



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

ÁREA DE LA ENERGÍA, INDUSTRIAS Y
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TEMA:

“Diseño de un Convertidor estático para el control de la excitación de generadores asíncronos en aerogeneradores autónomos.”

Tesis de Grado previo a la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico.

AUTOR:

Jorge Iván Maldonado Erazo

DIRECTOR:

Ing. Norman Jiménez

ASESOR:

M. Sc. Wilber Acuña Rodríguez

LOJA - ECUADOR
2005 - 2006

CERTIFICACIÓN

Ingeniero Norman Jiménez

**Profesor del Área de la Energía, Industrias y Recursos Naturales
no Renovables de la Universidad Nacional de Loja**

CERTIFICA:

Haber dirigido, corregido y revisado en todas sus partes el desarrollo de la tesis de Ingeniería en Electromecánica titulada "DISEÑO DE UN CONVERTIDOR ESTÁTICO PARA EL CONTROL DE LA EXCITACION DE GENERADORES ASINCRONOS EN AEROGENERADORES AUTONOMOS" con la autoría de Jorge Iván Maldonado Erazo. En razón de que la misma reúne a satisfacción los requisitos de forma y fondo, exigidos para una investigación de este nivel, autorizo su presentación, sustentación y defensa ante el tribunal designado para su efecto.

.....

Ing. Norman Jiménez
DIRECTOR DE TESIS

*Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores
Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos*



Declaración del Autor

Yo, Jorge Iván Maldonado Erazo, autor de este trabajo de tesis, certifico la propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa y a la Universidad Nacional de Loja, las cuales podrán hacer uso del mismo con la finalidad académica que estimen conveniente.

Jorge Iván Maldonado Erazo

Diplomante

*Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores
Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos*



Dedicatoria

II

*Le dedico este trabajo con mucho cariño y aprecio a mis padres **Maria Enith e Iván Cid** porque con su cariño y comprensión han hecho de mi una persona de bien y es por ellos que es posible el desarrollo de este trabajo, a mis hermanas **Maria Verónica y Claudia Patricia** que siempre han sido una inspiración para seguir siempre adelante y conseguir todas las metas que me he propuesto y así ser un ejemplo de superación para ellas.*

*Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores
Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos*



Agradecimientos

III

*A mi tutor y amigo M. Sc. Wilber Acuña Rodríguez
A mi director de tesis Ing. Norman Jiménez León
A mis amigos Cubanos Orly Torres e Ignacio Romero
A mis tíos Franco Maldonado y Jorge Erazo
A mis padres Iván Cid Maldonado y María Enith Erazo
A mis hermanas Claudia Patricia y María Verónica
A mi primo y hermano Jorge Luis Maldonado
A mi novia Maxibel Conté García
Y ha todas las personas que de una u otra forma hicieron posible mi presencia en Cuba.*

Les agradezco de todo corazón por su apoyo incondicional.

Gracias



Pensamiento

I

*Cuando el ciclo de las ciencias esté
completo, y sepan cuanto hay que saber, no sabrán
más que lo que sabe hoy el espíritu, y sabrán lo que el sabe.*

José Martí

*Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores
Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos*



Resumen

IV

El presente trabajo de Tesis titulado "**Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de un Generador Asíncrono en Aerogeneradores Autónomos**", tiene como objetivo diseñar un sistema capaz de regular la potencia reactiva de los condensadores y con ello controlar la excitación del generador para lograr que el usuario final obtenga de ese generador Tensión y Frecuencia constante, para ello se realizó una búsqueda bibliográfica en libros, revistas y paginas de Internet acerca del tema con lo cual se dividió el proyecto en 3 capítulos.

En el primer capítulo se aborda temas como características de los aerogeneradores existentes, selección de los convertidores y métodos de regulación, posibles a utilizar. En el segundo capítulo se realiza una selección del Convertidor tanto en su Circuito de Mando como de Fuerza de acuerdo a las características deseadas, también se hace una descripción y simulación de los mismos, el software utilizado para la simulación y obtención de los resultados de este capítulo es **MULTISIM**, el cual nos permite simular el circuito electrónico y escoger el diseño mas viable para su construcción. Como tercer capítulo se realiza una valoración del esquema propuesto, tanto en su parte Técnica, Económica y Social, que son indispensables para entender si el proyecto es viable.

Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos



Summary

v

The present Thesis work titled "Design of a Static Converter for the Control of the Excitement of an Asynchronous Generator in Autonomous Aerogenerators", has as objective design a system able to regulate the reactive power of the condensers and control the excitement of the generator to reach to the final user to obtain from this generator constant Tension and Frequency, for that was carried out a bibliographical search in books, magazines and Internet layouts about the topic, with that information the project was divided in 3 chapters.

The first chapter approached topics like characteristic of the existent aerogeneradores, selection of the converters and regulation methods, possible to use. The second chapter carried out a selection of the Converter in their Control Circuit and the Potency Circuit according to the required characteristics, a description and simulation was realized also, the software used for the simulation and obtaining of the results of this chapter is MULTISIM, which allows us to simulate the electronic circuit and choose the design viable for construction. The third chapter carried out a valuation of the proposed outline, as in their Technical, Economic and Social part that are necessary to understand that the project is viable.



INDICE	Págs.
Pensamiento	I
Dedicatoria	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Summary	V
<i>Introducción General</i>	2
<i>Objeto de Estudio</i>	5
<i>Planteamiento del Problema</i>	5
<i>Hipótesis del Trabajo</i>	5
<i>Objetivo General</i>	6
<i>Objetivos Específicos</i>	6

Capítulo I: Generalidades Sobre Aerogeneradores

1.1 <i>Introducción</i>	8
1.2 <i>Revisión Bibliográfica</i>	8
1.3 <i>Tipos de Aerogeneradores por el Generador Eléctrico</i>	10
1.4 <i>Clasificación de los Aerogeneradores con Generador Asíncrono</i>	12
1.4.1 <i>Generador de Inducción Conectado a la Red</i>	13
1.4.2 <i>Generador de Inducción Alejado de la Red</i>	13
1.5 <i>Fundamentación Teórica</i>	16
1.5.1 <i>Proceso de Auto Excitación de un Generador Asíncrono</i>	17

Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos



1.6	<i>Calidad de la Energía</i>	20
1.6.1	<i>Factores que Afectan la Frecuencia Generada</i>	21
1.6.2	<i>Excitación y Voltaje Generado</i>	23
1.7	<i>Propuesta de Esquema General</i>	24
1.8	<i>Características de los Reguladores Alterna –Alterna</i>	27
1.9	<i>Formas de Implementación</i>	29
1.9.1	<i>Regulador con Control por Fase</i>	29
1.9.2	<i>Regulador Semicontrolado</i>	30
1.9.3	<i>Regulador por Ciclos Completos</i>	32
1.10	<i>Métodos de Regulación</i>	33
1.10.1	<i>Modulación de un Impulso por Semiperiodo</i>	34
1.10.2	<i>Modulación por Impulsos Múltiples</i>	36
1.11	<i>Conclusiones</i>	41

Capítulo II: Cálculo y Simulación

2.1	<i>Introducción</i>	43
2.2	<i>Diseño del Convertidor</i>	43
2.3	<i>Cálculo del Circuito de Mando</i>	47
2.3.1	<i>Circuito de Sincronismo o de Cruce por Cero</i>	47
2.3.2	<i>Circuito conformador de Onda</i>	51
2.3.3	<i>Circuito Distribuidor y Modulador de Pulsos</i>	54
2.3.4	<i>Circuito Amplificador</i>	55
2.3.5	<i>Circuito Desfasador</i>	58
2.3.6	<i>Sensor</i>	62



2.4 Cálculo del Circuito de Fuerza	63
2.5 Selección de los Componentes Electrónicos	64
2.6 Simulación de la Forma de Obtención de Onda	67
2.7 Conclusiones	72

Capítulo III: Análisis de Resultados

3.1 Introducción	74
3.2 Valoración Técnica de Datos y Forma de Onda	74
3.3 Valoración Económica de la Propuesta	76
3.4 Valoración Social	80
3.5 Valoración Ecológica	81
3.6 Conclusiones	83

Conclusiones Generales	84
-------------------------------	----

Recomendaciones	86
------------------------	----

Bibliografía	87
---------------------	----

Anexos	
---------------	--



- ◆ **Introducción General**
- ◆ **Objeto de Estudio**
- ◆ **Planteamiento del Problema**
- ◆ **Hipótesis del Trabajo**
- ◆ **Objetivo General**
- ◆ **Objetivos Específicos**



Introducción General

El viento es una fuente de energía de la cual el hombre tiene conocimiento desde épocas muy antiguas, aunque curiosamente se ha volcado al uso de energías menos contaminantes. El aprovechamiento del viento hoy puede sustituir al combustible fósil, evitar el recalentamiento terrestre y parar la gran emisión de millones de toneladas de dióxido de carbono.

Un paso fundamental para mitigar la emanación de gases nocivos a la atmósfera es cambiar el modelo de obtener energía, y la eólica se erige como una de las más limpias, competitiva y menos destructiva.

A diferencia de otras fuentes de energía sus valores de inversión están bajando como consecuencia del avance tecnológico en la producción de los equipos necesarios y la complementación con la más moderna tecnología electrónica, sobre todo, puede ayudar eficazmente a disminuir en forma drástica la emisión de dióxido de carbono a la atmósfera.

Una de las mayores ventajas que presenta la utilización del viento para la producción de energía eléctrica esta relacionado con la ocupación del suelo, debido a que una granja eólica no precisa más que de una pequeña superficie para su implementación, y es compatible con otras actividades, por ejemplo la agricultura.

Otra ventaja de este tipo de energía y la mas importante es que esta presente en lugares en los cuales su utilización se podría volver indispensable debido a su ubicación geográfica la cual se encuentra en regiones muy alejadas de las redes de distribución eléctrica y donde la velocidad del viento puede alcanzar un promedio de 25 Km. /h anuales, sitios en lo cuales es posible la construcción de sistemas de aerogeneracion, para la producción de energía eléctrica a precios bajos.



En la actualidad en nuestro país y sobretodo en nuestra provincia una de las mayores dificultades para la implementación de redes eléctricas a nivel rural es la gran distancia que existe entre las poblaciones y el sistema eléctrico interconectado, lo que conlleva a la elevación de costos para poder llegar a ellos con una red de electrificación.

Para estos casos en que no es económicamente viable el suministro eléctrico por medio de una línea de distribución, un método viable para poder realizar la electrificación de dichas poblaciones es la implementación de aerogeneradores autónomos o alejados de la red con maquinas asíncronas.

Pero uno de los mayores inconvenientes que presenta este sistema para que pueda conectarse directamente a los usuarios y ofrecerles un servicio adecuado y confiable es la incorrecta regulación de la tensión y frecuencia y esto a su vez se constituye en la parte más cara y complicada en los aerogeneradores autónomos (no conectados a redes eléctricas).

Es por esta razón que se hace imprescindible el diseño de convertidores estáticos para que a través de los mismos lograr la regulación de la frecuencia y tensión para el usuario final.

Es por este motivo que uno de los objetivos fundamentales de esta investigación es el desarrollo y demostración de generación de energía eléctrica en lugares alejados de las redes eléctrica, a partir de la energía eólica, con la suficiente garantía y respaldo para los usuarios de la misma, para ello contamos con el apoyo de la investigación sobre aerogeneradores con aplicación de generadores Asíncronos que es tratada por el **Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa** desde el año 1993 y en este tema se han:



- ◆ *Diseño de rotores eólicos*
- ◆ *Convertidores y sensores para el control de orientación de la góndola de los molinos.*
- ◆ *Montaje de un banco de pruebas para la generación experimental con máquinas asíncronas con rotor en jaula,*
- ◆ *Comportamiento de aerogeneradores conectados a la red,*
- ◆ *Influencia del reactivo en la red de un generador asíncrono.*

Se han realizado investigaciones conjuntas con la **Universidad Nacional de Loja** en cuanto al diseño y cálculo de aerogenerador para las condiciones eólicas para la región de Loja y diseño de aerogeneradores de baja potencia para ser construidos con materiales propios del Ecuador.

Para este trabajo se han tenido en cuenta tanto la experiencia acumulada por el personal docente y de investigación de ambos centros así como toda la bibliografía al respecto y material bibliográfico y en formato digital generado al respecto de dichas investigaciones, se han tenido en cuenta experiencias de otras universidades del mundo y mucha referencia de lo actual respecto al tema en Internet.



Objeto de Estudio

El objeto fundamental del presente trabajo de investigación es el sistema regulador de la corriente de excitación de los aerogeneradores autónomos con generadores asíncronos, a través de un convertidor estático, para lo cual se hace énfasis en el diseño tanto del circuito de fuerza, como en el diseño del circuito de mando, que serán los encargados de la correcta regulación de la tensión generada por medio de la variación de la potencia reactiva del banco de condensadores para el control de la excitación del generador .

Planteamiento del Problema

Los consumidores de energía de un Aerogenerador Asíncrono aislado de la red, no gozan de la seguridad de un servicio adecuado y confiable en cuanto a calidad de energía como tensión constante y frecuencia fija en proporción de las variaciones de la carga.

Hipótesis

Es posible diseñar un convertidor estático capaz de regular adecuadamente la potencia reactiva de excitación en el generador asíncrono, partiendo de censar la variación de la tensión en la carga y generar así la señal de disparo para el convertidor de fuerza, que proporcionalmente a esta información regulara la potencia de los condensadores.



Objetivos

Objetivo General

- ◆ Desarrollar un convertidor estático para regular la potencia reactiva del banco de condensadores fijos para la excitación del generador asíncrono.

Objetivos Específicos

- ◆ *Diseñar el convertidor estático de potencia*
- ◆ *Establecer una metodología para el Cálculo del esquema propuesto*
- ◆ *Simular el esquema por medio de Software profesionales como Matlab ó Multisim 2001*



Capítulo I:

Generalidades sobre Aerogeneradores

- ◆ **Introducción**
- ◆ **Revisión Bibliográfica**
- ◆ **Tipos de Aerogeneradores por el Generador Eléctrico**
- ◆ **Clasificación de los Aerogeneradores con Generador Asíncrono**
- ◆ **Fundamentación Teórica**
- ◆ **Calidad de la Energía**
- ◆ **Propuesta de Esquema General**
- ◆ **Formas de Implementación**
- ◆ **Métodos de Regulación**
- ◆ **Conclusiones**



1.1 Introducción

Una de las mayores fuentes de generación de energía eléctrica en la actualidad y que no ha sido explotada en su totalidad es el viento, este al ser aprovechado de forma segura y con los equipos necesarios tiene un potencial infinito, para ello es que se desarrolla el presente trabajo de investigación el cual esta basado en la correcta regulación de los equipos que son utilizados para la generación de energía eléctrica a través del poder del viento.

En el presente capítulo de investigación se pretende dar un enfoque desde lo mas general hasta algunos aspectos específicos del tema de investigación, para ello se explican los pasos y estructuración que se ha realizado en el mismo, partiendo desde el tema de investigación que abarca contenidos como tipos de generadores para aerogeneradores, tipos de convertidores, métodos de regulación para los convertidores, hasta la presentación de un sistema de excitación del generador asíncrono a través de un banco de condensadores.

1.2 Revisión Bibliográfica

En la actualidad una de las formas mas limpias y económicas para la generación de energía eléctrica es la generación eólica, que en los últimos años ha sido muy explotada a nivel de grandes parques eólicos, mas no a nivel de aerogeneradores alejados de las redes de distribución, los cuales presentan una dificultad en la regulación de la excitación en los generadores asíncronos.

En la actualidad se han desarrollado algunos trabajos de tesis conjuntos entre la **Universidad Nacional de Loja** y el **Instituto Minero Metalúrgico de Moa**, los cuales han sido encaminados para el mejor



aprovechamiento de este tipo de energía, tesis como: **"DISEÑO Y SIMULACION DE LOS COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR MODELO PARA LA PROVINCIA DE LOJA"**, del Ingeniero Pablo Darío Jaramillo; **"INVESTIGACION SOBRE COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR UTILIZANDO MAQUINA ASINCRONA"** del Msc. Wilbert Acuña Rodrigues; y **"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR PARA LA PROVINCIA DE LOJA"** del Ingeniero Jorge Luís Maldonado. Trabajos que se han encaminado al diseño de un aerogenerador, mas no a la regulación de la energía que estos producen.

La tendencia mundial en este campo es a disminuir el tamaño de los parques por motivos de impacto ecológico y medioambiental pero en cambio se ha logrado un considerable aumento de la potencia por cada maquina llegando al asombroso orden de 3 MW, para maquinas de eje horizontal y 5 MW, en máquinas verticales. Pero siempre con generadores asincrónicos y conectados a la red, para el caso de estaciones autónomas se explotan generadores sincrónicos para garantizar Tensión y frecuencia constante con la consiguiente compleja red de excitación que se requiere para este tipo de maquina. Algunas empresas de renombre mundial en este campo como son: *Wind World, Vestas de Dinamarca, Nordex de Canadá, Ecotecnia de España, Wind Energy Group de Reino Unido*, poseen esta línea de fabricación como se describía anteriormente y la mayoría de los prototipos autónomos lo hacen con salida a ciclo convertidores en disímiles configuraciones solo con motivo de hacer la frecuencia y la tensión dependiente de valores prefijados por los circuitos de mando y control

Lo que se pretende con este trabajo es encontrar el diseño adecuado y la simulación de un convertidor estático de potencia que sea capaz de regular la potencia reactiva de un banco de condensadores fijos para variar con esta la excitación del generador permanentemente con los



cambios de carga en tiempo real, es decir poder desarrollar un aerogenerador con maquina asíncrona que trabaje en régimen autónomo, alejado e independiente de la red. Esto es posible si se censa permanentemente la tensión en la carga, y hallar así la variación de la misma y con ello generar la señal de mando para el convertidor de fuerza.

1.3 Tipos de Aerogeneradores por el Generador Eléctrico

Los generadores existentes pueden sin dificultad ser utilizados para este tipo de generación pero atendiendo, en función económica a las ventajas de unos respecto a otros se determina tomar en explotación la variante más económica que garantice las menores perdidas posibles de acuerdo a su potencia y tamaño.

Los generadores posibles de utilizar son:

◆ **Generador de corriente directa.**

◆ **Generador de corriente alterna (sincrónico y asíncronico)**

✦ **Sincrónicos:**

- De polos salientes
- De polos liso

✦ **Asincrónicos**

- Rotor en corto circuito
- Rotor bobinado.

El generador de **Corriente Directa**, es totalmente despreciado para este trabajo debido a que:



- _ Posee altas pérdidas en disipación y rozamiento en el colector, considerable cuando el motor primario es eólico.
- _ Es de mayor tamaño en comparación con un motor de corriente alterna para potencias iguales.
- _ La señal resultante es continua, la que habría que invertir por medio de semiconductores, obteniendo pérdidas en dichos componentes y una señal alterna no sinusoidal. Se limita este generador solo a la carga de baterías o pequeñas redes de alumbrado incandescente.

El generador **sincrónico**, posee óptimas condiciones para explotarse principalmente en instalaciones aisladas, tiene ciertas pérdidas a considerar en su unión colector-escobillas y una fuente independiente de corriente directa para su excitación, además circuitos que deben controlar su funcionamiento, lo que encarece la inversión. Se recomienda para el uso eficiente que sea auto excitado y diseñar circuitos electrónicos de regulación automática de la excitación y control de la frecuencia.

El generador **asincrónico**, a pesar de sus escasas condiciones de generación puede lograrse este régimen en condiciones especiales, de pocas pérdidas y funcionamiento sencillo, no dispone de circuitería para su control puede trabajar sincronizado a la red de donde toma la potencia reactiva para excitarse o con banco de condensadores de los cuales toma la potencia reactiva de excitación. Su funcionamiento suele ser inestable proporcional al viento si no se cuenta con buena regulación de este.

Los generadores asincrónicos permiten el funcionamiento aislado de cualquiera de los generadores del sistema sin necesidad de otras regulaciones que no sean las suyas propias U/f constantes, otra de las características de los generadores asincrónicos es que permiten su



implantación en pequeñas redes capaces de suministrarle potencia reactiva para su excitación y aportar potencia activa.

Teniendo como base el análisis anterior, la solución más sencilla consiste en una máquina con generador asincrónico capaz de convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica disponible en la red, sin dejar de reconocer sus limitaciones, se detallan algunas de sus principales características:

- ◆ *Menor volumen y peso para iguales potencias.*
- ◆ *Presenta menos pérdidas por fricción y calentamiento.*
- ◆ *Sencillez de regulación.*
- ◆ *Es posible excitarlo a través de un banco de condensadores en los casos en que se encuentre aislado*
- ◆ *Gran diversidad, lo que redundo en menores costos de instalación reparación y mantenimiento.*

En la actualidad la mayoría de turbinas eólicas del mundo utiliza un generador asíncrono trifásico (de jaula), también llamado generador de inducción, para generar corriente alterna.

Fuera de la industria eólica y de las pequeñas unidades hidroeléctricas, este tipo de generadores no está muy extendido.

1.4 Clasificación de los Aerogeneradores con Generador Asíncrono

Esta máquina en su régimen como generador, puede ser operada como:

- ◆ **Generador de inducción (asíncrono) conectado a la red**
- ◆ **Generador de inducción aislado de la red**



1.4.1 Generador de Inducción Conectado a la Red

Cuando el generador esta conectado a la red, consume de esta una corriente (I_L) igual a la de magnetización (I_m), al mismo tiempo la corriente activa (I_a) en fase con la tensión de línea (U_a) es entregada y consumida por las cargas eléctricas conectadas. La red al tener potencia infinita respecto al generador impone la frecuencia, por lo que en este caso se procura que las tensiones sean iguales. Estas actúan como compensador de reactivos debido a que la creación de su campo principal lo hace con el reactivo circulante de la línea, y puede asumir una potencia reactiva inductiva de la misma magnitud de la que puede entregar. En la (**Fig. 1.1**) se muestra lo anteriormente mencionado, cuando el interruptor P esta abierto, K se encuentra cerrado [*Voldec, 1974*].

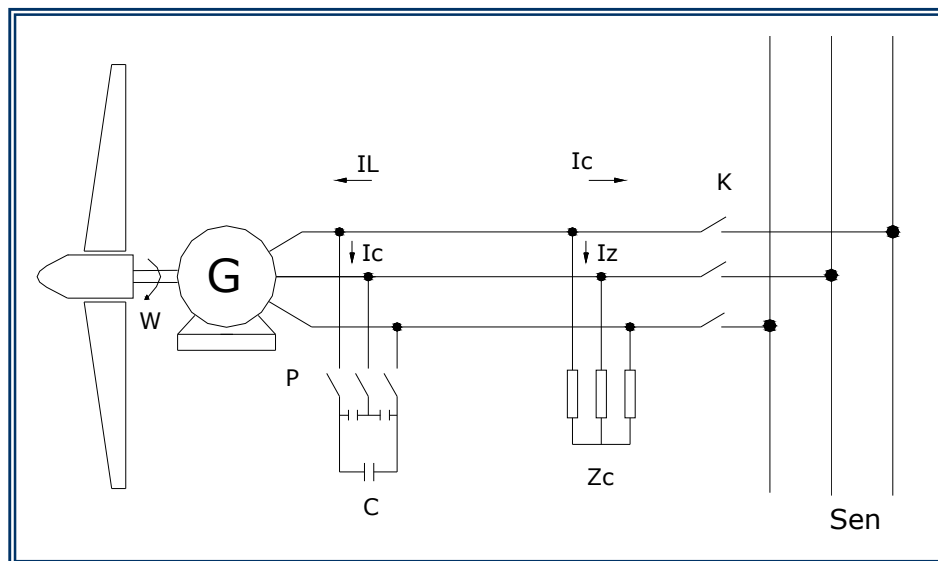


Figura 1.1 Esquema de un Aerogenerador con Generador Asíncrono, con Carga Z_c y Batería de Condensadores

Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006



1.4.2 Generador de Inducción Aislado de la Red

Si el generador trabaja conectado a una red aislada, el reactivo necesario hay que proporcionarlo con condensadores, constituyendo su excitación al regular la tensión, la velocidad asegurarse una velocidad constante o variable, dependiendo de la carga para que de esta manera mantener la frecuencia. Cuando a sus terminales se conecten a un banco de condensadores con capacidad tal que la corriente consumida por ellos (I_C) sea igual en magnitud pero desfasada en 180° respecto a la corriente de línea, se logra anular la corriente de magnetización consumida de la red en la (**Fig. 1.1**) esto se demuestra cuando el interruptor **P** esta cerrado y **K** esta abierto. Por esta razón se puede establecer:

- ◆ $I_L + I_C = 0$
- ◆ $I_L = I_C$

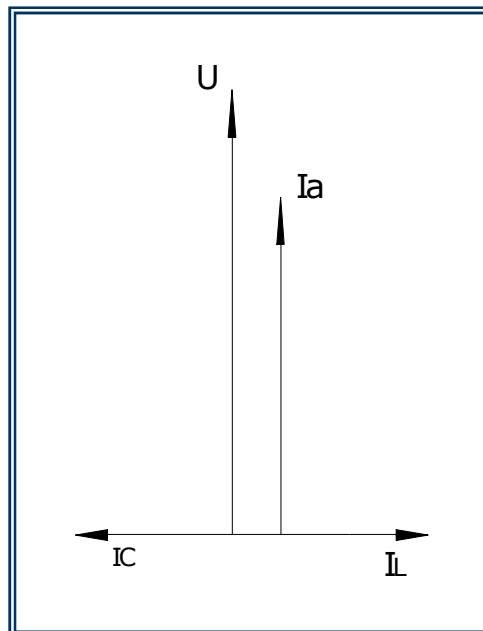


Figura 1.2 Diagrama Vectorial
Fuente: A. L. Voldek, Maquinas Eléctricas, II



Gráficamente se lo puede establecer en la (**Fig. 1.2**) donde todo lo anteriormente expuesto se lo puede demostrar vectorialmente

Una vez establecido el sistema y la carga de los condensadores, el sistema estará en condiciones de trabajar de forma autónoma y con excitación de la red en este caso la maquina consume una corriente (**$I_L = I_m$**) y de los condensadores consume una corriente (**$I_c = I_L$**).

En el caso en que el aerogenerador con generador asíncrono trabaje de forma independiente o alejado de la red se deben tomar en cuenta algunas consideraciones:

- ◆ Los condensadores serán fuentes de corriente reactiva de magnetización para el generador (**$I_c = I_m$**)
- ◆ Los condensadores consumen de la red o del generador una corriente capacitiva que desfasada en **180°** a la corriente inductiva útil del generador
- ◆ La capacidad de este banco de condensadores variara en dependencia de la carga conectada.

Si la carga es puramente activa, la potencia de los condensadores debe igualarse a la potencia reactiva de magnetización del generador. Si esta es ahora compleja R-L se necesita aumentar la potencia de estos para que cubra también la potencia reactiva de la carga. Si por el contrario, la carga entonces es R-C, se necesitará una menor potencia de éstos. De forma general la capacidad necesaria para la obtención de la tensión nominal del generador asíncrono con conexión de diferentes



tipos de carga a sus terminales estará dada por la siguiente ecuación, [Jaramillo 2004]:

$$Q_c = \frac{m_s * U_c^2}{X_c} = Q_g + Q_L = P_g * tg\varphi_g + P_L * tg\varphi_L \quad (1.1)$$

Tomándose como (**$P_{nom} = P_g = P_L$**) tenemos que:

$$C = \frac{P_{nom} * (tg\varphi_g + tg\varphi_L)}{2 * \pi * f * m * U_c^2} \quad (1.2)$$

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 condensadores

Q_L = Potencia reactiva consumida por las cargas eléctricas

C = Capacidad de los condensadores

m = número de fases del estator

f = frecuencia

1.5 Fundamentacion Teórica

Como ya se mostró en el acápite anterior el generador asíncrono es una de las mejores opciones tanto técnicas como económicas para la generación eólica, y la mejor opción cuando se trata de la generación



eólica en lugares o poblaciones que se encuentren aislados de la red, para ello es lo que se utilizara los aerogeneradores autónomos con generador asíncrono excitado con banco de condensadores. A continuación se mostrara algunos de los principales puntos en los cuales hay que tener en cuenta para el correcto funcionamiento de un generador asíncrono excitado con un banco de condensadores.

1.5.1 Proceso de Autoexcitación de un Generador Asíncrono

El proceso de autoexcitación de la maquina se produce por la carga del condensador al valor de la **F.e.m**, provocada producto al flujo remanente propio del hierro de la maquina y luego la respectiva descarga en la bobina del estator, para un mejor entendimiento de este proceso se realizara el siguiente análisis, ayudado de su esquema equivalente (**Fig. 1.3**), el cual ha sido confeccionado con parámetros obtenidos a través de los ensayos de cortocircuito y vacío.

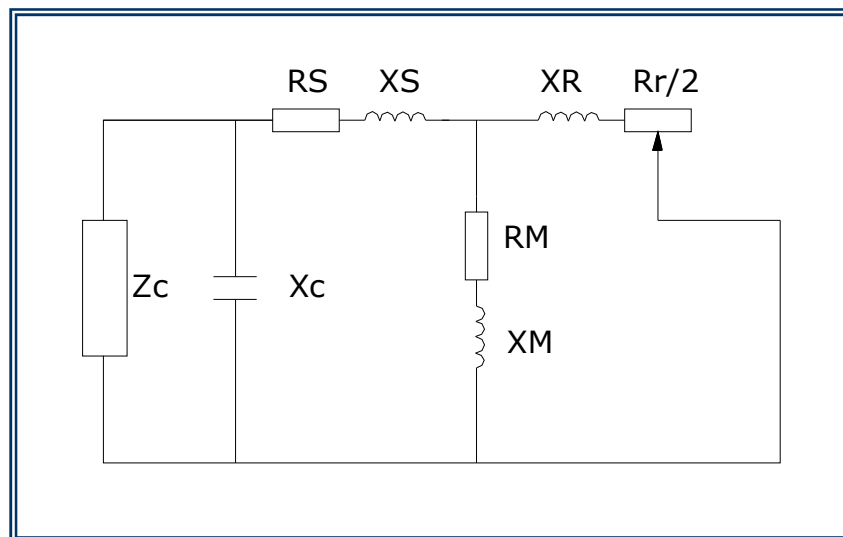


Figura 1.3 Esquema Equivalente de un Generador Asíncrono con Auto excitación con Carga Z_c y con Reactancia Capacitiva X_c
Fuente: A. L. Voldek, Maquinas Eléctricas, II



En la maquina en cuestión, se determinan magnitudes y relaciones que caracterizan su régimen de trabajo. Aquí se tendrán en cuenta parámetros como la reactancia de dispersión del rotor y del estator ($X\delta_r$, $X\delta_s$), y la reactancia de magnetización (X_m), para así determinar la capacidad de los condensadores mediante las ecuaciones siguientes.

Reactancia de los condensadores:

$$X_C = \frac{1}{\omega_s * C} \quad (1.3)$$

Corriente de los condensadores:

$$I_C = \frac{E_{rem}}{X_C} = E_{rem} * C * \omega_s \quad (1.4)$$

Potencia de los condensadores:

$$Q_C = X_C * I_C^2 \quad (1.5)$$

$$Q_C = \frac{V^2}{X_C} \quad (1.6)$$

Donde:

ω_s = Velocidad del campo del estator en rad/s

E_{rem} = Es la **F.e.m** que surge debido a las características magnéticas propias del material del cual están constituidas las maquina.



La propia característica constructiva de la maquina traerá consigo la existencia de un flujo de magnetización remanente en el hierro, que durante la rotación induce una **F.e.m** remanente (**Erem**) que provoca una corriente (**Ic**) en los condensadores, la cual circulando por el enrollado del estator de la maquina amplifica su flujo magnético. Como resultado la **F.e.m** inducida, la corriente de los condensadores aumenta.

En la (**Fig. 1.4**) se puede observar que la **F.e.m.** inducida en el estator de la maquina respecto a la corriente de magnetización (**Im**), o con respecto a la corriente de los condensadores, en forma de una curva de vacío o de magnetización [**(Xδs, Xm)*Ic**], la variación de voltaje del condensador respecto a su corriente (**Uc = Ic * Xc**) esta determinada por la recta, mostrándose a su vez el proceso de auto excitación de forma escalonada.

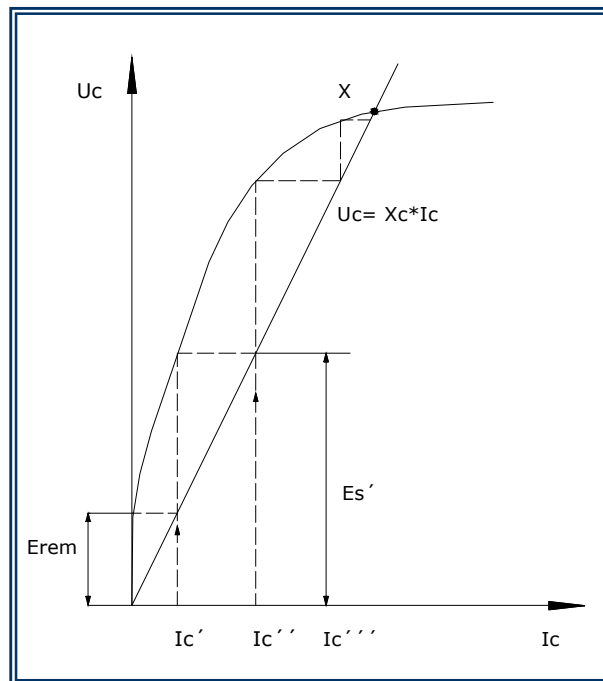


Figura 1.4 Proceso de Auto Excitación del Generador Asíncrono
Fuente: A. L. Voldek, Maquinas Eléctricas, II



Haciendo el análisis mas profundo tenemos que:

$$I_c = \frac{E_{rem}}{X_c} \quad (1.7)$$

Esta corriente inducirá en el estator una **F.e.m. "E1"** provocando a su vez una corriente (**Im**), que dará lugar a otra **F.e.m** en el estator **"E1"**, continuándose este proceso hasta que al aumentar en gran medida la saturación, la reactancia de magnetización disminuya tanto que de lugar a igualarse a la tensión del condensador (**punto x de la figura 1.4**), esta condición se puede expresar a través de la siguiente ecuación **(1.8)**:

$$(X\sigma_1 + X_m) * I_C = X_C * I_C \quad (1.8)$$

De lo anteriormente expuesto se deduce que la capacidad necesaria para la excitación del generador, para una determinada frecuencia se puede calcular de otra manera a través de de la siguiente **ecuación (1.9)**:

$$C = \left[\frac{1}{(2 * \pi * f)^2 * (L_s + L_m)} \right] \quad (1.9)$$

$L_s =$ Inductancia del estator

$L_m =$ Inductancia de magnetización



1.6 Calidad de la Energía Generada

La calidad de la energía generada en un sistema de generación autónomo o aislado esta fundamentalmente en la posibilidad que tenga este sistema de imponer frecuencia fija y tensión constante es sabido que la frecuencia es directamente proporcional al numero de vueltas del rotor y ese la impone el viento a través del multiplicador mecánico de velocidad, que si bien no es objetivo de ese trabajo se dará un breve bosquejo y especial tratamiento al caso de la regulación de la tensión generada que si es fuerte objetivo de este trabajo, los sistemas para hacer posible una regulación correcta de la frecuencia a través de la velocidad de rotación y de hecho de la naturaleza aleatoria de la velocidad del viento requiere de una especial y rigurosa investigación que fácilmente justifica un trabajo posterior, con la envergadura de la presente investigación.

1.6.1 Factores que Afectan la Frecuencia Generada

Trabajando el generador bajo condiciones nominales se puede observar como la reactancia inductiva y el voltaje inducido por el entrehierro, van a ser proporcionales a la frecuencia, mientras que la reactancia capacitiva variara inversamente. En lo que respecta al generador, en las curvas características mecánicas de la maquina como se indica en la **(Fig. 1.5)**, se muestra que el desplazamiento es pequeño y negativo. Las cargas eléctricas no pueden ser incrementadas mas allá del punto en el cual el momento desarrollado es máximo y el deslizamiento es critico, ya que en este punto la operación se vuelve inestable y la generación no es posible. La frecuencia de salida estará dada por las siguientes **ecuaciones: (1.10) (1.11) (1.12)**.



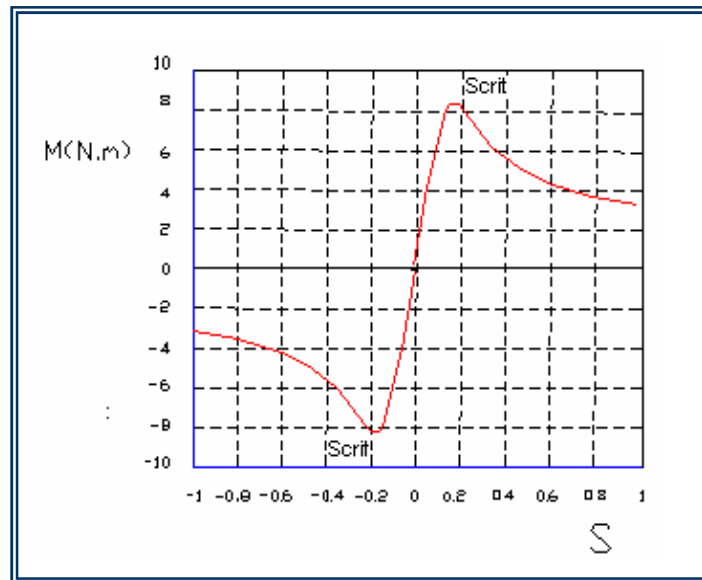


Figura 1.5 Características Mecánicas de la Máquina Asíncrona

Fuente: Jorge L. Maldonado C, Metodología para el Cálculo para un Aerogenerador Moderno de Eje Horizontal

$$n = \frac{60f}{P} \quad (1.10)$$

Aquí se aprecia que la frecuencia también depende de la velocidad de rotación en **rpm** del rotor del generador, a su vez esta tiene dependencia con el deslizamiento.

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.11)$$

$$f = \frac{p * \omega_r}{2 * \pi * (1 - s)} \quad (1.12)$$



Donde:

p = Número de polos

ω_r = Velocidad angular del rotor

s = Deslizamiento

1.6.2 Excitación y Voltaje Generado

Para que el voltaje de salida sea desarrollado cuando un generador asíncrono es sometido a una velocidad por el eje, dos condiciones deben existir: la primera que el rotor debe tener un magnetismo remanente, y la otra que la maquina debe tener suficiente excitación capacitiva conectada en sus terminales.

El núcleo del rotor no necesita estar altamente magnetizado, normalmente la operación anterior de la maquina habrá dejado con suficiente magnetismo o también (**ver fig. 1.4**), conectado con una batería a dos terminales cualesquiera del estator, se logra dicho objetivo

Para un aumento de corriente en la carga y la corriente del estator para frecuencia constante y un carácter activo, activo-inductivo de la carga la tensión del generador tiende a disminuir por dos razones:

- ◆ Por la disminución de caída de tensión ($I_1 * Z_2$) en la bobina del estator.
- ◆ Por la disminución de la **F.e.m. E_1** como resultado de la disminución del flujo magnético de la maquina. Esto se entiende como que por el aumento de la carga, disminuye la reactancia de la rama de magnetización, lo que provoca una disminución de la corriente de



magnetización. Si se mantiene constante la velocidad de rotación del rotor del generador y aumenta la carga, entonces la tensión disminuye con la disminución de la frecuencia.

Para la estabilización de la tensión en estos casos se puede regular la velocidad de rotación o la corriente en la rama de magnetización. El método más utilizado consiste en la variación de la potencia reactiva de excitación, la cual circula en la máquina desde los condensadores.



1.7 Propuesta de Esquema General

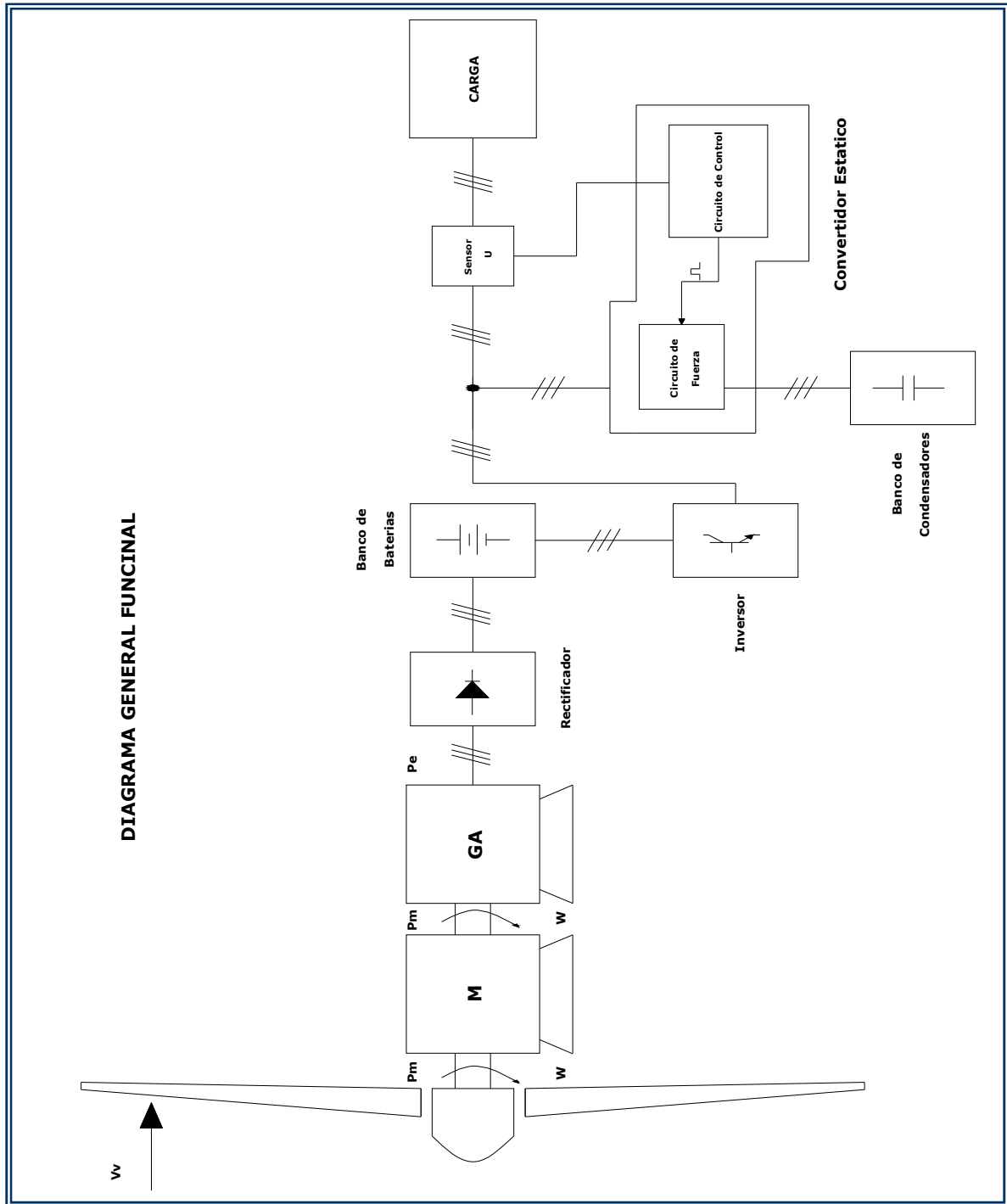


Figura 1.6 Esquema general en bloque del aerogenerador
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006

Funcionamiento:

El principio de funcionamiento del esquema propuesto consiste en censar la tensión en la carga y cuando se detecte que exista una variación de tensión, esta será la señal que activara el convertidor estático. En su primera etapa la señal del censor será la encargada de modular los pulsos necesarios para el circuito de mando que a su vez recibirá la señal de este, los modulara y amplificara y adicionalmente dará la señal de activación para el circuito de fuerza, con lo cual se podrá regular el voltaje a la entrada del banco de condensadores, que serán los encargados de regular la potencia reactiva y con ello varia la excitación del generador.

Como se trata de un sistema cuyo régimen de funcionamiento es autónomo el banco de condensadores que se utilizara para la variación de la potencia reactiva de excitación es fijo y debe estar diseñado para la máxima potencia que entregue el generador Asíncrono

El convertidor que se va a utilizar es un regulador de corriente alterna que consiste en dos componentes en antiparalelo, es decir dos transistores o dos tiristores de cualquier tipo que permitan controlar independientemente los semiciclos positivos y negativos, cada uno de ellos libremente.

Existe una gran diversidad de convertidores de corriente alterna, entre los que se encuentran:

El regulador de corriente alterna: El cual permite variar los valores de voltaje a la salida manteniendo frecuencia constante, entre estos existen varios tipos:

1. *Regulador de corriente alterna monofásico.*



- ◆ Media onda
- ◆ De onda completa
- ◆ Regulador de control parcial, también llamado regulador con transformador con tomas intermedia
- ◆ Regulador tipo puente

2. Regulador de corriente alterna trifásico

- ◆ En estrella
- ◆ En delta

Pero para el caso trifásico siempre consiste en la aplicación de convertidores monofásicos por cada fase

1.8 Características de los Reguladores de Alterna - Alterna

Estos dispositivos están formados por dos llaves electrónicas estáticas conectadas en antiparalelo como se muestra en la (**Fig. 1.7**).

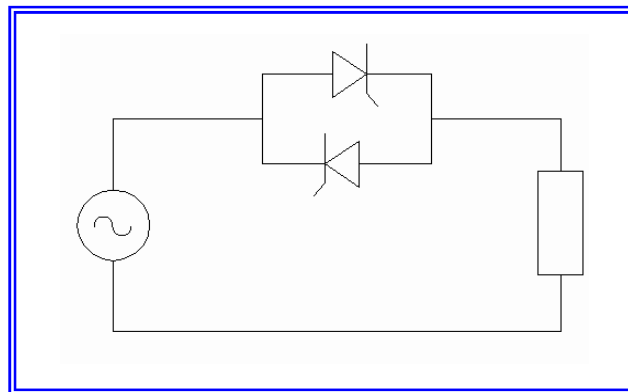


Figura 1.7 Regulador de Onda Completa

Fuente: Colectivo de Autores, Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia II



La regulación de voltaje alterno en estos dispositivos se logra 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. La expresión de voltaje de salida del regulador se obtiene a través del trabajo con operaciones matemáticas, como matrices y desarrollos en series de Fourier, esta es **ecuación (1.13)**, [Colectivo de Autores 1991]:

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K - \omega_E)t - \delta] + \text{resto}$$

(1.13)

Como se evidencia, esta expresión tiene componentes cuya pulsación de salida es igual a la pulsación 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 de entrada hay que acudir al tercer término de la ecuación, ya que en segundo término nunca se cumplirá que ($\omega_K + \omega_E = \omega_E$) puesto que ω_E siempre es distinto de cero, luego para obtener que la frecuencia de salida sea igual a la de entrada se tiene que acudir al tercer sumando de la ecuación donde debe de cumplirse que ($\omega_K - \omega_E = \omega_E$) por tanto ($\omega_K = 2\omega_E$), de aquí se deduce que el periodo de conmutación que se escoge generalmente para el funcionamiento de los reguladores sea la **ecuación (1.14)** [Colectivo de Autores 1991]:



$$\frac{2\pi}{T_K} = 2 \frac{2\pi}{T_E}$$

O sea:

$$T_K = \frac{T_E}{2} \quad (1.14)$$

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 negativo, con un ángulo de desfasaje (α) pasando posteriormente ambos al estado de bloqueo de forma natural cuando la intensidad de carga se invierte (paso por cero).

1.9 Formas de Implementación

1.9.1 Regulador con Control por Fase

En la (**Fig. 1.7**). Se explica como se logra en la práctica generar esta función de comportamiento del interruptor. Inicialmente se dispara el tiristor **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 tiristor **T1**, este 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 esta dado por la **ecuación (1.13)**.

Como se puede observar este circuito tiene la propiedad de controlar ambos semiciclos y por esta razón es llamado regulador de onda completa y la forma de onda a su salida esta representado en la **(Fig. 1.8)**.

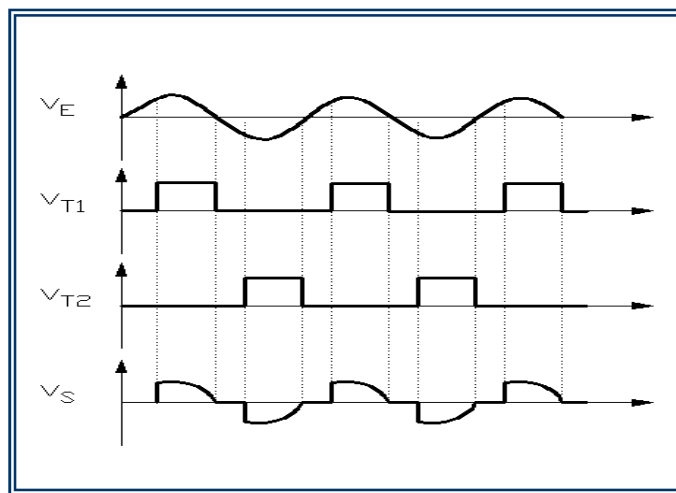


Figura 1.8 Formas de Onda

Fuente: Colectivo de Autores, Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia II

De la forma descrita anteriormente se logra mediante estos dispositivos variar los valores medios y eficaces de las ondas sinusoidales. Esta propiedad es muy utilizable en diferentes aplicaciones donde se desee accionar con la variación de tensión. En ocasiones también es posible realizar las regulaciones conectando un tiristor y un diodo en antiparalelo **(Fig. 1.9)**, controlándose un semiciclo y dejándose intacto el otro.



1.9.2 Regulador Semicontrolado

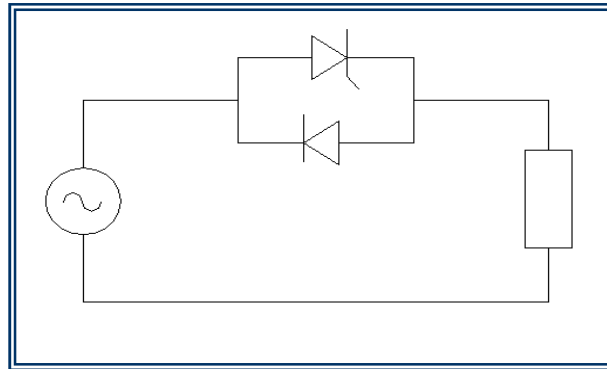


Figura 1.9 Regulador Semicontrolado Control por Fase
Fuente: Colectivo de Autores, Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia II

En este caso la regulación se realizara solamente sobre un semiciclo de la onda de entrada por este motivo este circuito es conocido como regulador de media onda. A la salida de este se obtiene una onda asimétrica, en el cual el valor es distinto de cero, la forma de onda obtenida a la salida se observa en la **(Fig. 1.10)**.

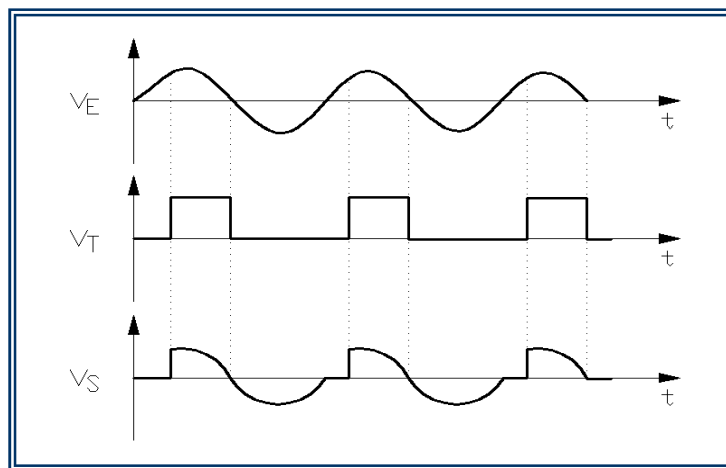


Figura 1.10 Formas de Onda
Fuente: Colectivo de Autores, Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia II

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 (1.13)**, y se obtiene:

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos \delta \quad (1.15)$$

Como apreciamos en esta expresión solo varió el tercer término con respecto a la **ecuación (1.13)**, esto se debe a que para obtener el valor medio se iguala $\omega_K = \omega_E$

1.9.3 Regulador por Ciclos Completos

En este caso ω_K es mucho menor que ω_E por tanto, $T_K \gg T_E$ o sea, la frecuencia de conmutación de los tiristores es mucho menor que la frecuencia de la onda de trabajo.

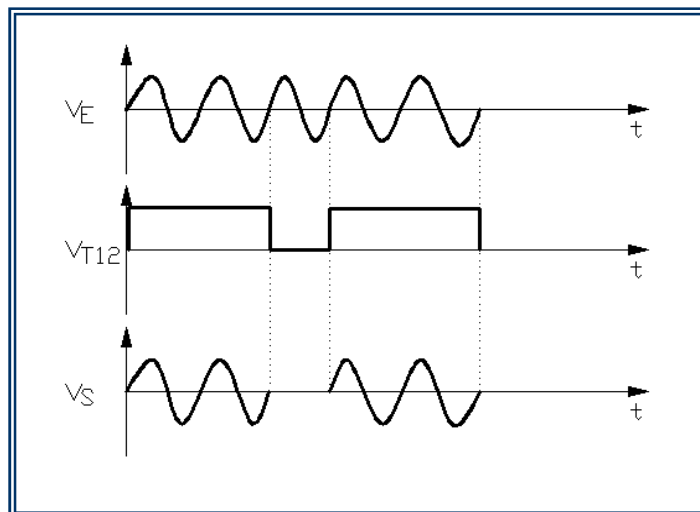


Figura 1.11 Regulador por Ciclos Completos

Fuente: Colectivo de Autores, *Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia*



Este tipo de regulación representado en la **(Fig. 1.11)**, 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. 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 tenga 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.

1.10 Métodos de Regulación

Partiendo de la ecuación fundamental de los Convertidores **ecuación (1.13)**, existen varios métodos para la regulación de los convertidores, a continuación presentaremos dos métodos de regulación, considerados los mas importantes

$$V_{sj} = \frac{Vm}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{Vm}{\pi} \text{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{Vm}{\pi} \text{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K - \omega_E)t - \delta] + \text{resto}$$

(1.13)

1. **Caso $\omega_K = \omega_E$ (Envolvente)**
2. **Caso $\omega_K \gg \omega_E$ (Portadora)**



1.10.1 ($\omega_k = \omega_E$) Modulación de un Impulso por Semiperiodo

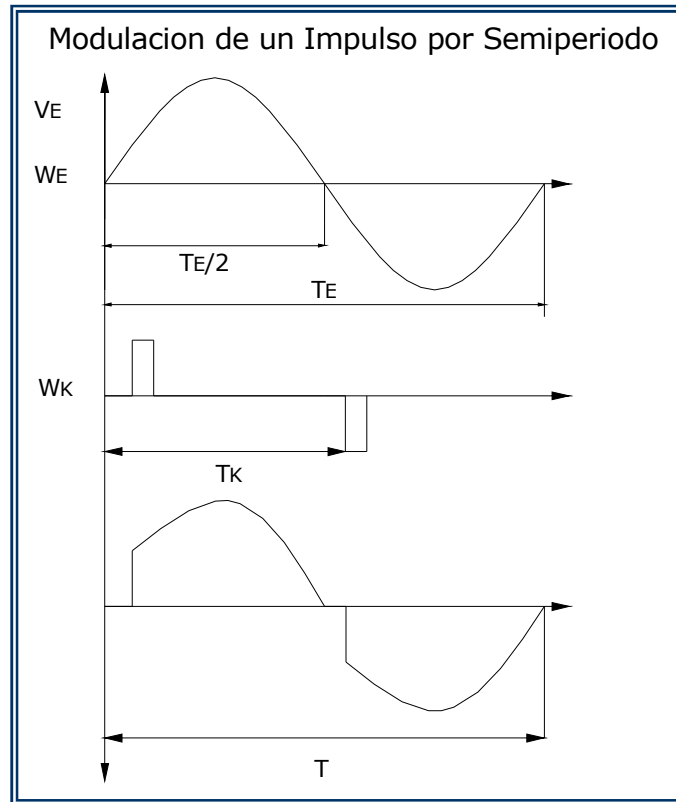


Figura 1.12 Modulación de un Impulso por Semiperiodo
Fuente: Colectivo de Autores, Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia II

Ventajas

- ◆ Circuito de mando sencillo
- ◆ Fácil implementación



Desventajas

- ◆ Baja calidad en la onda de salida
- ◆ Gran cantidad de armónicos, principalmente impares de orden de (3,5,7,11)

Matemáticamente se puede expresar lo siguiente:

($\omega_K = \omega_E$)

$$V_{sj} = \frac{Vm}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K - \omega_E)t - \delta] + \text{resto}$$

$$V_{sj} = \frac{Vm}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} [\cos 2\omega_E t + \delta] + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos[0 - \delta] + \text{resto}$$

$$V_{sj} = \frac{Vm}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} [\cos 2\omega_E t + \delta] + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\cos 0 * \cos \delta) + (\operatorname{sen} 0 * \operatorname{sen} \delta)] + \text{resto}$$

$$V_{sj} = \frac{Vm}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} [\cos 2\omega_E t + \delta] + \frac{Vm}{\pi} \operatorname{sen} \frac{\pi}{k} \cos \delta + \text{resto}$$

(1.16)



1.10.2 ($\omega_K \gg \omega_E$) Modulación por Impulsos Múltiples

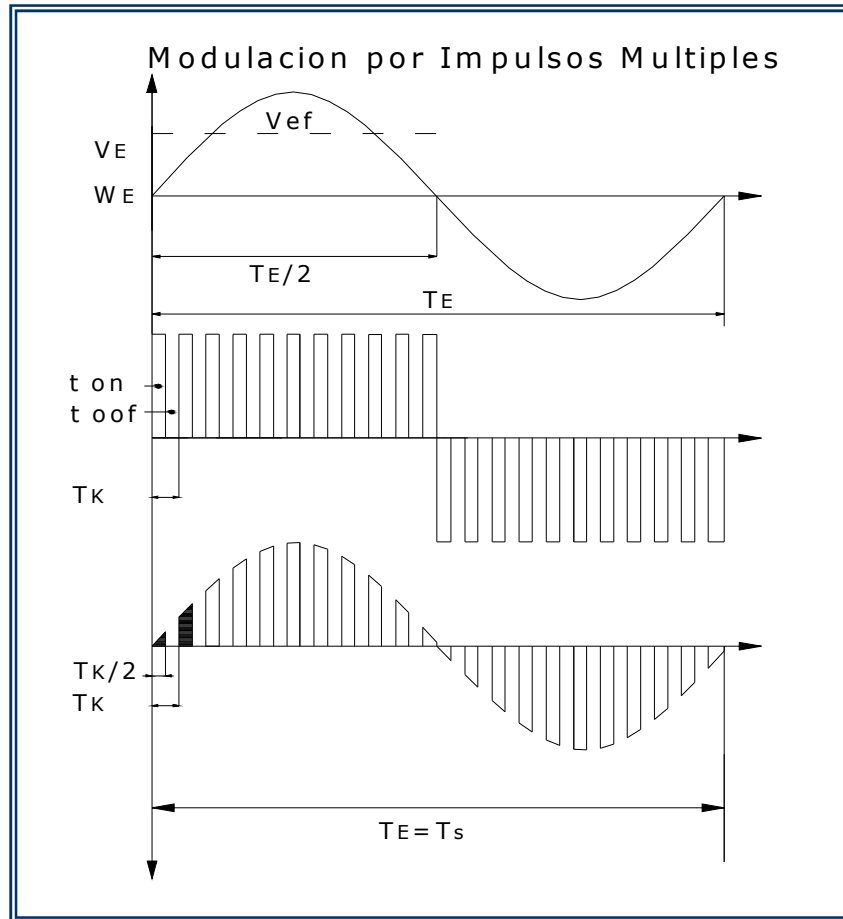


Figura 1.13 Modulación de un Impulsos Múltiples

Fuente: Colectivo de Autores, *Electrónica Industrial, Componentes Circuitos y Sistemas de Potencia II*

Esta regulación representada en la (**Fig. 1.12**), se logra haciendo $\omega_K \gg \omega_E$ por lo que $T_K \ll T_E$ 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. Es de destacar que los valores medios y eficaces de esta, estarán en

dependencia con la cantidad de pulsos que conformarán la misma. Este tipo de regulación también es poco utilizado en la práctica. Debido a que para su funcionamiento son necesarios tiristores 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 encarecen y complican considerablemente el sistema. Sin embargo, como una forma de evitar usar los circuitos adicionales de bloqueo, y teniendo en cuenta que esta forma de regulación tiene la ventaja de 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.

Matemáticamente:

$$(\omega_K \gg \omega_E)$$

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K - \omega_E)t - \delta] + \text{resto}$$

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K t - \omega_E t) - \delta] + \text{resto}$$

$$V_{sj} = \frac{V_m}{k} \cos(\omega_E t + \delta) + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos[(\omega_K + \omega_E)t + \delta] + \frac{V_m}{\pi} \operatorname{Sen} \frac{\pi}{k} \cos \delta + \text{resto}$$

(1.17)

Donde:

$\omega_S =$ Pulsación de Salida

$\omega_E =$ Pulsación de Entrada



$V_m =$ Voltaje Medio

$\delta =$ Periodo Útil

$$K = \frac{1}{\delta} \quad (1.18)$$

$$K = \frac{T_K}{t_{on}} \quad (1.19)$$

$$f_K \gg f_E \Rightarrow T_E \gg T_K$$

$$T_E = T_S \Rightarrow f_s = f_E$$

$$f_E = 60\text{Hz}$$

$$W_E = 2\pi * f_E \quad (1.20)$$

$$W_E = \frac{2\pi}{T_E} \quad (1.21)$$

$$W_K = \frac{2\pi}{T_K} \quad (1.22)$$

$$V_{ef} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}} \quad (1.23)$$



$$V .Entrada = \frac{1}{T} \int_0^T V \max \text{ Sen} \omega t d\omega t$$

$$V .Entrada = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} V_{ef} \text{Sen} \omega t d\omega t$$

$$V .Entrada = \frac{\sqrt{2} V_{ef}}{2\pi} \int_0^\pi \text{Sen} \omega t d\omega t$$

$$V .Entrada = \frac{\sqrt{2} V_{ef}}{2\pi} [-\text{Cos} \omega t]_0^\pi$$

$$V .Entrada = \frac{\sqrt{2} V_{ef}}{2\pi} [-(\text{Cos} \pi - \text{Cos} 0)]$$

$$V .Entrada = \frac{\sqrt{2} V_{ef}}{2\pi} [-(-1 - 1)]$$

$$V .Entrada = \frac{\sqrt{2} V_{ef}}{2\pi} [2]$$

$$V .Entrada = \frac{\sqrt{2} V_{ef}}{\pi} \tag{1.24}$$

$$V .Salida = \frac{1}{T_K} \int_0^{T_K} V \max \text{ Sen} \omega t d\omega t \tag{1.25}$$



Es preciso decir que todas las formas de regulación, que basan su funcionamiento en el uso de llaves electrónicas, tiene el inconveniente de que a su salida no se obtenga una onda sinusoidal pura, sino que la misma estará acompañada por la presencia de varios armónicos. Por lo que es recomendable usar a la salida de estos reguladores filtros contra armónicos, si estos están por encima de los niveles reglamentados.



1.11 Conclusiones

- ◆ *En la actualidad los aerogeneradores autónomos con generador asíncrono, son una de las soluciones más viables para la electrificación de zonas rurales, que se encuentren alejadas de la red.*
- ◆ *Que el control por Impulsos múltiples es uno de los métodos más viables para la regulación del convertidor estático, debido a que posee grandes ventajas comparadas con otros métodos de regulación.*
- ◆ *Que las características del regulador de onda completa van de acuerdo a las necesidades de este tema de investigación*



Capítulo II:

Cálculo y Simulación

- ✦ ***Introducción***
- ✦ ***Diseño del Convertidor***
- ✦ ***Calculo del Circuito de Mando***
- ✦ ***Cálculo del Circuito de Fuerza***
- ✦ ***Selección de los componentes Eléctricos***
- ✦ ***Simulación y Obtención de formas de Ondas***
- ✦ ***Conclusiones***



2.1 Introducción

En la actualidad el uso de los convertidores de potencia esta teniendo un gran auge por la gran posibilidad que estos permiten, para el control de determinadas operaciones que son de gran importancia y de considerable complejidad en el desarrollo industrial.

En el presente capítulo se hará una descripción del funcionamiento del convertidor estático para el control de la excitación de un generador asíncrono en aerogeneradores autónomos, tanto en su circuito de mando como en su circuito de fuerza y de todos los elementos que lo conforman, el cálculo y selección de los componentes del mismo, y su respectiva simulación de cada uno de ellos.

2.2 Diseño del Convertidor

En este trabajo se va a utilizar como convertidor un regulador de corriente alterna o variador de corriente alterna, específicamente un regulador de onda completa, con elementos de conmutación natural, para facilitar el diseño del circuito de mando y lograr la modulación sin dificultad, para ello se deben utilizar componentes rápidos, potente y modernos como los IGBTs, tales como se muestran en la **(Fig. 1.7)**.

El método electrónico seleccionado es el de conmutación por impulsos múltiples. **(Fig. 1.21)**, debido a sus ventajas descritas en el capítulo anterior.

Otra razón por la que se escoge este tipo de regulador es por que permite variar la corriente alterna de entrada con voltaje constante, en corriente alterna con voltaje variable pero a la misma frecuencia, y como



el objetivo de este trabajo es variar el voltaje a la entrada del banco fijo de condensadores, para con ello variar la corriente de excitación en el generador asíncrono, este tipo de regulador es una de las mejores opciones para el cumplimiento de dicho objetivo. A continuación se presenta el diagrama en bloques del Convertidor Estático y se realiza una descripción del circuito, es decir del funcionamiento de cada elemento que lo conforma.



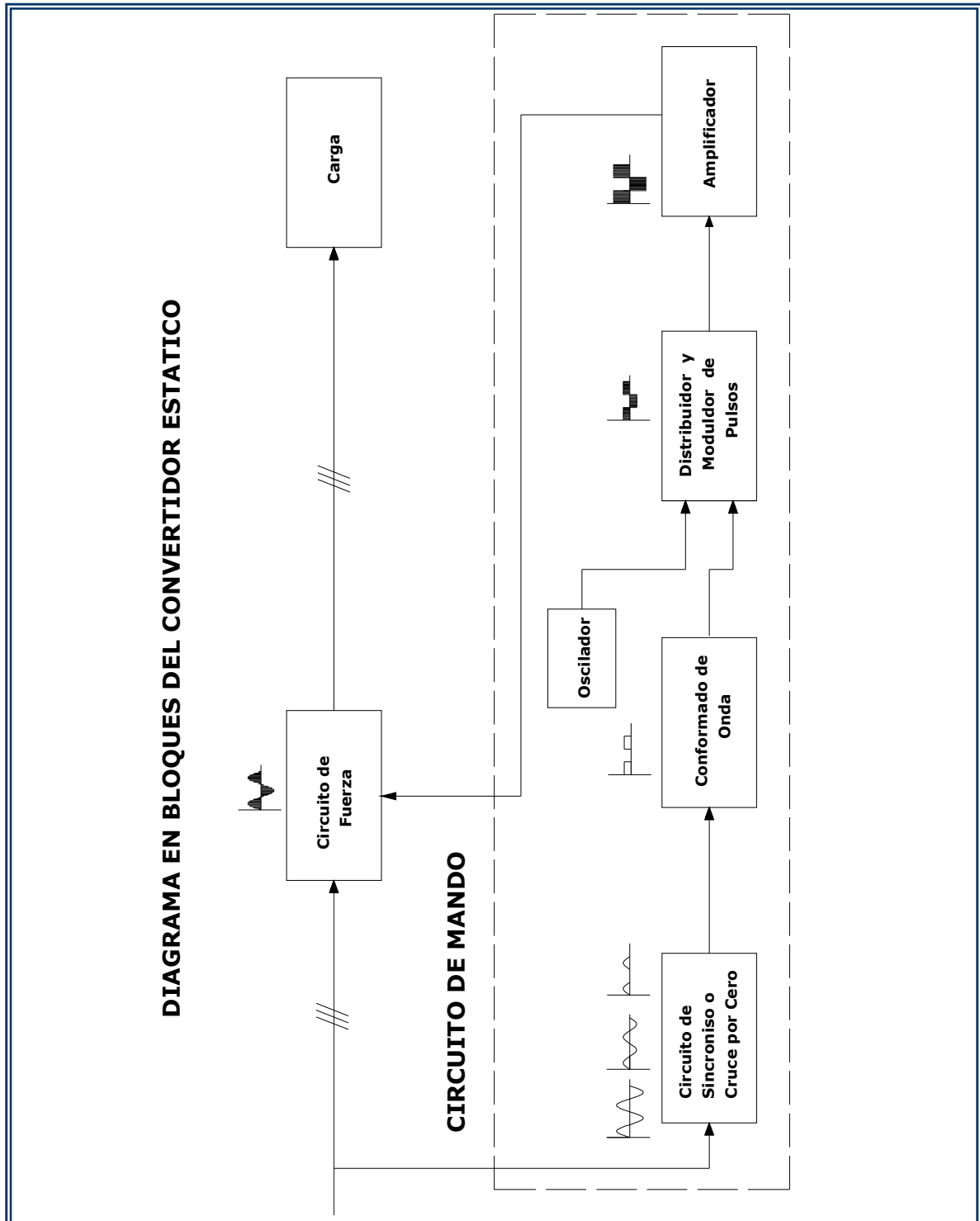


Figura 1.6 Diagrama en Bloques del Convertidor Estático
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006



En la **(Fig. 2.1)** y en el **Anexo 1**, se muestra el diagrama en bloques y el esquema del circuito de Mando y Fuerza respectivamente, el cual consta de un detector de cruce por cero que se alimenta directamente de la tensión de la red, la que es reducida a través de un transformador de potencial, y luego llega a un diodo que deja pasar los semiciclos positivos hasta un transistor bipolar **NPN**, quien está alimentado por el colector por una fuente de corriente continua de **12V** y al recibir un pulso por la base el transistor conduce durante el tiempo en que recibe el pulso y como consecuencia de esto a la salida se obtiene un pulso cuadrado que llega hasta las compuertas **AND1**, luego esta señal es desfasada o negada por la compuerta **NOT** hasta la compuerta **AND2**, estas compuertas constituyen el bloque modulador y distribuidor de pulsos, cuya función es la de mezclar el tren cuadrado de pulsos que proviene del circuito conformador de onda, en esta etapa las compuertas **AND** son ametralladas por una frecuencia variable **(180Hz-1kHz aproximadamente)**, provenientes de sensor de Voltaje, una vez que se ha establecido los dos canales a través de una compuerta **NOT**, se obtendrán dos pulsos de alta frecuencia pero desfasados **180°** uno del otro, dicho de otra forma se obtendrán dos pulsos de igual duración al de un semiperiodo pero cada pulso a la frecuencia que imponga el sensor de voltaje.

Una vez establecido el tren de pulsos de alta frecuencia, los dos canales establecidos irán a sus respectivos óptoacopladores para mantener el aislamiento galvánico obtenido en el transformador de cruce por cero o sincronismo y así mantener aislado el circuito de fuerza del circuito de mando y evitar daños generados en caso de de averías y de ahí a un circuito amplificador del cual se obtiene la señal para los **IGBTs** que son parte del circuito de fuerza, que son los encargados de trozar la onda de voltaje a la frecuencia que imponga el circuito de mando.



Para la obtención de un sistema trifásico se introduce un circuito desfasador el cual consiste en desfasar la onda obtenida a la salida del transformador en **120°** eléctricos y luego a esta onda se la vuelve a desfasar **120°** mas para completar el sistema trifásico, la señal que se obtiene a la salida de estos dos desfasadores es enviada, cada una independientemente al resto de los circuitos que componen el circuito de mando. Luego el principio de funcionamiento en el circuito generador de pulsos, en el circuito modulador y distribuidor de pulsos y amplificador de pulsos es idéntico a lo ya descrito anteriormente.

2.3 Calculo del Circuito Mando

Como ya se explicó en el acápite anterior, el circuito de mando esta compuesto por un circuito detector de cruce por cero, circuitos generadores de pulsos, circuitos moduladores y distribuidores de pulsos, circuitos amplificadores y circuitos desfasadotes de onda. A continuación se describirán el funcionamiento individual, calculo y selección de cada un de ellos, y se presentaran gráficos de las formas de onda que se obtienen, además se representara una tabla con los elementos que los conforman en su configuración de circuito trifásico.

2.3.1 Circuito de Sincronismo o de Cruce por Cero

La **(Fig. 2.2)** corresponde al circuito detector de sincronismo o de Cruce por Cero, este está conformado por un transformador monofásico con una relación de transformación **(220/20) Voltios**, el cual está conectado directamente de una fase de la red, esto con el propósito fundamental de lograr un aislamiento entre la red y el aerogenerador del resto de los componentes del circuito de mando, previniendo que pueda



ocurrir alguna anomalía en el sistema de generación (*cortocircuito, sobre tensiones, etc.*), la segunda razón es la de disminuir el nivel de tensión, con la cual va a trabajar en el circuito conformador de onda así como el resto de circuitos que se alimentan de este.

A la salida del transformador se ha colocado un **Diodo (National 1N4152)** y una resistencia de **10 K Ω** con el fin de que deja pasar los semiciclos positivos, los cuales llegaran hasta el circuito conformador de onda.

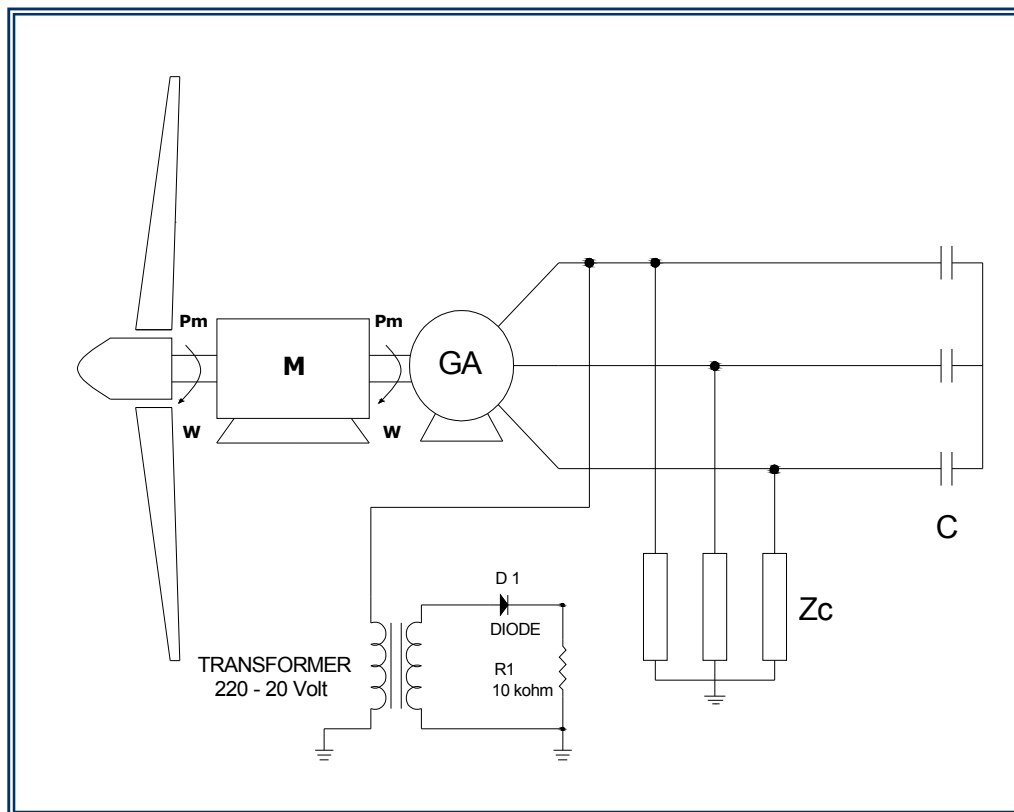


Figura 2.2 Circuito de Sincronismo o de Cruce por Cero
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006



Las formas de onda tanto a la entrada del transformador como a la salida se muestran en la **(Fig. 2.3)**, donde la sinusoide de color Rojo representa el voltaje de **220V** a la entrada del transformador y la sinusoide de color Azul representa el voltaje a la salida del transformador, por otra parte, en la **(Fig. 2.4)**, se muestra la onda sinusoidal de color rojo a la salida del transformador y una vez que ha pasado por el diodo, onda color Azul. En la **(Tabla 2.1)** se incluyen también los diodos de las fases B y C ubicados en la salida de los circuitos desfasadores.

TABLA (2.1) COMPONENTES DEL CIRCUITO DE CRUCE POR CERO

Nº	Componentes	Denominación	Cantidad
1	Transformador de potencial	(220-20) Voltios	1
2	Diodo	National 1N4152	1
3	Diodo	National 1N3612GP	1
4	Diodo	National 1N4004GP	1
5	Resistencias	10 kΩ	1
6	Resistencias	5 kΩ	2

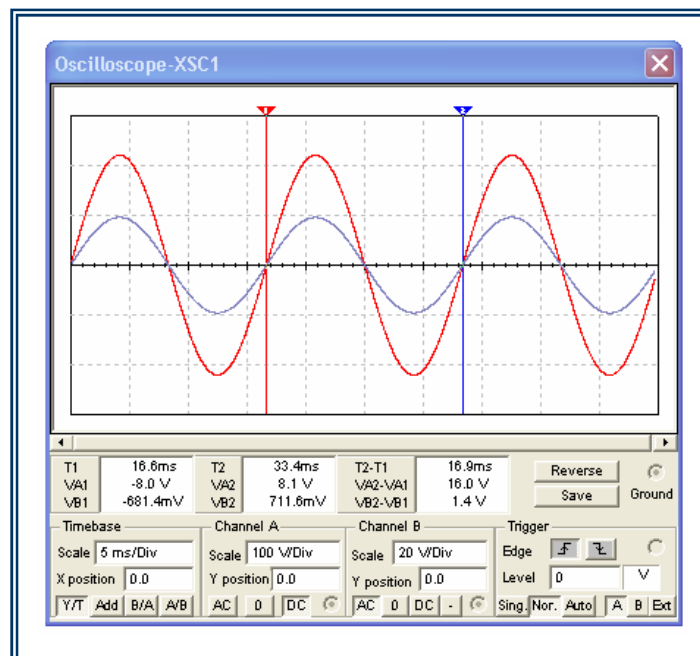


Figura 2.3 Forma de onda a la entrada y salida del transformador



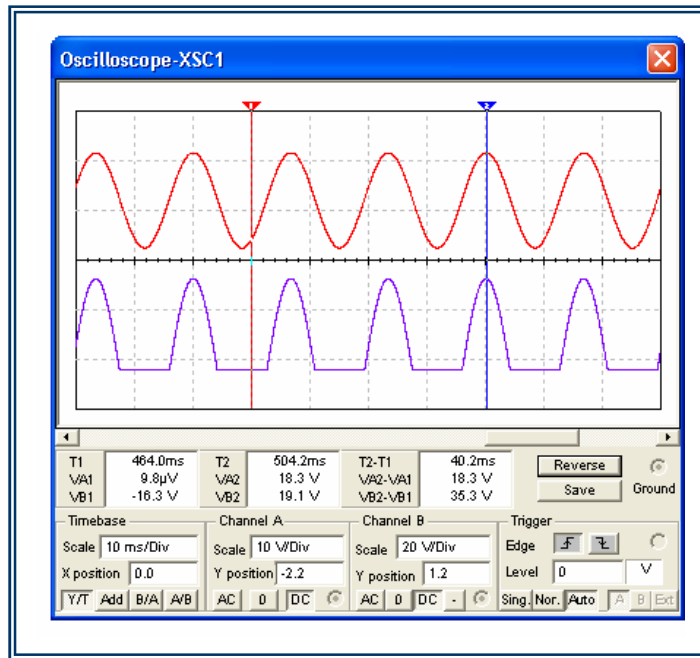


Figura 2.4 Forma de onda a la salida del circuito de sincronismo.

La tensión de salida en el detector de cruce por cero será **ecuación (2.1)**:

$$U_d = 0.45 * U_a \quad (2.1)$$

$$U_d = 0.45 * 20V$$

$$U_d = 9V$$

Por su parte el diodo debe ser capaz de soportar una corriente igual ha:

$$I_d = I_c$$



Donde:

I_c = Es la corriente en la carga en este caso la que demanda la resistencia.

$$I_d = U_d / R_c \quad (2.2)$$

$$I_d = 9V / 10K\Omega$$

$$I_d = 0.90mA$$

En estado de bloqueo durante el semiciclo negativo el diodo tiene que soportar toda la tensión de bloqueo o pico inverso durante un tiempo igual a un semiperiodo

$$V_{INV} = \sqrt{2} U_a \quad (2.3)$$

$$V_{INV} = 1.41 * 20$$

$$V_{INV} = 22,8V$$

2.3.2 Circuito Conformador de Onda

El circuito conformador de onda esta representado por la (**Fig. 2.5**), consta de un *Transistor NPN*, una resistencia de **10 K Ω** y una batería de **12 Voltios**, la función de este circuito es la de conformar una onda cuadrada, esto sucede al recibir el *Transistor* un pulso por la base, el empieza a conducir durante el tiempo en que recibe el pulso de sincronismo, una vez que cesa vuelve a su estado natural y como



consecuencia de esto a la salida del *transistor* se obtendrá un pulso cuadrado el cual llega hasta el circuito distribuidor y modulador de pulsos.

El cálculo de la resistencia que se coloca a la entrada del colector del *Transistor* se la realiza de la siguiente manera:

$$R = \frac{V_{cc} - V_{ceSat_T}}{I_{c_T}} \quad (2.4)$$

Donde:

V_{cc} = Tensión de la batería

V_{ceSat_T} =Tensión Colector-Emisor, Saturación del Transistor

I_{c_T} =Corriente de colector del Transistor

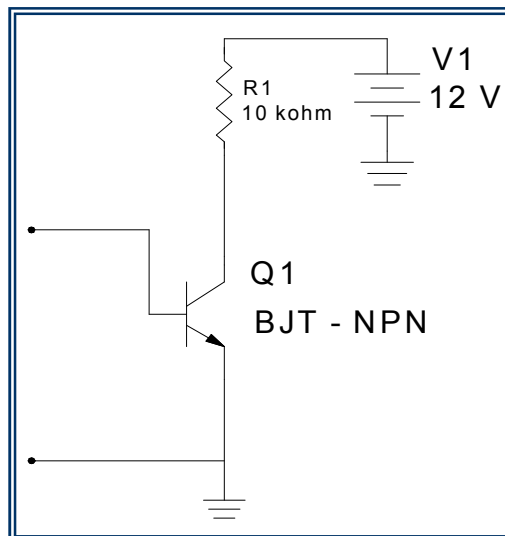


Figura 2.5 Circuito Conformador de Onda
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006



Cabe decir que batería tanto de este circuito como del resto de los circuitos serán las mismas que se utilicen en el banco de apoyo cuando exista ausencia de viento, por lo que no habrá necesidad de baterías extras para los circuitos del convertidor estático.

A continuación se muestra la forma de onda a la salida del Circuito Conformador de Onda (**Fig. 2.6**), y el listado de componentes, así como la cantidad de cada uno de ellos, que se utilizarán en el circuito trifásico (**Tabla 2.2**).

TABLA (2.2) COMPONENTES DEL CIRCUITO CONFORMADOR DE ONDA

Nº	Componentes	Denominación	Cantidad
1	Transistor NPN		3
2	Resistencias	10 kΩ	3
3	Baterías	12 Volt	3

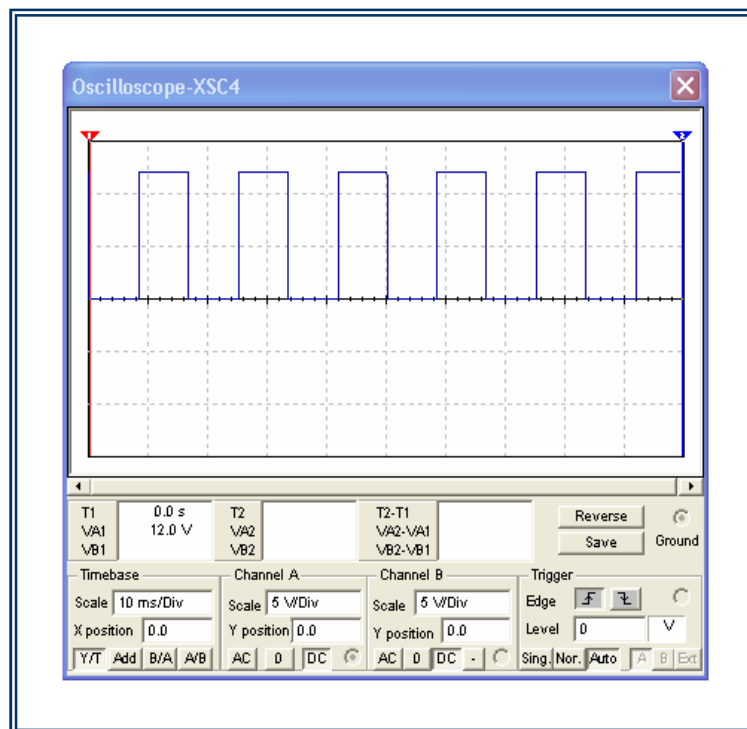


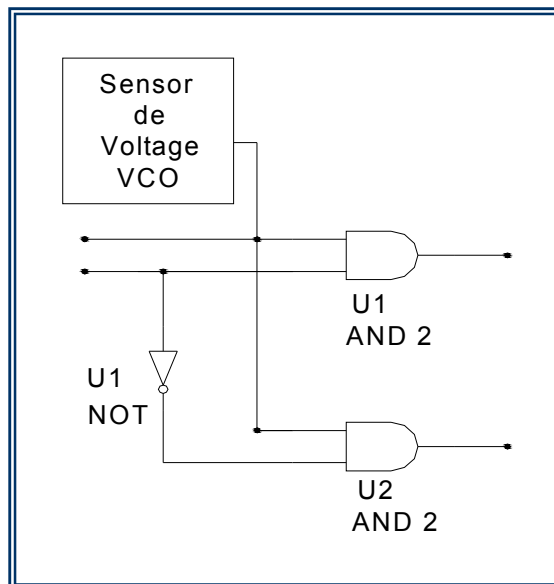
Figura 2.6 Forma de Onda en el Circuito.



2.3.3 Circuito Distribuidor y Modulador de Pulsos

En la **(Fig. 2.7)** se muestra el circuito distribuidor y modulador de pulsos el cual consta de dos compuertas **AND** de dos entradas cada una y una compuerta **NOT**. Estas compuertas deben tener ciertas características como: la de tener gran rapidez, un bajo consumo y una gran fiabilidad, características que son necesarias debido a que estarán sometidas a grandes frecuencias, según lo imponga el sensor de voltaje que es el encargado de imponer la frecuencia a la que dichas compuertas trabajaran en el circuito.

La **(Fig. 2.8)** representa la forma de onda que se obtiene a la salida del circuito donde se observa que los pulsos cuadrados provenientes del circuito conformador de pulsos se encuentran fraccionados y desfasados en **180°**, para obtener una señal tanto en el semiciclo positivo como en el semiciclo negativo en el circuito de fuerza.



*Figura 2.7 Circuito conformador y Modulador de Pulsos
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006*



En la **(Tabla 2.3)**, se indica el listado de los materiales con los cuales esta conformado este circuito trifásico.

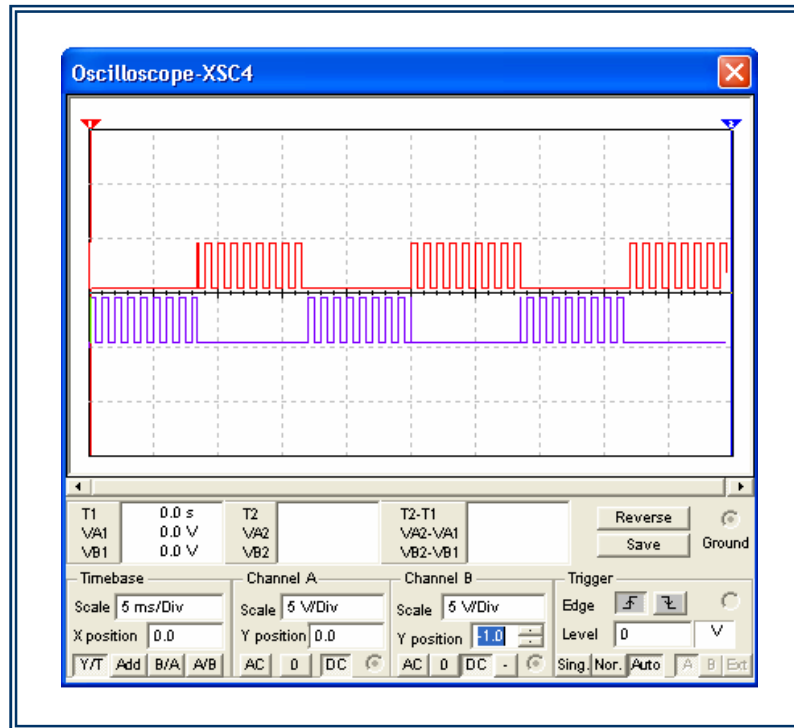


Figura 2.8 formas de onda del Circuito Distribuidor y Modulador de Pulsos

TABLA 2.3 COMPONENTES DEL CIRCUITO DISTRIBUIDOR Y MODULADOR DE PULSOS

Nº	Componentes	Familia	Denominación	Cantidad
1	Compuertas AND 2 ent.	TTL	7408	6
2	Compuertas NOT	TTL	7407	3

2.3.4 Circuito Amplificador

El circuito Amplificador esta representado en la **(Fig. 2.9)**, consta de dos etapas, en su primera etapa se encuentran dos óptoacopladores,



uno para cada semiciclo y una resistencia de **10KΩ** , además una batería de **12 Voltios**. Para el cálculo de la resistencia se utiliza la siguiente **ecuación (2.5)**:

$$R = \frac{V_{cc} - V_{ceSat_{Opto}}}{I_{c_{Opto}}} \quad (2.5)$$

Donde:

V_{cc}= Tensión de la batería

V_{ceSat_{opto}}=Tensión Colector-Emisor, Saturación del Transistor

I_{c_{Top_{to}}}=Corriente de colector del Transistor

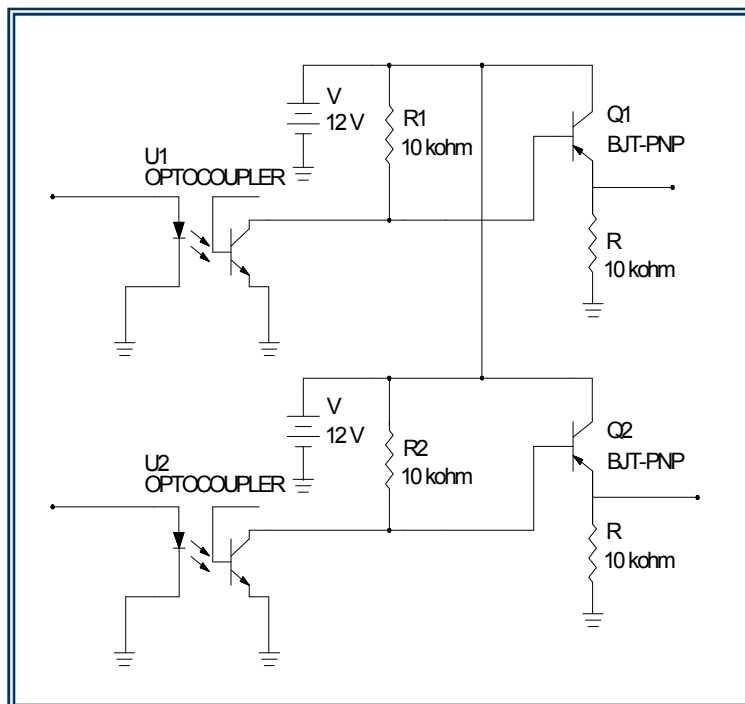


Figura 2.9 Circuito Amplificador
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006



En su segunda etapa se encuentra un transistor bipolar **PNP** que es el encargado de corregir el desfase que produce el optoacoplador y además es el que amplifica los pulsos, una batería de **12 Voltios** y una resistencia de **10K Ω** .

La (**Fig. 2.9**) representa la forma de onda antes y después de la etapa de amplificación donde se obtiene que la onda entra con un voltaje máximo de **5 voltios** a la entrada del circuito y a la salida se obtiene un onda con la misma frecuencia pero amplificada hasta unos **12 voltios**. En la (**Tabla 2.4**), se indican los componentes con los que esta formado el circuito trifásico de amplificación.

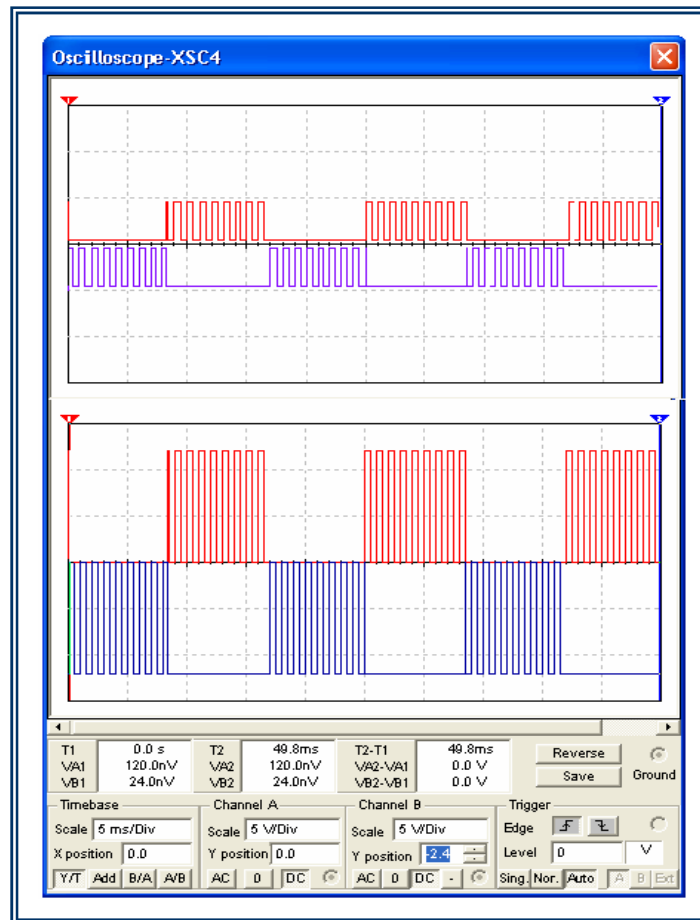


Figura 2.8 Formas de Onda del Circuito Amplificador



TABLA (2.4) COMPONENTES DEL CIRCUITO AMPLIFICADOR

Nº	Componentes	Denominación	Cantidad
1	Optóacoplador		6
2	Transistor Bipolar PNP		6
3	Resistencias	10KΩ	12

2.3.5 Circuito Desfasador

El circuito desfasador no es mas que un circuito capaz de desfasar una onda sin cambiar su amplitud y frecuencia, pero cambiando su ángulo de fase en un valor preestablecido.

Como en este caso el objetivo es el de desfasar la onda de tensión en **120°** eléctricos y luego nuevamente desfasarla en **120°** mas, con el propósito de establecer un sistema trifásico, partimos de la siguiente **ecuación (2.6)** en donde θ es el ángulo de fase y se obtiene de la siguiente forma. [Santos López, 2004]

$$\theta = 2 \operatorname{arcTan} 2\pi f R_i C_i \quad (2.6)$$

Donde:

$$R_i = R3$$

$$C_i = C1$$

$$R_{ip} = R4$$

La (**Fig. 2.9**) muestra el circuito defasador el cual consta de un **AO** Amplificador Operacional, tres resistencias, una resistencia variable o potenciómetro y un condensador, a continuación presentaremos la forma de cálculo de los distintos elementos que componen el circuito



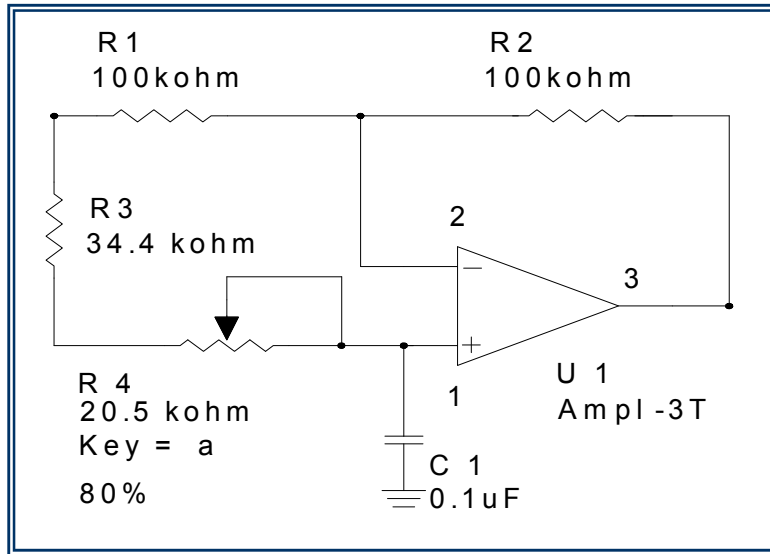


Figura 2.9 Circuito Desfasador
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006

Las resistencias **R1** y **R2** deben ser iguales y se puede utilizar valores desde **10** a **220 kΩ**, el ángulo de defasaje depende exclusivamente de **R3** y **C1**, se selecciona **R1 = R2=100 kΩ**, estas resistencias permiten corrientes medias para el funcionamiento del operacional, para determinar la resistencia de entrada para el desfase de **120°**, se toma **C1 = 0.1uF** y se determina su valor para la frecuencia superior a **f=80 Hz**, de la **ecuación (2.6)** se deduce que: [Santos López, 2004]

$$R3_{\min} = \frac{\text{Tan}\left(\frac{\theta}{2}\right)}{2 * \pi * f * C1} \quad (2.7)$$

$$R3_{\min} = \frac{\text{Tan}\left(\frac{120}{2}\right)}{2 * 3.14 * 80 * 0.1 * 10^{-6}}$$



$$R3_{\min} = 34.4k\Omega$$

Y para frecuencia menor a **f=50Hz.**

$$R3_{\max} = \frac{\text{Tan}\left(\frac{120}{2}\right)}{2 * 3.14 * 50 * 0.1 * 10^{-6}}$$

$$R3_{\max} = 55.1k\Omega$$

Como el desfase depende de la frecuencia, por tanto la resistencia de entrada **R3** debe de estar relacionada con la resistencia del generador de onda sinusoidal, para garantizar un desfase igual a **$\theta=120^\circ$** , para todo el rango de frecuencia de trabajo entre **50 y 80 Hz.**

La máxima resistencia de entrada se obtiene para la mínima frecuencia y viceversa, por esto se determina:

$$R4 = R3_{\max} - R3_{\min} \quad (2.8)$$

$$R4 = 55 * 10^3 - 34.5 * 10^3$$

$$R4 = 20.5k\Omega$$

Como ya se ha dicho lo que se obtiene a la salida del circuito defasador es una onda de igual frecuencia y amplitud pero desfasada **120°** a continuación la **(Fig. 2.10)** muestra el desfase que se obtiene a la salida de los dos circuitos defasadores, onda color azul y onda color naranja.



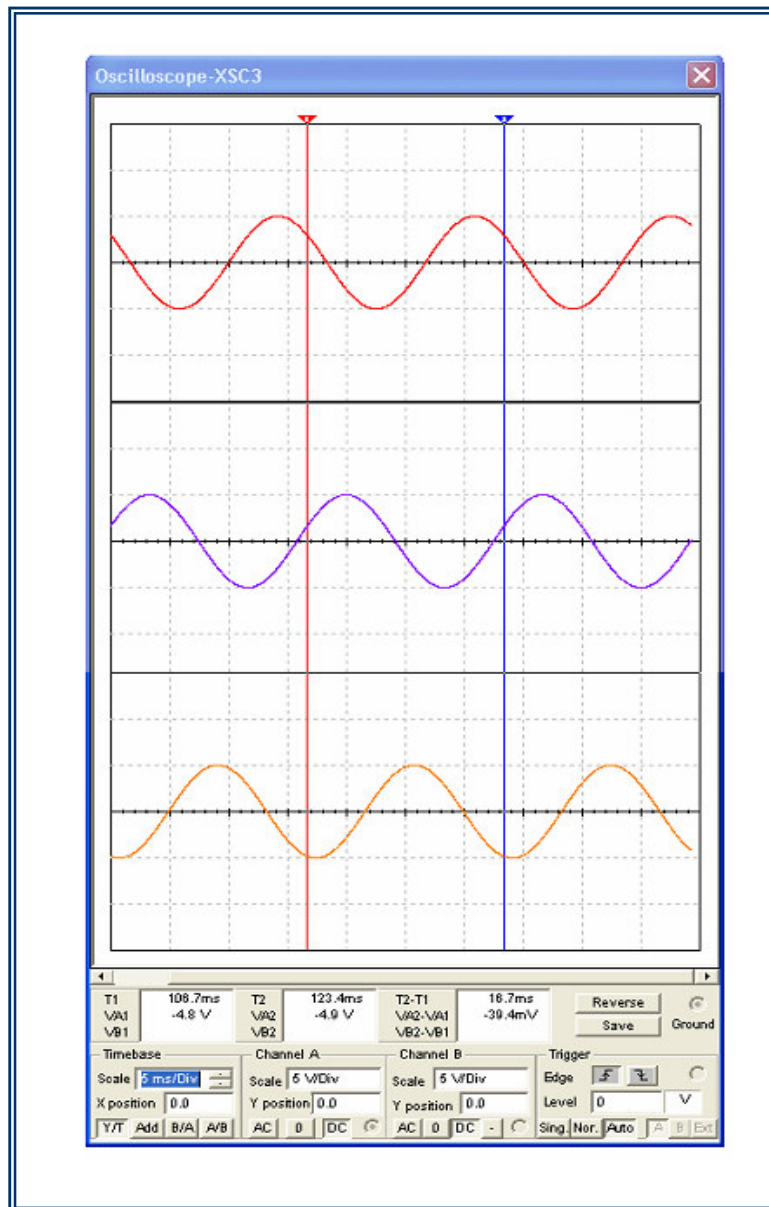


Figura 2.10 Forma de onda a la salida del Defasador

Como se trata de dos circuitos a continuación la **(Tabla. 2.5)**, presenta una lista de los elementos y valores de cada componente que corresponde a dichos circuitos.



TABLA (2.5) COMPONENTES DE LOS CIRCUITOS DEFASADORES

Nº	Componentes	Denominación	Cantidad
1	Amplificador Operacional 3T		2
2	Resistencias	100kΩ	4
3	Resistencias	34.4kΩ	2
4	Resistencias Variables	20.5kΩ	2
5	Condensadores	0.1μF	2

2.3.5 Sensor

El sensor de tensión debe ser capaz de medir la tensión en la carga en cada momento y determinar así cuando y cuanto reactivo capacitivo necesita el generador en cada momento, el sensor en cuestión como muestra la **(fig. 2.11)**, su funcionamiento se basa en un **VCO** (*Oscilador Controlado por Tensión*) el cual variará la frecuencia de salida si varia la tensión de entrada ya que el control de tensión en los reguladores de corriente alterna depende de la frecuencia de conmutación de las llaves

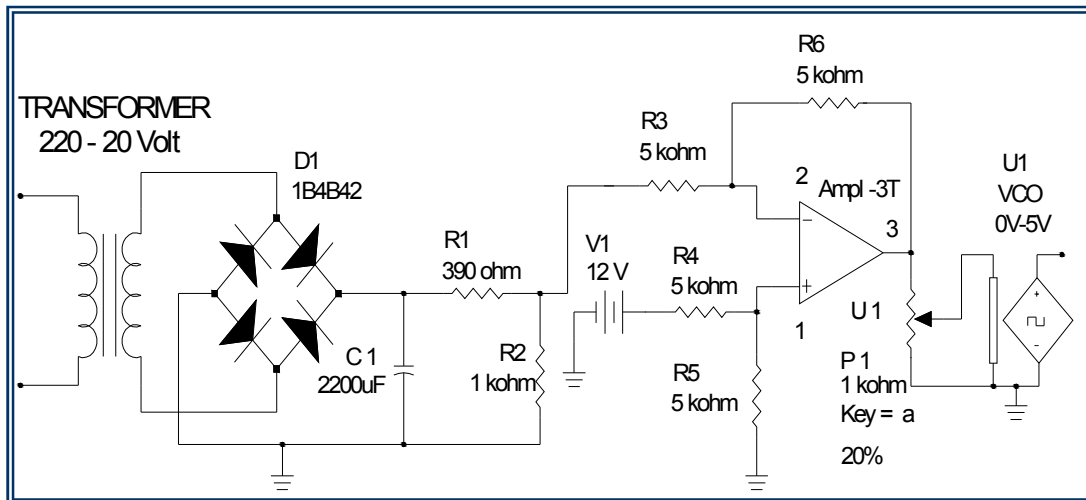


Figura 2.11 Circuito Sensor
Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006



La frecuencia de salida del sensor se entrega al Circuito Distribuidor y Modulador de pulsos que es quien realiza la mezcla de las señales que mas tarde conmutan los IGBT que controlan los condensadores estáticos por cada fase, como ya se explicó, el funcionamiento de este esquema electrónicamente recae en el comparador hecho a base de un operacional, este posee una referencia con la cual compara permanentemente el valor de la red después de pasar por rectificador y un filtro, es decir se comparan magnitudes de corriente directa con la señal de resultante se ataca el oscilador.

TABLA (2.6) COMPONENTES DEL SENSOR

Nº	Componentes	Denominación	Cantidad
1	Transformador de potencial	(220-20) Voltios	1
2	Puente Rectificador	1B4B42	1
3	Condensador Electrolítico	2200 μF	1
4	Resistencia	390 Ω	1
5	Resistencia	1K Ω	1
5	Resistencias	5K Ω	4
6	Potenciómetro	1K Ω	1
7	Amplificador Operacional		1
8	VCO		1

2.4 Cálculo del Circuito de Fuerza

El esquema de potencia o fuerza esta compuesto por dos transistores **IGBT** en antiparalelo por cada fase como ya se explicó en el epígrafe **(1.8)**, como muestra el esquema de la **(figura 1.7)** la ecuación general de calculo de la tensión de salida es la **(1.15)** y la forma de onda que se espera obtener es la de la **(figura 1.13)**, pero con la peculiaridad que debe ser a base de transistores **IGBT**, por que tienen la posibilidad



de ser apagados y encendidos varias veces en cada semiciclo, factor que no pudiera lograrse con un esquema a tiristores.

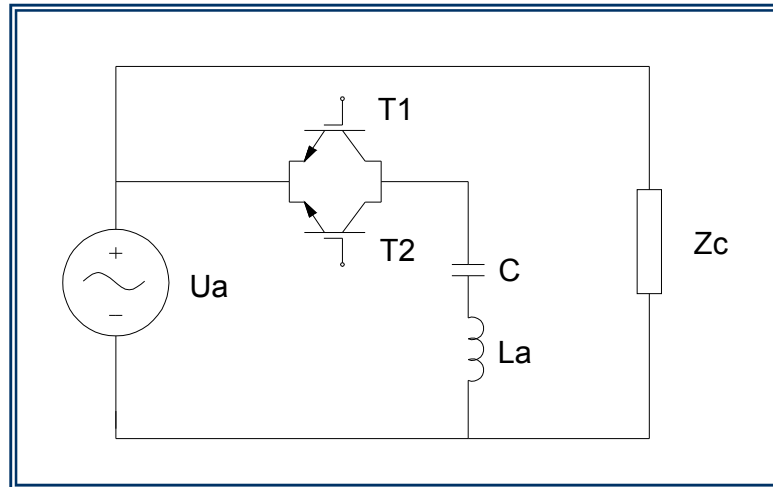


Figura 2.12 Esquema del Convertidor de Fuerza para una Fase

Fuente: Jorge Iván Maldonado, 2005-2006

La finalidad del convertidor es la de variar la potencia reactiva de los condensadores para la excitación del generador asincrónico en dependencia de los cambios de la carga, es decir con la variación del factor de potencia de la carga (**Zc**) el convertidor debe ser capaz de entregar la potencia reactiva que exija el generador en dependencia de lo que entrega a la carga.

2.5 Selección de los Componentes Eléctricos

Los semiconductores de potencia en cualquier convertidor estático se calculan siempre en correspondencia al convertidor en cuestión y a la configuración propia de cada esquema, así por su parte el circuito en



estudio deben calcularse los Transistores para posteriormente seleccionarse por catálogos, las magnitudes mayormente a tener en cuenta son la potencia, la frecuencia, la corriente de colector y la tensión colector emisor en bloqueo de los transistores.

$$V_{CE} \geq \sqrt{2}V_a \quad (2.9)$$

Donde:

V_{ce} =Tensión colector emisor en Bloqueo

V_a = tensión eficaz de fase

La corriente de colector se calcula como:

$$I_C \geq \frac{V_a}{Z_c} \quad (2.10)$$

$$Z_C = j(X_L - X_C) \quad (2.11)$$

$$Z_C = -j(X_{eq})$$

La impedancia de la rama de carga será siempre negativa puesto que es por naturaleza de carácter predominantemente reactivo capacitivo, el inductor es pequeño comparado con la capacidad su función es solo alisar los picos de corriente que puedan ocasionar las conmutaciones del convertidor en la tensión de alimentación de los condensadores



La potencia de los transistores se calcula como:

$$P_T = V_{ce} * I_c + V_{be} * I_b \quad (2.12)$$

Para la frecuencia se tiene solo en cuenta la máxima frecuencia que se maneja en el circuito, por tanto:

$$F_T \geq F_{Cm}$$

Donde:

F_{cm} = Frecuencia máxima de gobierno al circuito de fuerza, esta la impone el circuito de mando

$$F_T \geq 1\text{KHz}$$

$$V_{ce} \geq 310,2\text{V}$$

$$I_c = ?$$

$$P_T = ?$$

El calculo de la corriente del colector y de la potencia dependen de la impedancia de la carga y esta a su vez de la capacidad del banco de condensadores y esta se calcula en función de la potencia reactiva del generador (**ver ecuaciones 1.2 y 1.8**), que en este caso no se ha calculado una potencia específica de ningún generador por no ser este un objetivo de la investigación, una vez con estos datos se realiza la selección comercial de los componentes (**IGBT**) con auxilio de los catálogos de los fabricantes



La decisión de que sean **IGBT** es por las bien conocidas prestaciones técnicas que posee estos componentes como son la de poder conjugar altas potencias de gobierno con altas velocidades de conmutación y de respuestas, su alta impedancia de entrada y corrientes de colector en e orden de los **KA**



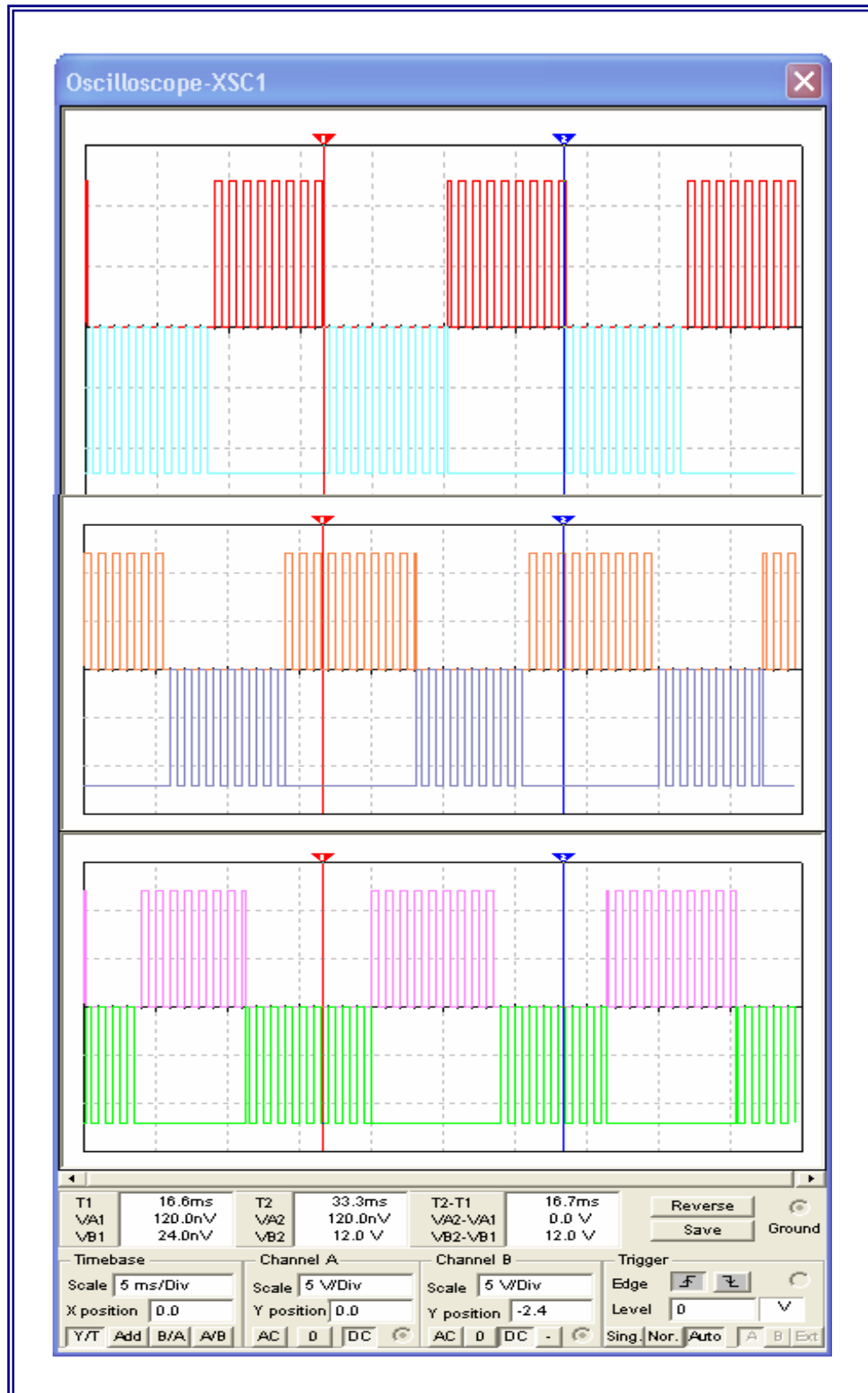


Figura 2.14 Formas de onda del Circuito de Mando



Como ya se indicó con anterioridad la simulación del esquema de Mando y Fuerza se la realizó en el Software Multisim, que es una herramienta que nos permite escoger el diseño y componentes adecuados para los diferentes circuitos que conforman el Convertidor Estático.

En el acápite anterior se realizó la descripción de cada uno de los circuitos y formas de onda individualmente, que se obtuvo en el diseño del circuito de mando, en la **(Fig.2.13)** y **(Fig.2.14)** está representado el circuito de Mando trifásico y la forma de onda respectivamente que se obtuvo después de la simulación en el Software.

Aquí se comprueba que se realizó con éxito la modulación por pulsos múltiples y a la salida del Circuito de Mando se obtiene la tensión de base para los transistores **IGBT** que se encuentran en el Circuito de Fuera **(ver Fig.2.12)** que son los encargados de trocear la onda de tensión a la frecuencia con la que se modulen los pulsos en el Circuito de Mando, a continuación se muestra en la **(Fig.2.15)**, la onda de tensión troceada de una fase en el Circuito de Fuerza.



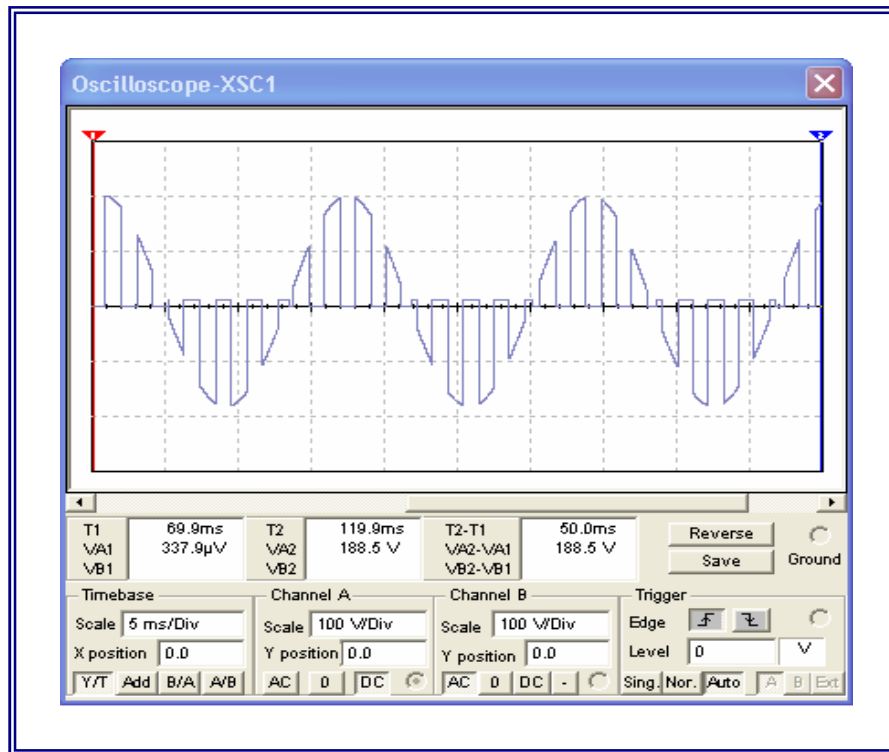


Figura 2.15 Formas de onda del Circuito de fuerza



2.7 Conclusiones

- ✦ *Se ha logrado la modulación por pulsos múltiples con el diseño del Circuito de Mando y el Circuito de Fuerza del convertidor, de acuerdo con los parámetros antes establecidos.*
- ✦ *Se comprobó que el **Software Multisim** cuenta con los medios necesarios para la simulación del Circuito de Mando y el Circuito de Fuerza diseñado.*
- ✦ *Se comprobó que el circuito de fuerza se lo debe diseñar en base a transistores IGBT, por sus mejores prestaciones que los tiristores normales*



Capítulo III: Análisis de Resultados

- ◆ **Introducción**
- ◆ **Valoración Técnica de Datos y Formas de Ondas**
- ◆ **Valoración Económica de la Propuesta**
- ◆ **Valoración Social**
- ◆ **Valoración Ecológica**
- ◆ **Conclusiones**



3.1 Introducción

En el presente capítulo se hace referencia a los resultados obtenidos en la simulación del convertidor estático mediante el Software Multisim , tanto en el circuito de Mando como el circuito de Fuerza, así como también se realizara una valoración Económica de cada uno de los componentes con los cuales esta conformado dicho circuito. También se realizara una valoración Social y Ecológica del Convertidor,

Esto con el fin de realizar un minucioso análisis de cada uno de los parámetros antes mencionados y así realizar una justificación para la elaboración de dicho proyecto teniendo en cuenta todos los resultados, que se obtuvieron a lo largo del trabajo de investigación

3.2 Valoración Técnica de Datos y Formas de Onda

Después de realizar el diseño cálculo y simulación del esquema propuesto y haber obtenido las formas de ondas del comportamiento del esquema se comprueba primero que se obtuvieron los resultados esperados según muestra el oscilograma del **Anexo 2**.

Técnicamente a base de circuitos electrónicos y componentes comerciales ha sido posible la implementación del esquema diseñado y se logro obtener la forma de onda que se esperaba al menos para la tensión modulada de un senoide a frecuencia fundamental, pero se detecto el problema que proporcionan los condensadores cuando la onda que les llega es de pulsos a alta frecuencia, a pesar que la envolvente de la onda sigue siendo sinusoidal y a la frecuencia de la onda fundamental de la red, para eliminar este problema se determinó que es necesario aplacar el fenómeno de las pulsaciones por medio de filtros que pueden consistir en



su forma mas sencilla de un inductor en serie por cada una de las fase con el condensador , así se verificó a través de otra simulación con MATLAB como muestra la gráfica de la **(Fig.3.1), Anexo 3 y Anexo 4** que el problema puede ser mejorado, aunque eliminarlo del todo suele ser algo difícil y económicamente caro con la configuración de los posibles filtros y el costo de estos.

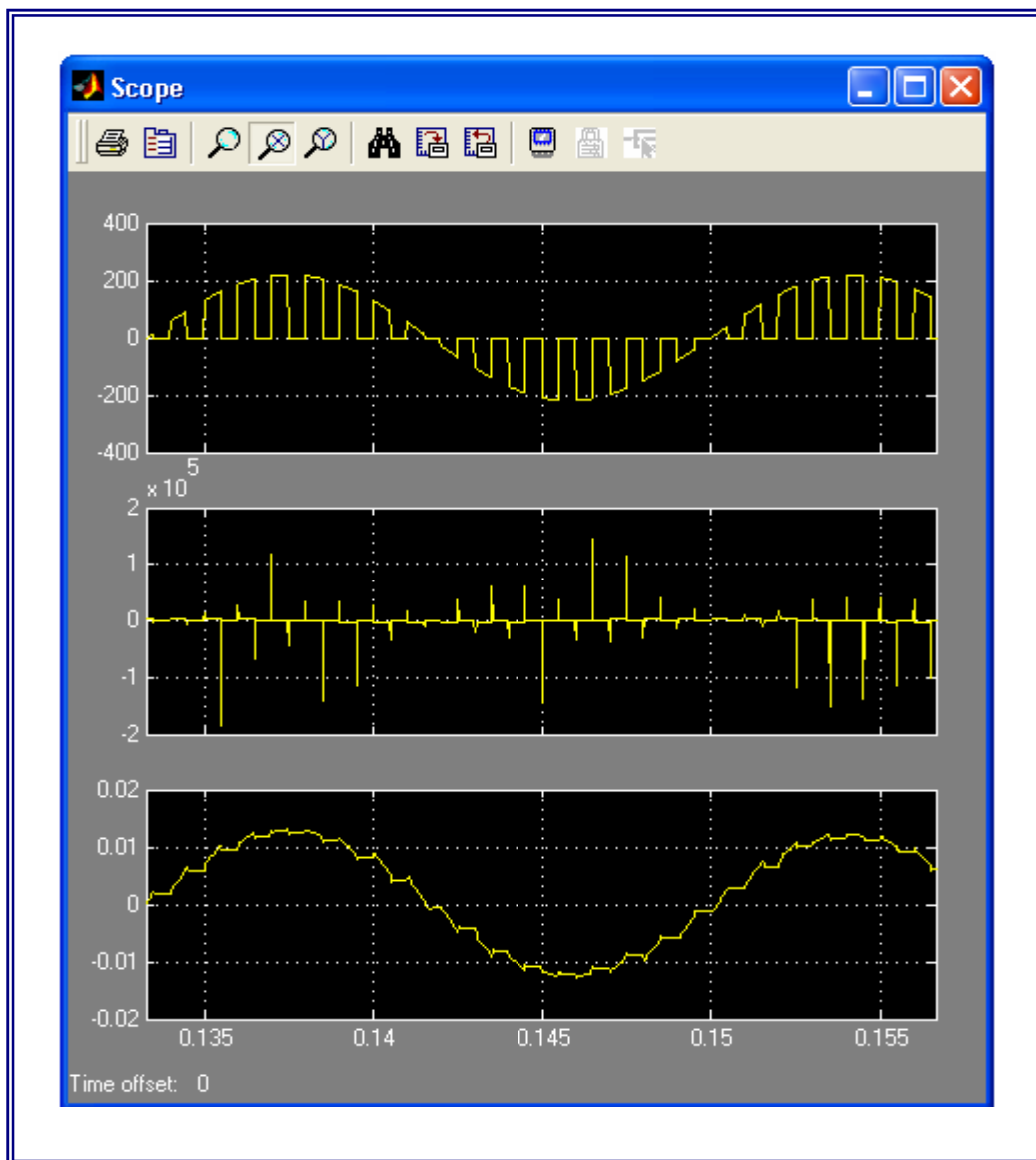


Figura 3.1 Forma de onda de la Corriente de Conmutación en los Condensadores



Introducir un inductor en serie con los condensadores implica aumentar el reactivo inductivo por fases, por lo que el valor de estos no debe ser más que una fracción del valor del reactivo total que requiere el generador.

3.3 Valoración Económica de la Propuesta

En el presente trabajo de investigación se realizará una estimación económica de los componentes con los cuales esta conformado Convertidor Estático, de los materiales necesarios para su construcción, además de los costos de diseño e ingeniería que se utilizo para el desarrollo del mismo, esto con el fin de verificar si es económicamente viable la construcción de este tipo de nueva tecnología.

Para ello se utiliza el método de preestimación, debido a que una de las formas de cálculo mas exactas para determinar la valoración económica de un proyecto, para ello se realizará un listado de los componentes electrónicos utilizados en el Convertidor propuesto, además se incluirá el análisis económico del material para la construcción del soporte del equipo y el material humano necesario para la realización del mismo.

La **(tabla 3.1)**, muestra la relación de los componentes utilizados en el diseño del equipo con sus precio y costo total de cada uno de los componentes **(C1)**, la valoración económica que se detalla en la presente **Tabla (3.1)**, se la realiza de acuerdo a consultas de trabajos de investigación realizados con anterioridad y páginas Web de Internet; **[Bastidas 2005]; [Jaramillo 2004]; [11]**.



TABLA (3.1) RELACIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN EL DISEÑO (C1)

Nº	Componente	Denominación	Cantidad	Precio Unitario (USD)	Precio Total (USD)
1	Transformador	(220-20) Voltios	2	12,75	25,50
2	Diodo	National 1N4152	1	0.50	0.50
3	Diodo	National 3612GP	1	0.50	0.50
4	Diodo	National 4004GP	1	0.50	0.50
5	Transistor NPN		3	0.80	2.40
6	Transistor PNP		6	0.80	4.80
7	Optoacoplador		6	3.00	18.00
9	Compuertas AND2	7408	6	0.50	3.00
10	Compuertas NOT	7407	3	0.50	1.50
11	Puente Rectificador	Toshiba 4N42	1	2.50	2.50
12	VCO		1	1.50	1.50
13	Amplificador Operacional 3T		3	1.50	4.50
14	IGBT	IRG4PSH71UD	6	25	150
16	Resistencias	390Ω	1	0.25	0.25
17	Resistencias	1KΩ	1	0.25	0.25
18	Resistencias	5KΩ	6	0.25	1.50
19	Resistencias	10kΩ	16	0.25	4.00
20	Resistencias	34.4kΩ	2	0.25	0.50
21	Resistencias	100kΩ	4	0.40	1.60
22	Potenciómetro	1kΩ	1	0.75	1.50
23	Potenciómetro	20.5kΩ	2	1.50	3.00
24	Condensador Electrolítico	2200 uF	1	1.00	1.00
25	Condensadores Cerámicos	0.1uF	2	0.25	0.50
COSTO TOTAL DE LOS COMPONENTES ELECTRICOS					229.30



Nota: en el **Anexo 5** se muestra un listado de precios de los IGBTs de acuerdo a su tensión colector emisor, corriente del colector, potencia máxima y frecuencia de trabajo, listado del cual se lo tomo como referencia para la selección del los mismos

En la **(tabla 3.2)**, se muestra la relación de precios de los materiales **(C2)**, que se utilizaran para la construcción del soporte del Convertidor Estático [10].

TABLA (3.2) RELACIÓN DE COSTOS DE MATERIALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL CONVERTIDOR EN EL DISEÑO (C2)

Nº	Materiales	Cantidad	Precio Unitario USD	Precio Total USD
1	Cautín.	1	5.00	5.00
2	Placa.	1(30*25)cm.	3.50	3.50
3	Pasta para soldar	10g.	2.00	2.00
4	Estaño en alambre	¼ Kg.	1.00	1.00
COSTO TOTAL DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCION				11.50

En la **(tabla 3.3)**, se realiza el análisis de los costos de diseño e ingeniería que se utilizaron para el desarrollo de Convertidor Estático. Para la determinación de este parámetro se considera varios aspectos, que han permitido la culminación de este proyecto, cuyos valores se estiman a continuación



TABLA (3.3) RELACIÓN DE COSTOS DE DISEÑO E INGENIERÍA (C3)

Nº	Categoría	Valor USD
1	Visitas Técnicas (Universidades)	1100
2	Adquisición de Bibliografía (Libros, Catálogos)	200
3	Capacitación	200
COSTO TOTAL		1500

Para obtener el costo total del Convertidor se tiene que sumar el valor total de los componentes **(C1)**, más el valor de los Materiales de construcción **(C2)**, mas el valor de los costos de ingeniería **(C3)**, y de acuerdo a esto tenemos que la **ecuación (3.1)**.

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 \quad (3.1)$$

TABLA (3.4) COSTO TOTAL DEL CONVERTIDOR ESTÁTICO (CT)

Nº	Categoría	Valor USD
1	Costo de Componentes Utilizados en el Diseño	229.30
2	Costo de Materiales para la Construcción	11.50
3	Costo de Diseño e Ingeniería	1500
COSTO TOTAL DEL PROYECTO		1740.8

Otra consideración que se debe tener en cuenta en el costo final del proyecto es el montaje del equipo el cual se debe llevar acabo por un Ingeniero Eléctrico y un Técnico Medio en electrónica, quienes serán los



encargados de la construcción y montaje final, debido a esto se debe aumentar al coto final (**CT**), el salario del personal antes descrito, además de el costo de los instrumentos de medición que se deberán utilizar para comprobar el correcto funcionamiento del Convertidor.

3.4 Valoración Social

Todo proyecto para su realización es necesario que consigo lleve una valoración social y debido a que este proyecto esta dirigido a la sociedad, es que se realiza esta evaluación, para destacar todos los beneficios sociales que trae consigo el desarrollo de esta propuesta de trabajo.

En nuestro país las zonas rurales que se encuentran alejadas de la red interconectada de electrificación son una de las más desamparadas de lo que se refiere al abastecimiento de energía eléctrica, es por esta razón que se realiza esta investigación que trata de establecer un proyecto global que junto con otras investigaciones realizadas sobre el tema como lo son: *"DISEÑO Y SIMULACION DE LOS COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR MODELO PARA LA PROVINCIA DE LOJA"*, del Ingeniero Pablo Darío Jaramillo, y *"DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN AEROGENERADOR PARA LA PROVINCIA DE LOJA"* del Ingeniero Jorge Luís Maldonado, poder implantar una fuente de generación eléctrica como lo es el aerogenerador autónomo con maquina asíncrona , pero con todas las garantías en cuanto a la calidad de su energía, así como a un costo el cual sea asequible, para dichas poblaciones debido a que muchas de las mismas no cuentan con los recursos económicos necesarios para su implementación.

Y como en nuestra provincia hasta la actualidad no se a propuesto un proyecto de tal magnitud para la generación de energía eólica, esta



propuesta constituye un avance, en lo que se refiere a establecer un proyecto de un aerogenerador autónomo, con generador asíncrono, que cuente con todas las garantías necesarias para el usuario final en lo que se refiere a la calidad de su energía como lo es tensión y frecuencia, para las condiciones de la provincia de Loja.

Es por esto que la ejecución de este proyecto entonces constituye un paso trascendental hacia el conocimiento y aplicación de una de las energías más limpias e inagotables y gratuitas en beneficio de la colectividad en general. Y además se contribuirá a que la sociedad en general forje con su mismo aporte, la perspectiva de desarrollo de su pueblo, permitiendo que la Provincia de Loja en general alcance día a día un nivel más alto en todos los aspectos destinados al desarrollo.

3.5 Valoración Ecológica

El circuito electrónico diseñado en este trabajo si bien no es producto directo de procesos químicos ni desechos de ninguna industria química, independientemente de que la fabricación de los componentes y accesorios utilizados son procedentes de algún proceso que puede contaminar como es el caso de la placa virgen para el circuito impreso y el estaño para soldadura, se puede afirmar que por esa vía el desarrollo y fabricación de este equipo no contamina el medio, pero analizando mas profundamente la contaminación de equipos electrónicos es principalmente sónica sobre todo cuando trabajan en conmutación a cierto nivel de frecuencia, como es el caso de este trabajo que a pesar de que no es un nivel alto de frecuencia, el mas alto es 1 KHz y está en el rango audible humano por lo que es muy probable que pueda emitir ruido en algún momento por alguna causa, de todas formas estos sistemas son diseñados para trabajar aislado de la red en lugares apartados donde el silencio es mayor que el ruido de fondo, de forma general el ruido total



emitido por un aerogenerador no va mas allá de unos 100 m y a muy bajos decibeles la **(Fig. 3.2)**, muestra los picos de corrientes que pudieran traducirse en ruidos eléctricos, principalmente si no se colocan adecuados filtros para atenuarlos.

La conmutación propia del convertidor a la onda de tensión **(Ver fig. 1.13)** puede ser una causa fundamental para la contaminación electrónica del medio comercial en cuanto a ruidos e interferencias a ciertos equipos electrodomésticos, pero ningún convertidor estático conmutado está exento de este fenómeno de generación de ruido y armónicos.

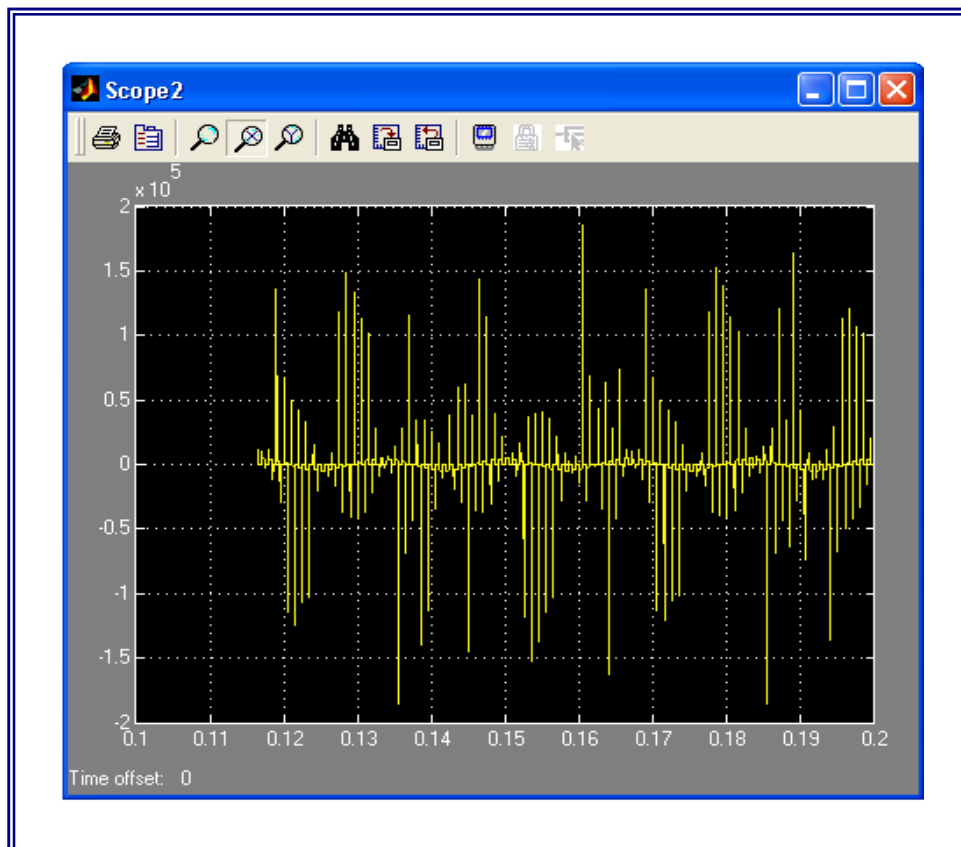


Figura 3.2 Forma de onda de la corriente de conmutación en los condensadores



3.6 Conclusiones

- ◆ *Se establece un presupuesto económico básico del Convertidor Estático para su construcción.*
- ◆ *Una vez realizadas las valoraciones, Técnica, Económica, Social y Ambiental, se ha comprobado que es viable el diseño y construcción del Convertidor Estático.*
- ◆ *Los resultados obtenidos en las valoraciones Técnica, Económica, Social y Ambiental son los esperados, y se comprueba que el trabajo de investigación puede ayudar a solucionar los problemas descritos al inicio de esta investigación.*



Conclusiones Generales

Una vez que se ha concluido el presente trabajo de investigación, se puede decir que en algunas cosas se obtuvieron los resultados deseados, en otras no se logro a satisfacción los resultados, debido a diversos factores que intervinieron en el desarrollo del mismo, pero que se pueden logran en futuras investigaciones.

A continuación se presentan los resultados más importantes obtenidos a lo largo del desarrollo del presente trabajo:

- ✚ Se ha logrado Diseñar el esquema completo del Convertidor Estático, que es el objetivo fundamental de este trabajo de Investigación
- ✚ Se Comprueba que el control por Impulsos múltiples puede servir para la regulación del reactivo en el Generador Asíncrono
- ✚ La simulación de los circuitos del Convertidor Estático, a través del Software Multisim, permite comprobar el comportamiento de cada uno de ellos y con esto seleccionar los componentes adecuados para su diseño
- ✚ Se comprueba que es viable su fabricación, bebido a que se obtuvo los resultados deseados a través de su Diseño y Simulación



- ✚ Es posible lograr el régimen autónomo o aislado de los aerogeneradores autónomos con maquina asincrónica, si se cuenta con un buen método de regulación, como es el propuesto en el presente trabajo
- ✚ El diseño del Convertidor Estático para el control de la Excitación de un Generador Asíncrono en Aerogeneradores Autónomos constituye la primera etapa de los sistemas de control, para ello se debe complementar con los diseños de los sistemas de regulación de frecuencia y orientación al viento.



Recomendaciones

El presente trabajo de investigación cumplió en su gran mayoría con las expectativas planteadas, pero como todo trabajo de investigación ha generado varias posibilidades para trabajos posteriores y futuras correcciones.

A continuación se da a conocer algunas recomendaciones

- ✚ Proseguir en la investigación del tema sobretodo en la parte que se refiere a la regulación de la frecuencia.
- ✚ Mejorar la parte que se refiere al sensor de voltaje, porque es el encargado de imponer la frecuencia en que se debe cortar la onda para variar el valor medio de la tensión.
- ✚ Utilizar este trabajo de investigación, junto a otros ya realizados sobre aerogeneradores en la provincia de Loja, para elaborar un proyecto conjunto para el diseño de un aerogenerador autónomo ideal para las condiciones de la región.
- ✚ Construir el Convertidor Estático del tipo laboratorio que permita verificar el diseño y las características reales y las obtenidas en la simulación a través del Software Multisim.
- ✚ Trabajar en el perfeccionamiento del filtro para tratar de eliminar completamente todas las componentes armónicas que puedan aparecer como consecuencia de las conmutaciones de la tensión al banco de condensadores.



Bibliografía

- [1] Acuña Rodríguez Wilbert. *Estudio de las características eólicas de Moa para su utilización en la generación eléctrica alterna sinusoidal. Trabajo de Diploma.* ISMM.1995
- [2] Acuña Rodríguez Wilbert. *Investigación sobre los componentes de un aerogenerador utilizando máquinas asíncronas.* Tesis en opción al grado de Master en Electromecánica de plantas Metalurgias. 2000.
- [3] A. Däschler Y M. Jeanrenaud, *Electrotecnia y Leyes Generales de Máquinas*1973
- [4] Almiral Mesa Juan. *Temas de Ingeniería eléctrica. Tomo I.* La Habana 2003.
- [5] Aneiros Parada José M. *Problemas de Diseño de Elementos de Máquinas.* Segunda Edición. Cuba. 1987.
- [6] Bastidas Bastidas, *Diseño de un Circuito Electrónico para la Conexión de un Aerogenerador en Paralelo a la Red,* 2005
- [7] Colectivo de autores (Universidad de la Patagónica). *Libro Educativo de Energía Renovable,* 2003.
- [8] Colectivo de autores (CIES). *Sistemas Solares fotovoltaicos* 1996.
- [9] Colectivo de autores. *Electrónica Industrial, Componentes, circuitos y sistemas de Potencia, Tomo I,* 1991.
- [10] Colectivo de autores. *Electrónica Industrial, Componentes, circuitos y sistemas de Potencia, Tomo II,* 1991.



- [11] Coughlin Roberth F y Driscoll Federico, *Circuitos Integrados Lineales y Amplificadores Operacionales*, 1987,
- [12] Curso General de Energía Eólica. *Manejo de Software. Red Iberoamericana de Energía Eólica*. Santiago de Cuba 2004.
- [13] Daga Pedro, *Transformadores y Convertidores*, 1977
- [14] Federico Coz, *Manual de Micro y Mini Centrales Eléctricas*, 1998
- [15] Hernández Gálvez Geovannis. *Seminario CIES, Presentación en formato digital*, 2004.
- [16] Herrantz Acero. *Electrónica Industrial. Componentes. Circuitos y Sistemas de Potencia*. Ciudad la Habana 1991.
- [17] Honorable Consejo Provincial de Loja www.hcpl.gov.ec. *Energías Renovables*.2004. Ecuador.
- [18] Jaramillo Serrano Pablo. *Diseño y Simulación de los Componentes de un Aerogenerador Modelo para la Provincia de Loja*. Trabajo de diploma 2004.
- [19] Javier Sanz Feito, *Maquinas Eléctricas*, 2002
- [20] Jiménez Díaz Yony. *Diseño de un Inversor con Mando PWM para Aplicaciones Fotovoltaicas*. Trabajo de diploma 2003.
- [21] Kart Gieck. *Manual de Fórmulas Técnicas* 19ª. Edición. 1993.
- [22] Maldonado Correa Jorge Luís. *Metodología de cálculo para un aerogenerador moderno de eje horizontal*. Trabajo de diploma ISMM. 2003.
- [23] Márquez Juan R. *Cómo Funcionan los Aerogeneradores*. Ciudad La Habana. 1998.



- [24] Martínez Esteban Amador. *Electrotecnia Básica*. Ciudad La Habana. 1985.
- [25] Müller Wolfgang, *Electrotecnia de Potencia*, 1980
- [26] Muñiz Ávila Marcos. Guilarte Hernández Onel. *Estudio de la Generación Eléctrica con Máquinas Asíncronas*. Trabajo de Diploma. 1999.
- [27] Ortega J Y Pastor A, *Electrotecnia y Maquinas Eléctricas*, 1981
- [28] Ortega P Y Juan M, *Electrónica*, 1995
- [29] Palmero Olivero Roberto, *Aplicación de los Convertidores Estáticos para el Tratamiento de Agua Potable, Magnetización a Tensión Variable*, 2002
- [30] Rösner J. Beck H. P. Sourkounis C. *Wind Energy Converter with Asynchronous Machines and three-phase AC Controller in Generator Mode*. Germany. 1999.
- [31] Ruiz Francisco, *Electrotecnia General*, 1978
- [32] Santos López Roberto, *Propuesta para el Montaje y Diseño de la Automatización de un Convertidor Estático para el Control de un Flujo de un Equipo de Muestreo de Gases y Polvos Contaminantes*, 2004
- [33] S. B. Dewan y A. Straugehen, *Power Semiconductor Drives*
- [34] Torres González Maicel Rafael. *Diseño de un Circuito de Mando para Inversores Trifásicos*. Trabajo de diploma 2001.
- [35] Voldec A I, *Maquinas Eléctricas*, 1974
- [36] Wood Peter, *Switching Power Converter*, 1982



Páginas Web

- [1] Energías Alternativas. www.visitaguiada.com
- [2] Energía Eólica www.personales.ya.com
- [3] www.EERSA.org
- [4] www.elprisma.com.
- [5] www.members.tipod.com.
- [6] www.energia.eólica.com.
- [7] www.wind.power.com
- [8] www.cujae.edu.cu
- [9] www.monografias.com
- [10] www.elko.com.ar/precios
- [11] www.paginadigital.com.ar/articulos/sica.html



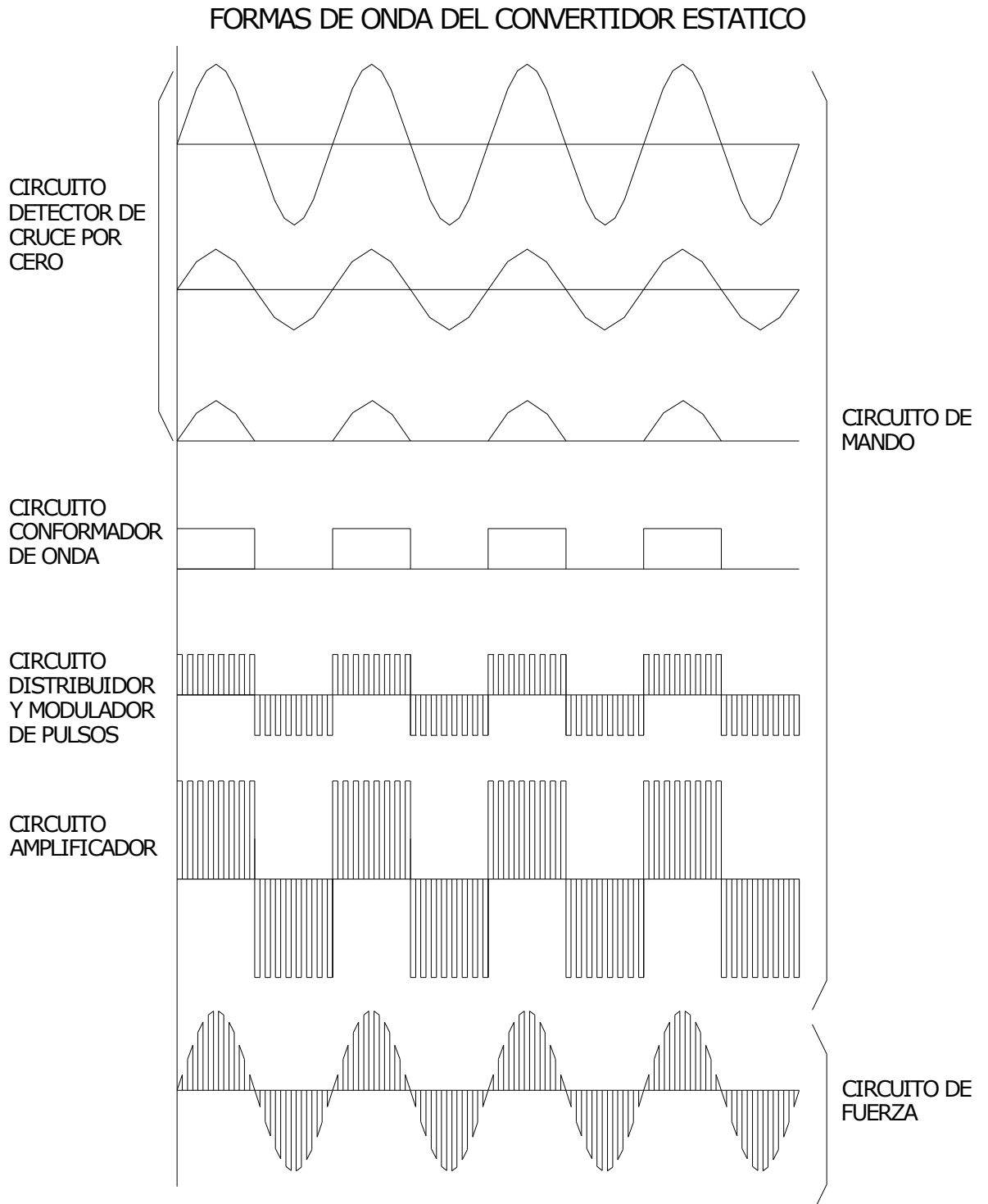


Anexos

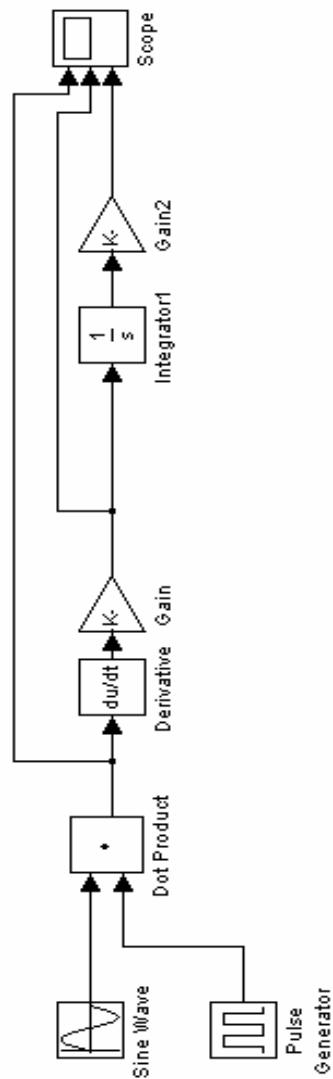
- ◆ **Anexo I: Esquema General del Convertidor**
- ◆ **Anexo II: Formas de Onda Obtenidas en los distintos circuitos del Convertidor Estático.**
- ◆ **Anexo III: Diagrama de Bloques de un Condensador y un Inductor en Serie**
- ◆ **Anexo IV: Diagrama de Bloques de la Simulación en el Software Matlab**
- ◆ **Anexo V: Listado de Precios de los IGBTs**



Anexo II



Anexo IV



Anexo V

G.M. ELECTRONICA S.A.
componentes electrónicos
 Av. Rivadavia 2458 - (C1034ACQ) Buenos Aires , Argentina
 Tel.: 54-11-4953-0417 Fax: 54-11-4953-2971
 email: info@gmelectronica.com.ar
 web site: <http://www.gmelectronica.com.ar/>

IGBTs

TRANSISTORES BIPOLARES DE COMPUERTA AISLADA

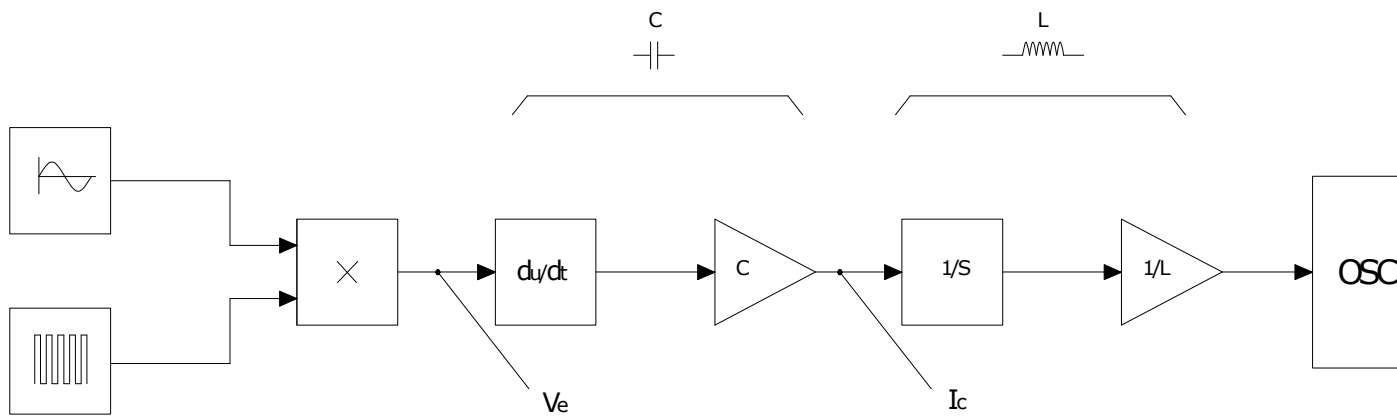
CODIGO	V _{ce} max TENSION COLECTOR EMISOR (V)	I _c max CORRIENTE DE COLECTOR		P _d max DISIPACION DE POTENCIA (W)	V _{ces} TENSION COLECTOR EMISOR (SAT) (V)	ENCAPSULADO	DIODO	OBSERVACIONES	COSTO USD
		T _c =25°C (A)	T _c =100°C (A)						
IRG4BC20UD	600	13	6.5	60	1.85	TO-220	SI	ULTRA RAPIDO (8 a 40 KHz)	22,50
IRGBC20S	600	19	10	60	2.4	TO-220	NO	BAJA FRECUENCIA (DC a 0.4 KHz)	13,25
IRG4BC30UD	600	23	12	100	1.95	TO-220	SI	ULTRA RAPIDO (8 a 40 KHz)	18
IRGBC30F	600	31	17	100	2.1	TO-220	NO	MEDIA FRECUENCIA (3 a 10 KHz)	11
IRGBC40U	600	40	20	160	2.7	TO-220	NO	ULTRA RAPIDO (10 a 30 KHz)	28
IRG4BC40U	600	40	20	160	1.72	TO-220	NO	ULTRA RAPIDO (8 a 60 KHz)	27,50
IRG4BC40S	600	60	31	160	1.32	TO-220	NO	BAJA FRECUENCIA (DC a 1 KHz)	10,80
IRG4PC30UD	600	23	12	100	1.95	TO-3P	SI	ULTRA RAPIDO (8 a 40 KHz)	15
IRGPC30M	600	26	16	100	2.9	TO-3P	NO	MEDIA FRECUENCIA (1 a 10 KHz)	12,75
IRG4PC40U	600	40	20	160	1.72	TO-3P	NO	ULTRA RAPIDO (8 a 60 KHz)	20,50
IRG4PC40UD	600	40	20	160	1.72	TO-3P	SI	ULTRA RAPIDO (8 a 60 KHz)	22
IRG4PC40W	600	40	20	160	2.05	TO-3P	NO	ULTRA RAPIDO (75 a 150 KHz) (WARP)	40,50
IRG4PH50U	1200	45	24	200	2.78	TO-3P	NO	ULTRA RAPIDO (5 a 40 KHz)	37,50
IRG4PH50UD	1200	45	24	200	2.78	TO-3P	SI	ULTRA RAPIDO (5 a 40 KHz)	36,25
IRG4PC40F	600	49	27	160	1.7	TO-3P	NO	MEDIA FRECUENCIA (1 a 8 KHz)	16,25
IRGPC50U	600	55	27	200	3.00	TO-3P	NO	ULTRA RAPIDO (10 a 30 KHz)	21
IRG4PC50U	600	55	27	200	1.65	TO-3P	NO	ULTRA RAPIDO (8 a	19,50

*Diseño de un Convertidor Estático para el Control de la Excitación de Generadores
Asíncronos en Aerogeneradores Autónomos*



								60 KHz)	
IRG4PC50UD	600	55	27	200	1.65	TO-3P	SI	ULTRA RAPIDO (8 a 60 KHz)	17,25
IRG4PH50SD	1200	57	33	200	1.47	TO-3P	SI	BAJA FRECUENCIA (DC a 1 KHz)	8
HTG30N60C3D	600	63	35	208	1.8	TO-3P	SI	MEDIA FRECUENCIA	10
IRGPC56	600	70	35	200	1.8	TO-3P	NO	MEDIA FRECUENCIA (3 a 10 KHz)	15
IRG4PC50F	600	70	39	200	1.8	TO-3P	NO	MEDIA FRECUENCIA (1 a 8 KHz)	15
IRG4PC50FD	600	70	39	200	1.8	TO-3P	SI	MEDIA FRECUENCIA (1 a 8 KHz)	18
IRG4PSH71UD	1200	99	50	350	2.5	TO-3P	SI	ULTRA RAPIDO (8 a 40 KHz)	25





$$I_c = C \frac{dU_c}{dt}$$

$$U_c = \frac{1}{C} \int I_c dt$$

$$I_l = \frac{1}{L} \int U_l dt$$

$$U_l = L \frac{dI_l}{dt}$$