la detección de cruce por cero (onda moduladora) que llegará de forma directa a una mientras que a la otra llegará con un “retraso” (inversión de la señal) de  $180^\circ$  provocado por una compuerta NOT conectada a la misma. Luego se conectan los optoacopladores que como vimos en la sección anterior, tendrán como función aislar (electricamente) el circuito de control del circuito de potencia, por el cual circularán grandes corrientes. ([Ver hoja de datos de las compuertas en anexo 3](#))

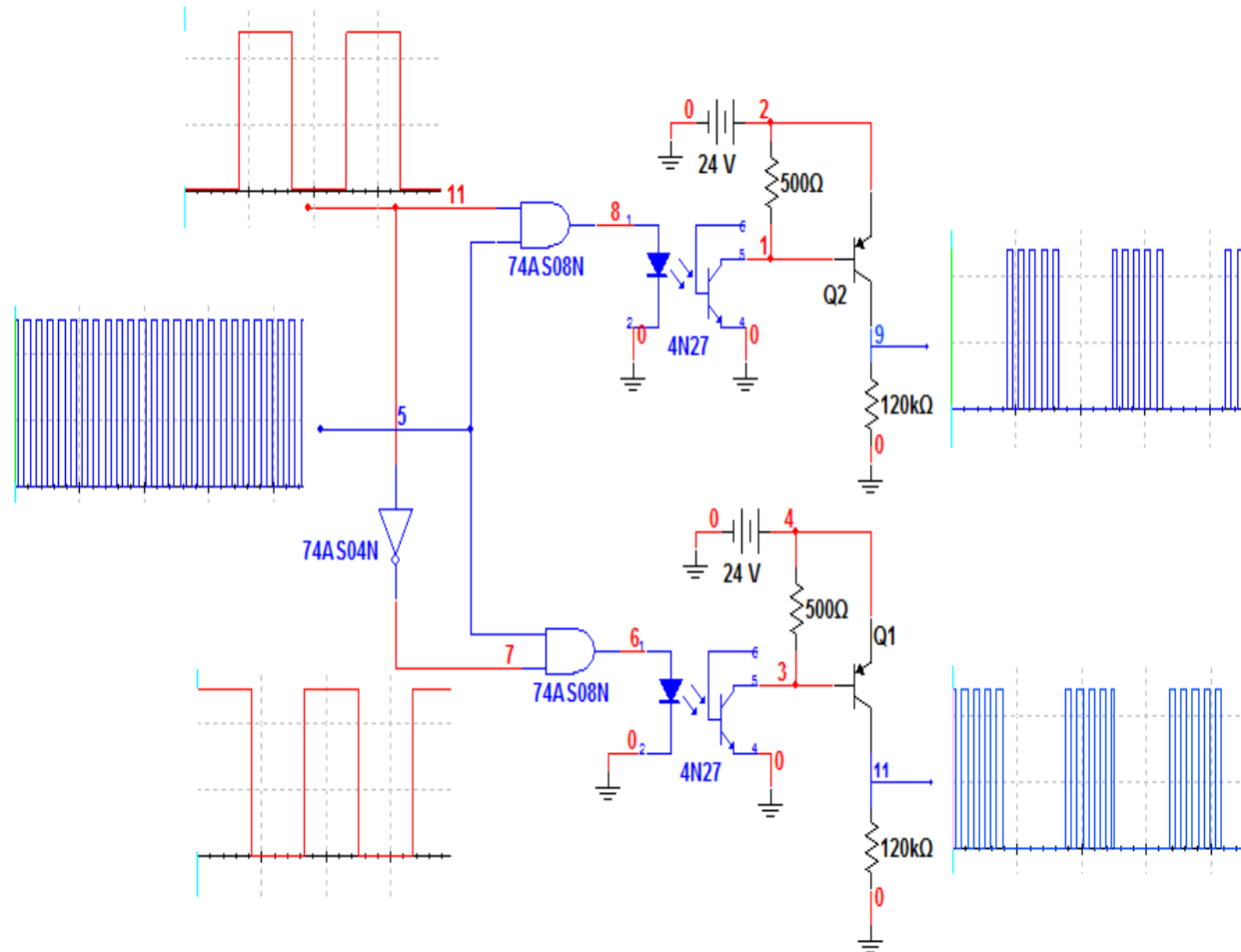


Fig. 2.14 Esquema del circuito de modulación y amplificación.

## 2.8 Simulación electrónica en Multisim.

Después de realizado el diseño del circuito de mando pasamos a su simulación con ayuda del software Multisim, siendo este un software internacional nacionalizado mediante el cual se pueden comprobar todos los valores de tensión y corriente en cada uno de los nodos del circuito así como sus formas de onda, logrando así una verificación precisa del funcionamiento correcto del diseño.

Todas las formas de onda mostradas en las figuras del capítulo han sido parte de la simulación, comprobando con estas el correcto funcionamiento del mismo.

# CAPÍTULO III

## Capítulo III. Análisis de los resultados

### 3.1 Valoración económica.

---

Como en todo trabajo científico-técnico, se requiere de una valoración económica que sirva de aval para invertir o no en la ejecución de este proyecto. Este trabajo es solo un estudio que llega a la filosofía del diseño, en el cual solo se propone un esquema que puede ser llevado a cabo en trabajos posteriores donde pueda contarse con los componentes necesarios para su construcción.

#### 3.1.1 Cálculo económico.

La valoración técnico-económica de este trabajo se realiza por el método de preestimación, que es una de las formas de cálculo económico para estimar los costos. Este es un método bastante utilizado que permite realizar un análisis económico necesario y suficiente, mostrando la viabilidad o factibilidad económica del trabajo realizado y permitiendo tomar decisiones acerca de la ejecución o no del proyecto en cuestión.

Primeramente se necesita hacer una lista de los componentes y elementos a utilizar para la construcción del circuito (presupuesto básico), incluyendo en esta la cantidad, costo por unidad y costo total. A continuación se muestra la tabla 3.1 con una lista que incluye todos los componentes utilizados en el diseño del circuito de mando para la excitación del aerogenerador asincrónico en régimen aislado.

Cabe decir que los precios en el mercado varían constantemente, aunque en un porcentaje relativamente pequeño.

TABLA 3.1.

Elemento	Cantidad	Costo unitario (CUC)	Costo total (CUC)
LM555CN	2	1.25	2.50
Diodo	6	0.15	0.90
Resistencia 8 k $\Omega$	2	0.12	0.24
Resistencia 10 k $\Omega$	3	0.15	0.45
Resistencia 120 k $\Omega$	2	0.20	0.40
Resistencia 500 $\Omega$	4	0.02	0.08
Resistencia 50 k $\Omega$	2	0.17	0.34
Resistencia 1 k $\Omega$	1	0.03	0.03
Resistencia 91 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 127 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 171 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 224 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 290 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 364 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 463 $\Omega$	1	0.01	0.01
Resistencia 558 $\Omega$	1	0.02	0.02
Resistencia 714 $\Omega$	1	0.02	0.02
Resistencia 846 $\Omega$	1	0.02	0.02
Resistencia 1034 $\Omega$	1	0.03	0.03
Resistencia 1308 $\Omega$	1	0.03	0.03
Resistencia 1791 $\Omega$	1	0.03	0.03
Resistencia 2000 $\Omega$	1	0.07	0.07
Resistencia 6060 $\Omega$	1	0.09	0.09
optoacoplador 4N27	3	1.60	4.80
Transistor PN4250 (PNP)	2	1.20	2.40
Condensador 10 nF	2	0.20	0.40
Condensador 12 nF	1	0.20	0.20
Condensador 10 uF	1	0.25	0.25
74163N (Contador)	1	0.70	0.70
74159N (decodificador)	1	0.85	0.85
Interruptor Controlado por Voltaje	16	0.90	14.40
741 (Amp_Op)	4	1.00	4.00
74AS08N (AND)	3	0.10	0.30
Transformador de tensión	1	4.55	4.55
Transformador de corriente	1	5.15	5.15
74AS04N (NOT)	2	0.08	0.16
Total	75		43.48

Título: Circuito de mando para el control de la excitación del generador asincrónico en régimen autónomo

Autor: Roger Rafael Fonseca Bles.



Teniendo en cuenta que el circuito está completamente diseñado, se hace luego necesaria la valoración del costo del montaje del mismo, para lo cual se necesitaría de un técnico medio en electrónica y un ingeniero para su ajuste. Considerando que la fabricación de este circuito no excedería un tiempo mayor a las dos jornadas laborales (16 horas) y que un técnico y un ingeniero tienen por salario 2.75 \$/horas y 3.15 \$/hora respectivamente, se hacen los cálculos del costo salarial ( $C_S$ ) en lo que sigue:

$$C_S = (2.75 \$/h + 3.15 \$/h) * 16h$$

$$C_S = 5.90 \$/h * 16 h$$

$$C_S = 94.40 \$$$

El costo total de la inversión sería entonces la suma del pago salarial de los trabajadores más el costo total que reportan los componentes. Ya que los precios de estos últimos están en CUC se hace la conversión estimando una tasa de cambio de 25 \$ por 1 CUC.

Entonces:

$$43.48 * 25.00 = 1087.00 \$$$

Se tendrá

entonces que el costo total ( $C_T$ ) sería:

$$C_T = 1087.00 \$ + 94.40 \$$$

$$C_T = 1181.40 \$$$

O lo que es lo mismo

$$C_T = 47.25 \text{ CUC}$$

### **3.2 Valoración medio ambiental.**

---

De forma breve se pudiera decir que este circuito no introduce tóxicos de ninguna índole al medio ambiente, como tampoco produce ruidos de acuerdo a su frecuencia de trabajo (desde los 306 Hz a los 1110 Hz aproximadamente) ni produce interferencia en dispositivos de comunicación como teléfonos celulares, teléfonos fijos, etc. Tampoco tiene un impacto visual negativo debido a que su tamaño es relativamente pequeño, además de que su ubicación sería dentro de la carcasa de la turbina eólica, lo que impediría algún tipo de contacto visual con la sociedad. Más bien, se considera que tiene un impacto social positivo, debido a que la tecnología a la que desarrolla, es una tecnología de un carácter bastante limpio (generación eólica) que cumple con una de las primicias de la humanidad en cuanto a medio ambiente en la actualidad, tratando de expandir y perfeccionar la generación de energía mediante fuentes renovables que emanen menos gases de efecto invernadero a la atmósfera. Conjuntamente a esto, el circuito propone una generación con una reducción de pérdidas considerables, ya que una de sus funciones aunque no sea el objetivo de este trabajo, es velar por un factor de potencia considerablemente alto. Además, propone un régimen de funcionamiento del aerogenerador (aislado o autónomo) que permitiría la desconexión de la red en momentos en que las condiciones del viento permitan una estabilidad o una regulación de la frecuencia logrando así un ahorro de energía considerable.

### **3.3 Análisis de los resultados obtenidos.**

---

La variante de circuito de control obtenida, posee condiciones de regulación del convertidor de fuerza para poder lograr una onda sinusoidal modulada en función del ángulo de fase de la carga, las formas de ondas del diseño coinciden con las obtenidas en las simulaciones de los circuitos, técnicamente el circuito es viable y muy simple económicamente, las formas de ondas alcanzadas están libre de oscilaciones y perturbaciones externas, no presenta ruidos ni procesos transitorios debido a armónicos, aunque la onda generada en el convertidor de fuerza es propensa a la intromisión de armónicos , pero de orden superior.

Realizando un análisis del trabajo, se puede decir que es viable la ejecución del circuito de mando para la excitación del generador asincrónico en régimen aislado, debido a los beneficios que este aporta a la generación eólica y a la economía del país, justificando esto que el costo no sea un impedimento.

CONCLUSIONES

Y

RECOMENDACIONES

### **Conclusiones:**

---

1. Se logró diseñar un circuito de mando para el control de la excitación del aerogenerador asincrónico en régimen autónomo, con un principio de control de pulsos múltiples por ciclos, logrando una variación aproximadamente de tres a diez pulsos por semiciclo en función del carácter reactivo de la carga.
2. La forma de onda obtenida coincide con la que se pronosticó en el diseño.
3. La valoración económica y medio ambiental manifiestan la factibilidad de su implementación práctica:
  - Desde el punto de vista económico, la fabricación del convertidor es viable.
  - Los dispositivos que se pueden encontrar fácilmente en el mercado.
  - Desde el punto de vista medio ambiental, la utilización del circuito de mando en los generadores eólicos contribuye a mitigar el impacto de la generación convencional de la energía y al desarrollo sostenible.

**Recomendaciones:**

---

- Comprobar el comportamiento del regulador ante carga capacitiva del convertidor estático ante una onda modulada.
- Realizar el montaje del circuito a escala de laboratorio.
- Realizar un análisis más profundo del circuito donde se tenga en cuenta entre otras cosas la estabilidad del sistema.

# BIBLIOGRAFÍA

### **Bibliografía**

1. Bianchi, Fernando D., 2007, Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design. Springer-Verlag London Limited, La Plata, Argentina, 218.
2. Millman, Jacob; Grabel, Arvin, 1993, MICROELECTRÓNICA. Editorial Hispano Europea, S.A. Barcelona, España, 939.
3. Pansini, Anthony J.; Kenneth D., 2006, Guide to electric power generation. The Fairmont Press, Inc. Indian Trail, Lilburn, 269.
4. RASHID, M. H., 2001, Power Electronics Handbook. Academic Press, San Diego, California, 892.
5. Rodríguez, José, 2000, Electrónica Industrial. Valparaíso, Chile, 123.
6. Ruiz Robredo, Gustavo A., 2001, Electrónica Básica para Ingenieros. Gustavo A. Ruiz Robredo, Santander, España, 290.
7. Sueker, Keith H., Power electronics design: a practitioner's guide. SciTech Publishing Inc. Alemania, 272.
8. Viñas, Luis P., 1999, Circuitos y dispositivos electrónicos. Edicions UPC. Barcelona, España, 452.

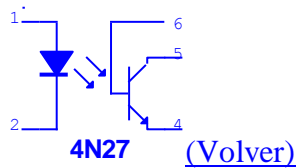
### **Sitios Web**

1. [http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito\\_integrado\\_555](http://es.wikipedia.org/wiki/Circuito_integrado_555)
2. <http://www.doctrionics.co.uk/555.htm>

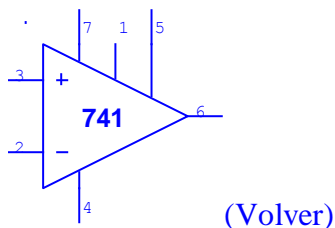


# ANEXOS

**Anexo 1. Hoja de datos del optoacoplador y del amplificador operacional.**

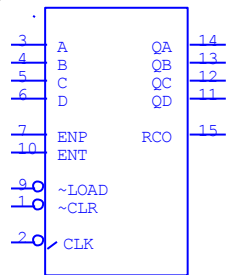


Family Group : Misc  
 Family : OPTOCOUPLER  
 Name : 4N27  
 Description : Viso=7500  
               : Vr=3  
               : If=0.06  
               : Vceo=30  
               : Veco=7  
               : Vcbo=70  
               : Ic=0.15  
               : Pd=0.25  
               : Package=CASE730A-02  
 Thermal resistance junction : 0.00  
 Thermal resistance case : 0.00  
 Power dissipation : 0.25  
 Derating Knee Point : 25.00  
 Min Operating Temp : -55.00  
 Max Operating Temp : 100.00  
 ESD : 0.00



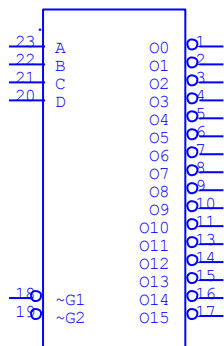
Family Group : Analog  
 Family : OPAMP  
 Name : 741  
 Description : Input\_Voffset=6000.00  
               : Input\_Ibias=500.00  
               : Gain\_BW=0.437  
               : Slew\_Rate=0.50  
               : Number=1  
               : Package=NONE  
 Thermal resistance junction : 100.00  
 Thermal resistance case : 0.00  
 Power dissipation : 0.50  
 Derating Knee Point : 0.00  
 Min Operating Temp : 0.00  
 Max Operating Temp : 70.00  
 ESD : 400.00

**Anexo 2. Hoja de datos de la 74163 (contador) y la 74159 (decodificador).**



**74163N**      [\(Volver\)](#)

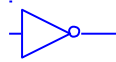
Family Group           : TTL  
 Family                 : 74STD  
 Name                  : 74163N  
 Function              : SYNCHRONUS 4-BIT COUNTER  
 Description           : Package=N016  
 Thermal resistance junction   : 0.00  
 Thermal resistance case       : 0.00  
 Power dissipation             : 0.30  
 Derating Knee Point           : 0.00  
 Min Operating Temp            : 0.00  
 Max Operating Temp            : 70.00  
 ESD                    : 0.00



**74159N**      [\(Volver\)](#)

Family Group           : TTL  
 Family                 : 74STD  
 Name                  : 74159N  
 Function              : 4 TO 16 DECODERS/DEMULTIPLEXERS WITH OC  
 Description           : Package=NW024  
 Thermal resistance junction   : 0.00  
 Thermal resistance case       : 0.00  
 Power dissipation             : 0.17  
 Derating Knee Point           : 0.00  
 Min Operating Temp            : 0.00  
 Max Operating Temp            : 70.00  
 ESD                    : 0.00

### Anexo 3. Hoja de datos de la 74AS04N (NOT) y la 74S08N (AND).



#### 74AS04N ([Volver](#))

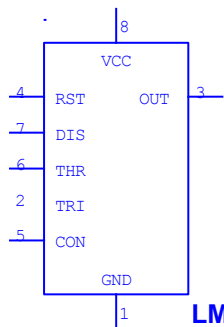
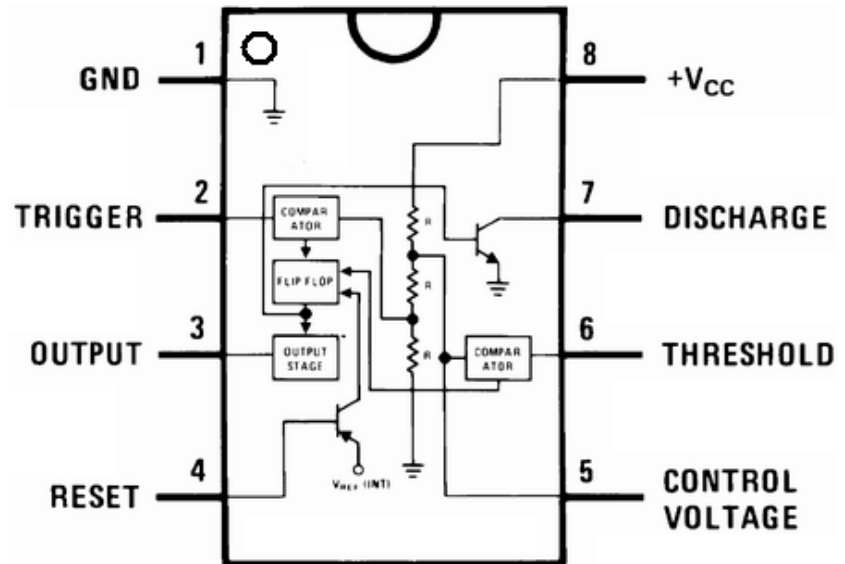
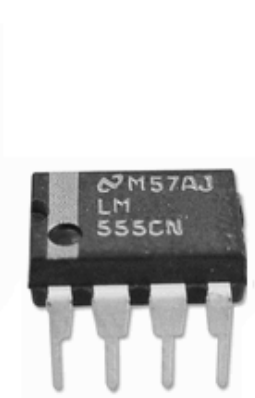
Family Group : TTL  
Family : 74AS  
Name : 74AS04N  
Function : HEX INVERTER  
Description : Package=N14A  
Thermal resistance junction : 0.00  
Thermal resistance case : 84.50  
Power dissipation : 0.01  
Derating Knee Point : 0.00  
Min Operating Temp : 0.00  
Max Operating Temp : 70.00  
ESD : 0.00



#### 74AS08N ([Volver](#))

Family Group : TTL  
Family : 74AS  
Name : 74AS08N  
Function : QUAD 2-INPUT AND  
Description : Package=N14A  
Thermal resistance junction : 0.00  
Thermal resistance case : 84.00  
Power dissipation : 0.02  
Derating Knee Point : 0.00  
Min Operating Temp : 0.00  
Max Operating Temp : 70.00  
ESD : 0.00

**Anexo 4. Esquema interno básico y hoja de datos del 555.**



**LM555CN**  
Timer [\(Volver\)](#)

Family Group	: Mixed
Family	: TIMER
Name	: LM555CN
Function	: 555 TIMER TTL
Thermal resistance junction	: 0.00
Thermal resistance case	: 0.00
Power dissipation	: 1.18
Derating Knee Point	: 0.00
Min Operating Temp	: 0.00
Max Operating Temp	: 70.00
ESD	: 0.00