



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**Simulación de un Generador Eólico Conectado a una Red
Aislada Usando Simulink.**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTA:
MIGUEL ANGEL LÓPEZ GÓMEZ**

**ASESOR:
DR. NORBERTO GARCÍA BARRIGA**



MORELIA, MICHOACÁN, JUNIO DE 2009



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Eléctrica

Morelia, Mich., a 25 de Febrero del 2009

Oficio no. 250/2009

C. MIGUEL ANGEL LOPEZ GOMEZ
PASANTE DE INGENIERIA ELECTRICA.
Presente

En atención a su solicitud de fecha 4 de Febrero de 2009, me permito comunicarle que se aprueba el **Tema de Tesis** propuesto para presentar Examen Recepcional, en la **Carrera de Ingeniería Eléctrica**.

El Tema de Tesis aprobado **"Simulación de un Generador Eólico Conectado a una Red Aislada Usando Simulink"**, deberá desarrollarse bajo el siguiente índice:

- Capítulo 1.- Introducción,
- Capítulo 2.- La máquina de Inducción,
- Capítulo 3.- Operación del generador eólico,
- Capítulo 4.- Control de la frecuencia de la red aislada,
- Capítulo 5.- Conclusiones
Apéndices y referencia.

Para tal s efectos fungirá como asesor de su tesis el **Dr. Norberto García Barriga**.

Atentamente

Dr. Leonardo Romero Muñoz
Director de la Facultad de Ingeniería Eléctrica.

Vo.Bo.

M.I. Nicolás Alvarado Báez
Secretario Académico.

LRM/NAB/srd



FACULTAD DE
INGENIERIA ELECTRICA/
DIRECCION

Ciudad Universitaria,
Edificio "A" Primer Piso,
Av. Francisco J. Mújica S/N,
C.P. 58030, Morelia, Mich.
Tel. 01 (443) 3 223500 Ext. 1115,
Tel./Fax 01(443) 3265776,
<http://www.fie.umich.mx/>



Agradecimientos

- *A Dios padre que nunca se ha olvidado de mí y por darme fuerzas para seguir adelante y hacer realidad mi más grande sueño.*
- *A mis padres María y Jacinto por su inmenso amor y por haberme enseñado hacer de mí, una gente de bien.*
- *A mis hermanas Norma Laura y María Elsa por haberme apoyado en todo momento.*
- *A toda mi familia sin excepción alguna por haber estado conmigo en las buenas y en las malas.*
- *Al Dr. Norberto García Barriga por su incansable paciencia y por las cosas que he aprendido de él y que sin su ayuda no hubiera sido posible este trabajo.*
- *A todos mis amigos sin excepción alguna por todos los momentos inolvidables de escuela y de diversión.*
- *Al Ing. Enrique Manuel Báez García por su amistad y por sus consejos durante toda mi carrera.*
- *Al M.I. Nicolás Alvarado Báez, por su apoyo para los trámites de mi titulación y por su sincera amistad que me brindo en todo momento.*

Dedicatoria

A mi padres María y Jacinto que siempre ha creído en mí y por su apreciable cariño y a mis hermanas Norma Laura y María Elsa por todo el apoyo que me han dado en todo momento.

Resumen

Durante los últimos años se ha observado un importante incremento en la generación de energía proveniente de fuentes renovables de energía. En particular, la generación eólica ha presentado un gran auge gracias al desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo en todo el mundo. Estos proyectos relacionados con energía proveniente del viento se pueden englobar básicamente en proyectos de parques de generación para la interconexión con la red eléctrica de potencia y proyectos para proveer de energía a comunidades apartadas en donde no se cuenta con la conexión a la red de potencia.

En esta tesis se implementa un sistema de generación eólica aislado de la red de potencia usando Simulink. El sistema aislado suministra potencia a una carga principal de 50KW a través de un generador basado en un generador de inducción con una capacidad de 275 KVA. Con el objetivo de mantener la frecuencia del sistema aislado dentro de un rango adecuado, se implementa un control basado en la conexión de carga. Este control está diseñado para realizar dos tareas básicas, i).- determinación del exceso de potencia generada existente en el sistema y ii).- determinación de la cantidad de carga requerida para controlar la frecuencia. Este controlador de frecuencia puede utilizar básicamente dos tipos de carga, las cuales son: un sistema de bombeo basado en motores de inducción y bancos trifásicos de resistencias. Debido a que la utilización de resistencias trifásicas para controlar la frecuencia tiene la desventaja de disipar la potencia en el ambiente, el sistema de control le da prioridad a la conexión del sistema de bombeo para almacenar la energía excedente como energía potencial para ser utilizada posteriormente. El sistema de control lleva a cabo el ajuste dinámico de la frecuencia del sistema mediante un control PID.

Contenido

Agradecimientos	<i>ii</i>
Dedicatoria	<i>iii</i>
Resumen	<i>iv</i>
Lista de Figuras	<i>vii</i>
Lista de Tablas	<i>x</i>
Lista de Símbolos y Abreviaciones	<i>xi</i>
Capítulo 1. Introducción	
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Definición de Generación Distribuida	3
1.1.2. Estado Actual de la Energía Eólica en todo el Mundo	7
1.1.3. Situación Actual en México	8
1.2. Descripción del problema	10
1.3. Objetivos	12
1.4. Justificación	13
1.5. Metodología	13
1.6. Descripción de los capítulos	14
Capítulo 2. La Máquina de Inducción	
2.1. Generador Asíncrono	15
2.2. Construcción de la Máquina de Inducción Trifásica	16
2.2.1. Campo Magnético Giratorio y de Deslizamiento	16
2.3. El Modelo del Circuito de la Máquina de Inducción Trifásica	17
2.4. Modelo de la Máquina en el Marco de Referencia Arbitrario $dq0$	22
2.4.1. Ecuación de Voltaje en $dq0$	22
2.4.2. Relación de los Enlaces de Flujo en $dq0$	24
2.4.3. Ecuaciones del Par en $dq0$	25
2.5. Simulación en Matlab	26
2.6. Conclusiones	34
Capítulo 3. Operación del Generador Eólico	
3.1. Generación Eólica	35

3.1.1. Turbina Eólica	35
3.1.2. El Viento	36
3.1.3. Modelo de las Características Aerodinámicas	37
3.2. Configuración de Generadores Eólicos	38
3.3. El Aerogenerador Aislado	40
3.4. Caso de Estudio	45
3.4.1. Velocidad Fija	45
3.4.2. Velocidad Variable	51
3.5. Conclusiones	60
Capítulo 4. Control de la Frecuencia de la Red Aislada	
4.1. Control Auxiliar en Base a Motores de Inducción	61
4.2. Controlador de Frecuencia en Base a Carga Resistivas	64
4.3. Caso de Estudio	67
4.3.1. Desempeño del Control de la Frecuencia basada en Resistencias	67
4.3.2. Desempeño del controlador Principal y Auxiliar	74
4.4. Conclusiones	80
Capítulo 5. Conclusiones y Trabajos Futuros	
5.1. Conclusiones generales	81
5.2. Trabajos futuros	82
Referencias	83

Lista de Figuras

1.1. Tipos de Generación y Almacenamiento.	5
1.2. Configuración de un Sistema Diesel-Eólico.	12
2.1. Máquina de Inducción Trifásica.	18
2.2. Representación Equivalente de un Circuito de Máquina de Inducción en el Marco de Referencia Arbitrario.	21
2.4. Diagrama en Simulink para la Simulación de la Máquina de Inducción como motor.	27
2.5. Velocidad del Motor de Inducción.	28
2.6. Par Inducido del Motor de Inducción.	28
2.7. Velocidad del Motor con un Par de Carga de 50KW.	29
2.8. Par Inducido al Aplicar una Carga de 50KW.	29
2.9. Potencia Demandada por el Motor de Inducción.	30
2.10. Máquina de Inducción como Generador.	31
2.11. Velocidad del Generador Asíncrono.	31
2.12. Potencia Generada del Generador de Inducción.	32
2.13. Potencia Generada en Estado Estable.	32
2.14. Potencia Reactiva Demandada por el Generador de Inducción.	33
2.15. Potencia Reactiva Demandada por el Generador de Inducción en Estado Estable	33
3.1. Componentes del Modelo de Turbinas Eólicas.	36
3.2. Turbinas Eólicas Impulsada por un Generador Asíncrono Jaula de Ardilla por Medio de una Caja de Velocidades.	38
3.3. Turbina Eólica Impulsada por un Generador Asíncrono Jaula de Ardilla Conectada a un Convertidor de Frecuencia Variable	39
3.4. Turbina Eólica acoplada a un Generador Asíncrono de Rotor Devanado Doblemente Alimentado.	39
3.5. Turbina Eólica Directamente Conectada a un Alternador de Imanes permanentes	40
3.6. Sistema de Generación Aislado.	41

3.7. Sistema de Excitación.	42
3.8. Generador de Potencia.	44
3.9. Características de la Turbina de Viento.	44
3.10. Velocidad del Generador Asíncrono.	46
3.11. Potencia Real Generada por el Sistema.	46
3.12. Simulación de (a) Potencia Reactiva Generada por el Condensador Síncrono y (b) acercamiento al valor estable de la Potencia Reactiva	47
3.13. Simulación de (a) Potencia Reactiva Generada por el banco de baterías y (b) Acercamiento de esta misma.	48
3.14. Simulación de (a) Potencia Reactiva Consumida por el Generador de Inducción y (b) Valor de Dicha Potencia en Estado Estable.	49
3.15. Voltaje del Sistema.	50
3.16. Frecuencia del Sistema.	51
3.17. Aplicando una Velocidad Variable al Sistema.	52
3.18. Datos del Viento Medidos en un Periodo de 24 horas	53
3.19. Velocidad del Generador Asíncrono.	54
3.20. Generación del Sistema con una Velocidad Variable.	54
3.21. (a) y (b) Potencia reactiva Generada por el Condensador Síncrono.	55
3.22. Potencia Reactiva Aportada por el Banco de Capacitores Durante (a) un periodo de 24 horas y (b) Valor de Estado Estable.	56
3.23. Potencia Reactiva Aportada por el Generador Asíncrono Durante (a) un periodo de 24 horas y (b) el valor Final de Estado Estable.	57
3.24. Frecuencia del Sistema.	58
3.25. Voltaje del Sistema de Generación Durante (a) la Operación en el Intervalo de 24 horas y (b) acercamiento al periodo de 0 a 3 horas.	59
4.1. Esquema General del Sistema Aislado.	61
4.2. Diagrama del Arrancador para la Máquina de Inducción.	62
4.3. Determinación de la Entrada en Funcionamiento de los Motores de Inducción.	64
4.4. Esquema del Regulador de Frecuencia.	65
4.5. Control de Frecuencia.	66

4.6. Banco de Resistencias.	66
4.7. Generador Aislado con el Control de Frecuencia.	67
4.8. Variación de la Velocidad del Viento.	68
4.9. Frecuencia del Sistema ante la Variación del Viento	69
4.10. Velocidad del Generador Asíncrono.	69
4.11. La Potencia Absorbida por la Carga Resistiva del Controlador de Frecuencia.	70
4.12. Potencia Generada por el Sistema de Generación Aislado con Variaciones de la Velocidad del Viento.	71
4.13. Potencia Reactiva que Aporta el Condensador Síncrono al Sistema de Generación Aislado.	71
4.14. Potencia Reactiva que Aporta el Banco de Capacitores.	72
4.15. Potencia Reactiva Consumida por el Generador Asíncrono.	72
4.16. Conexión de las Resistencias del Control de Frecuencia.	73
4.17. Sistema de Generación Aislado con Controlador de Frecuencia y Sistema de almacenaje de Energía.	74
4.18. Velocidad del Viento en la Localidad de la Venta , en el Estado de Oaxaca.	75
4.19. Frecuencia del Sistema.	76
4.20. Velocidad del Generador Asíncrono.	76
4.21. (a) Potencia Generada por el Sistema de Generación Aislada y (b) Conexión de los motores del sistema del bombeo.	77
4.22. Potencia Absorbida por el Banco de Resistencias Secundarias	78
4.23. Entrada en Operación de las Resistencias Secundarias.	79

Lista de Tablas

1.1. Desarrollo de Turbinas Eólicas en Tamaño y Capacidad entre 1985 y 2003.	6
1.2. Capacidad Mundial de Energía Eólica en Operación.	7
1.3. Capacidad Operativa de Energía Eólica en América del Sur y Central A Finales de 2003.	8
1.4. Comparación de la Generación de Electricidad en México respecto al Mundo.	9
1.5. Inversiones en Marcha y Programadas en México.	10
2.1. Ecuaciones de la Máquina de Inducción en el Marco de Referencia Arbitrario.	26
2.2. Parámetros de la Máquina de Inducción.	27
3.1. Estimación del valor α para distintos terrenos.	36
3.2. Parámetros de la Máquina Síncrona.	43
3.3. Parámetros del Generador Asíncrono.	45
3.4. Datos Generales del Recurso Eólico en una Localidad de Oaxaca.	51
4.1. Capacidad de cada Resistencia en Potencia Real.	74

Lista de Símbolos y Abreviaturas

PID	Ganancia proporcional e integral derivativo.
GD	Generación distribuida.
KVA	Kilo volts ampers.
KW	Kilo watts.
MW	Mega watts.
Q_a^e	Angulo eléctrico.
ω_e	Velocidad angular.
f_e	Frecuencia de las corrientes.
N_s	Velocidad síncrona.
ω_{rm}	Velocidad angular mecánica.
ω_{sm}	Velocidad angular síncrona.
ω_{rm}	Velocidad angular del rotor.
S	Deslizamiento.
V_{as}, V_{bs}, V_{cs}	Voltaje en el estator en coordenadas abc .
V_{ar}, V_{br}, V_{cr}	Voltaje en el rotor en coordenadas abc .
λ_s^{abc}	Enlaces de flujo.
L_{ss}	Inductancias en el estator.
L_{rs}	Inductancias en el rotor.
L_{ls}	Inductancia de dispersión del estator.
L_{sm}	Inductancia mutua.
N_s, N_r	Número de vueltas de las bobinas del estator y rotor.

p_g	Entrehierro.
f	Voltaje, corriente, o enlaces de flujo.
V_r^{dq0}	Voltaje en el rotor en el marco de referencia $dq0$.
i_{qs}	Corriente en el estator.
V_{qs}	Voltaje en el estator.
E_{qs}	Fuente de voltaje del estator.
X_{ls}	Reactancia en el estator.
X'_{sr}	Reactancia del rotor.
r'_r	Resistencia del rotor.
i_{qr}	Corriente en el rotor.
V'_{qr}	Voltaje en el rotor.
E'_{qr}	Fuente de voltaje en el rotor.
P_{in}	Potencia instantánea.
rpm	Revoluciones por minuto.
$KVAr$	Kilo volts Ampers Reactivos.
$V(h)$	Velocidad del viento que se desea estimar.
V_0	Velocidad del viento conocida.
h	Altura.
h_0	Altura de referencia.
α	Valor que depende de la rugosidad.
P_ω	Potencia debida al viento.
ρ	Densidad específica del aire.
A	Área.

C_p Coeficiente de eficiencia aerodinámica.

$V\omega$ Velocidad del viento.

pu Por unidad.

Hz Hertz.

s Segundo.

P Potencia real.

R Resistencia.

Q Potencia reactiva.

Capítulo 1

Introducción

La disponibilidad de la energía eléctrica es un factor importante en la calidad de vida de la población. A pesar de esto, en nuestro país una parte significativa de la población rural no dispone de energía eléctrica. Esto se debe al alto costo de los sistemas de distribución de baja tensión en regiones de escasa densidad poblacional y de difícil acceso.

Una solución al problema de abastecimiento de energía es el aprovechamiento de fuentes de energía renovable, sistemas de captación y sistemas de almacenamiento descentralizado y autónomo. Estos sistemas constituyen una solución eficiente y económica para resolver el abastecimiento del habitante rural disperso sin acceso a servicios esenciales (gas, agua y electricidad) [Labriola 2007].

En regiones en donde se disponen de vientos regulares, la solución más económica y socialmente viable es la utilización de aerogeneradores. Es por ello que en esta tesis se propone la implementación de una red aislada basada en un generador eólico usando una máquina de inducción y una turbina de viento para abastecer una comunidad cuya demanda es de 50KW. Se utiliza un modelo ya existente en Simulink/Matlab para la máquina de inducción y turbina de viento, en donde el modelo de la turbina permite especificar datos de entrada como la velocidad del viento.

1.1 Antecedentes

La Generación Distribuida (GD) representa un cambio en el paradigma de la generación de energía eléctrica centralizada. Aunque se pudiera pensar que es un concepto nuevo, la realidad es que tiene su origen, de alguna forma, en los inicios mismos de la generación eléctrica. De hecho, la industria eléctrica se fundamentó en la generación en el sitio del consumo. Posteriormente, como parte del crecimiento demográfico y de la demanda de bienes y servicios, se evolucionó hacia el esquema de Generación Centralizada. Con el tiempo, la generación eléctrica se estructuró como se conoce hoy en

día, es decir, con corriente alterna y transformadores, lo que permite llevar la energía eléctrica prácticamente a cualquier punto alejado del centro de generación. Bajo este escenario, se perdió el concepto de Generación Centralizada (centro geométrico del consumo), ya que las grandes centrales se encuentran en lugares distantes de las zonas de consumo, pero cerca del suministro del combustible y el agua. En los años setentas, factores energéticos (crisis petrolera), ecológicos (cambio climático) y de demanda eléctrica (alta tasa de crecimiento) a nivel mundial, plantearon la necesidad de alternativas tecnológicas para asegurar, por un lado el suministro oportuno y de calidad de la energía eléctrica y, por el otro, el ahorro y el uso eficiente de los recursos naturales [CONAE 2005].

En la actualidad, el desarrollo de la tecnología de generación eólica es utilizado a gran escala en el mundo. Donde beneficia a grandes ciudades y pequeñas comunidades rurales. Debido a lo complejo del problema para el desarrollo de proyectos que involucran la generación eólica, se puede encontrar en la literatura diversos enfoques de solución. Por ejemplo, en [Alvar 2006] se plantea un sistema electrónico de control de una turbina eólica de velocidad variable de 250KVA. Se diseña e implementa el sistema de control basado en un procesador digital de señales (DSP) para controlar un convertidor de tres niveles y realizar la comunicación entre una computadora y la electrónica de control de la turbina del aerogenerador. En [Labriola 2007] se reporta el desarrollo de una turbina eólica diseñada para los vientos de la Patagonia, caracterizados por su estacionalidad (primavera-verano) y ráfagas de viento (hasta 47 m/s). En [Sans 2006] se propone un proyecto de viabilidad de un parque eólico considerando, en donde se propone obtener energía eléctrica a partir de un molino de multipalas con un buen rendimiento usando un generador de inducción y los componentes adicionales para la conversión de energía. Además, se propone la instalación de pequeñas mini centrales de grupo eólico de producción de energía eléctrica para conectar a la red de suministro. Por su parte, en la Universidad de Magallanes [Gallardo 2002] se ha desarrollado conocimiento en la instalación de sistemas de generación. En una escuela rural en Villa Tehuelche (Chile) en donde la velocidad del viento es de 8 m/s a una altura de 10 m, se instalaron dos aerogeneradores de 1KW de potencia cada uno montados sobre torres de 12 m, cuya carga se almacena en un banco de baterías. El controlador fue

diseñado para alimentar un circuito especial de iluminación con lámparas fluorescentes de bajo consumo y disipar el exceso de carga en calefactores ambientales.

Un sistema autónomo de conversión de energía eólica de velocidad variable aplicado al bombeo de agua es presentada en [Camocardi 2004]. Dicho sistema consiste de una turbina eólica, un generador síncrono, un motor de inducción, una bomba centrífuga y bancos de batería. Se realiza un análisis de los flujos de potencia considerando diferentes estrategias de control.

En [Pazmiño e Hidalgo 2007] se presenta un proyecto para la medición del recurso eólico. La potencia eléctrica que se pretende suministrar dependerá de la disponibilidad del potencial eólico en el campus Prosperina que se encuentra en Guayaquil, Ecuador, el cual está siendo evaluado por sensores de precisión instalados en una torre de 40m de altura. Además de los sensores que están dispuestos en las torres a alturas de 10, 25 y 40m que se emplean para la recopilación de los datos de la velocidad y dirección del viento, se hace uso de equipos de almacenamiento de datos con el fin descargarlos una vez por mes y someterlos a análisis posteriores.

En [Vargas 2003] se presenta un análisis estacionario y dinámico de la operación de parques eólicos interconectados al sistema eléctrico. Se consideran tecnologías de generación de velocidad fija y variables, usando como plataforma de simulación el DigSilent. Los resultados muestran el efecto de distintos niveles de penetración en el factor de potencia y la regulación de tensión de una empresa de distribución. Por su parte, en [Martínez 2007] se presenta el modelo en espacio de estado de un sistema híbrido eólico-fotovoltaico. Se presenta la operación del sistema híbrido durante su solución transitoria y de estado estable, incorporando un banco de baterías para proporcionar un medio de almacenamiento de la energía.

1.1.1 Definición de generación distribuida

En la actualidad no existe una definición clara de lo que es la generación distribuida, sin embargo, una definición que se ha adoptado es la que IEEE ha establecido como *“Las instalaciones de generación eléctrica que se conectan a un área del SEP (sistema eléctrico de potencia) a través de un PCC (punto común de conexión); un subconjunto de RD (recursos distribuidos), en donde RD es la fuente de energía eléctrica que no está*

directamente conectada al sistema de transmisión de potencia. RD incluye tanto los generadores de energía como las tecnologías de almacenamiento” [IEEE_1547, 2003].

Desde hace mucho tiempo existe la GD aislada, sobre todo con plantas de emergencia con generadores diesel para asegurar la confiabilidad del suministro eléctrico. Para la GD aislada en lugares apartados con pequeñas demandas, los sistemas fotovoltaicos, eólicos, híbridos fotovoltaico/eólicos y las pequeñas centrales hidroeléctricas, son las tecnologías con mejores perspectivas y económicamente viables. De esta forma al hacer uso de energéticos locales se evita el suministro de combustibles fósiles hasta lugares remotos o la necesidad de extender la red eléctrica a grandes distancias. En tiempos recientes se ha venido aprovechando la GD aislada, principalmente en aprovechamientos en arreglos fotovoltaicos con capacidades que van desde pequeñas cantidades hasta decenas de kilowatts. Estos sistemas suministran energía para aplicaciones específicas como telecomunicaciones, señalización, bombeo de agua en sitios alejados de la red eléctrica o dentro del propio sector eléctrico para aplicaciones de bajo voltaje en líneas de alta tensión, entre otras [CONAE 2005].

El éxito de la difusión y fomento de la GD radica en la existencia de tecnologías de punta que permitan generar energía eléctrica en forma eficiente, confiable y de calidad. Estas tecnologías se pueden dividir en tecnologías de generación y almacenamiento como se muestra en la Figura 1.1. Las tecnologías de generación se dividen, a su vez, en convencionales y no convencionales. Las primeras incluyen a las turbinas de gas, motores de combustión interna y microturbinas. Las segundas se refieren a las energías renovables, como la mini hidráulica, geotérmica, biomasa, las turbinas eólicas, celdas de combustibles y celdas fotovoltaicas. Las tecnologías de almacenamiento comprenden a las baterías, los volantes de inercia, las bobinas superconductoras, imanes y almacenamiento a base de hidrógeno y embalses para almacenamiento de agua [CONAE 2005].

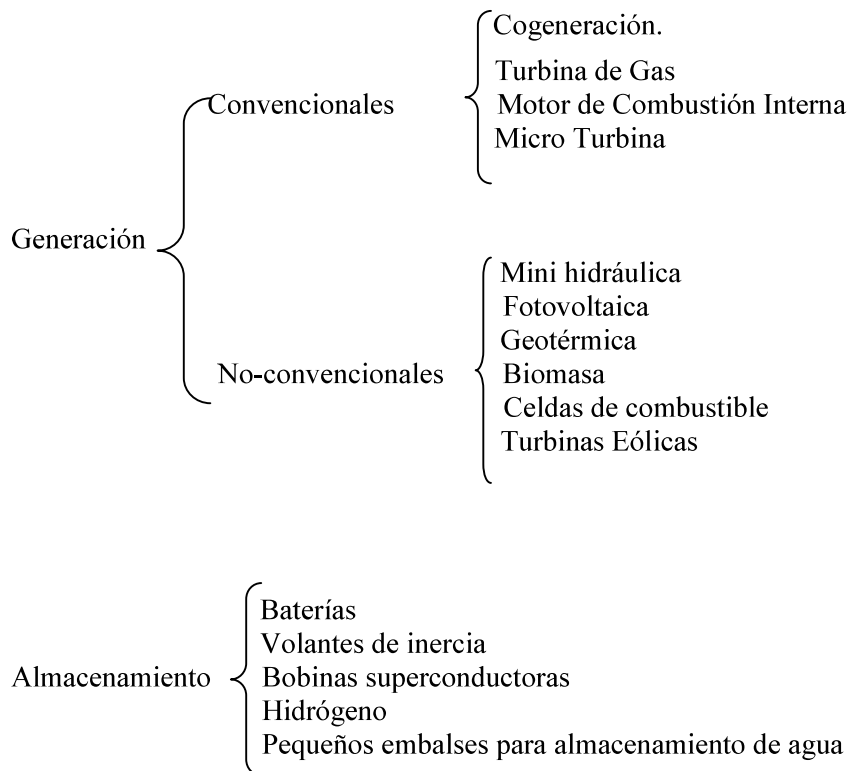


Figura 1.1. Tipos de generación y almacenamiento.

La energía del viento como fuente de energía renovable ha sido utilizada por lo menos desde hace 3000 años. Hasta principios del siglo XX, la energía eólica se utilizaba para proporcionar energía mecánica, para bombear el agua o para moler granos. A partir del inicio de la industrialización moderna, el uso de los recursos de la energía eólica fue sustituido por los recursos de los combustibles fósiles. A principios de 1970, con la crisis del precio del petróleo, el interés en la energía del viento reapareció. Esta vez, sin embargo, la principal atención de la explotación de la energía eólica se centró en el suministro de la generación de energía eléctrica.

Tabla 1.1 Desarrollo de turbinas eólicas entre 1985 y 2004.

año	Capacidad(kw)	Diámetro del rotor(m)
1985	50	15
1989	300	30
1992	500	37
1994	600	46
1998	1500	70
2003	3000-3600	90-104
2004	4500-5000	112-128

Los antecedentes históricos del desarrollo de turbinas eólicas para generación de electricidad se remontan a los trabajos del danés Poul Lacour en el siglo XIX. Después de la segunda guerra mundial, Johannes Juul de Dinamarca mejoró la filosofía del danés Poul Lacour. Su turbina, instalada en Gedser, Dinamarca, generó cerca de 2,2 millones de KWH entre 1956 y 1967. Al mismo tiempo, el alemán Hutter desarrollo un nuevo enfoque de aerogenerador con dos delgadas láminas de fibra de vidrio montada a sotavento (sentido opuesto al señalado por los vientos dominantes) de la torre en un centro balanceado. Esta turbina de Hutter fue conocido por su alta eficiencia [Ackermann 2005].

Los primeros aerogeneradores para generación de electricidad ya se habían desarrollado a principios del siglo XX y se mejoró la tecnología a partir del año de 1970. A finales de los 90s, la energía eólica aparece como uno de los más importantes recursos de energía sostenible y su costo ha disminuido alrededor de una sexta parte del costo en el año de 1980 y la tendencia parece continuar.

La tecnología de la energía eólica, ha avanzado muy rápido en la capacidad de generación. A finales de 1989 un aerogenerador con un rotor de 30 metros de diámetro tenía una capacidad de 300KW. Sólo 10 años más tarde, las turbinas con una generación de 2000 KW y con un diámetro de rotor de alrededor de 80 metros estaban disponibles por muchos fabricantes. La primera demostración de proyectos utilizando aerogeneradores de 3 MW con un diámetro del rotor de 90 metros se instalaron a finales del siglo XX. En la actualidad, las turbinas de 3 a 3.6MW de generación están disponibles comercialmente. A principios del 2004 las turbinas 4-5 MW de generación se estaban construyendo o ya se han probado en proyectos demostrativos (Ver Tabla 1.1) y se espera contar con turbinas de 6-7MW de generación en el futuro próximo [Ackermann 2005].

1.1.2. Estado Actual de la Energía Eólica en todo el Mundo

A pesar que la energía eólica es la tecnología de energía de más rápido crecimiento desde el año de 1990, el crecimiento de la energía eólica no ha podido distribuirse uniformemente en todo el mundo (ver Tabla 1.2). A finales de 2003, alrededor del 74% de la capacidad de energía eólica en todo el mundo se instaló en Europa, un 18% en América del Norte y un 8% en Asia y el Pacífico.

Europa: Entre 1995 y finales de 2003, alrededor del 74% de todos los nuevos aerogeneradores conectados a la red en todo el mundo, se instalaron en Europa (ver Tabla 1.2). Los países con mayor capacidad eólica instalada en Europa son Alemania, España y Dinamarca. En el año 2006 en Europa están operando aerogeneradores con una capacidad total de 73.904MW

Tabla 1.2 Capacidad mundial de energía eólica en operación (MW).

Región	1995	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2006
Europa	2518	4766	9307	12972	17500	21319	28706	73.904
América del Norte	1676	1611	2619	2695	4245	4708	6677	13.063
América del Sur y Central	11	38	87	103	135	137	139	516
Asia y el Pacífico	626	1403	1403	1795	2330	2606	3034	4131.7
Medio oriente y África	13	39	39	141	147	149	150	337

América del Norte: Después del gran auge de la energía eólica en California durante los 80's, el desarrollo de proyectos se detuvo significativamente en América del Norte. El desmantelamiento de los viejos parques eólicos en ocasiones ha rebasado las instalaciones de las nuevas turbinas de viento, lo que condujo a una reducción de la capacidad instalada. En 1998 un segundo auge comenzó en los E.U. ya que entre mediados de 1998 y 1999 se instalaron más de 800 MW de nueva generación de energía eólica. Un desarrollo similar tuvo lugar antes de finales de 2001, que añadió 1.600 MW entre 2001, y

mediados de diciembre de 2001. A finales de 2003, se concreto la instalación adicional de 1.600 MW. En el año 2006 es incremento para América del Norte es de 13.063MW

América del Sur y Central: A pesar de los numerosos recursos de energía eólica en muchas regiones de América del Sur y Central, el desarrollo de la energía eólica ha sido muy lento debido a la política de bajos precios de la electricidad (ver Tabla 1.3). Argentina, sin embargo, presentó una nueva política a finales de 1998, aunque con poco éxito, que ofreció apoyo financiero a la generación de energía eólica. En Brasil algunas empresas de servicios públicos y gobiernos regionales han empezado a ofrecer mayores primas en las tarifas de la energía eólica, es por eso que en el año 2006 respecto al 2003 tenemos un aumento del 31.7%.

Tabla 1.3. Capacidad operativa de energía eólica en América del Sur y Central a finales de 2003 y 2006 (MW)

país	2003	2006
Costa rica	71	74
Argentina	26	29
Brasil	22	236
Caribe	13	13
México	4	84
Chile	2	2
TOTAL	139	438

1.1.3. Situación Actual en México

En México el gran reto en el mediano plazo está en la generación de energía eléctrica a medida que los recursos petroleros sean más escasos y caros. La tendencia del crecimiento de la generación en México se enfoca al fomento de la generación térmica. Sin embargo, es necesario crear estímulos fiscales y financiamientos no solo para los empresarios sino también para personas que pueda tener acceso a fuentes renovables.

Actualmente existen varias opciones de generación de electricidad a niveles comerciales, tales como generación térmica, hidráulica, eólica, solar, orgánica, geotérmica y nuclear. En la Tabla 1.4 se presenta una comparación de la estructura de generación de

electricidad en México y su tendencia de crecimiento respecto a la tendencia mundial [Álvarez 2004].

Tabla 1.4 Comparación de la generación de electricidad en México respecto al mundo.

	1992	2002	2007
Capacidad instalada de energía geotérmica			
México	750	843	960
Capacidad mundial	23,139	54,636	56,798
Capacidad instalada de energía mundial en hidroeléctrica			
México	7,993	9,6355	11,343
Capacidad mundial	602,639	723,581	778,083
Capacidad instalada de energía nuclear			
México	0.675	1.365	1.365
Capacidad mundial	329,872563	361,1029	370,576
Capacidad instalada de energía convencional térmica			
México	21,327	23,264	23,264
Capacidad mundial	1791,414	2325,568	1,300.000
Capacidad instalada de energía eólica			
México	2	2	85
Capacidad mundial	13,696	31,164	93,849

Fuente: World Energy Council 2007

Respecto a la energía hidráulica, México se encuentra dentro de los parámetros mundiales gracias a las inversiones en el Cajón y Agua milpa. Las inversiones programadas en México para los próximos años se indican en la Tabla 1.5. Como se puede ver, la tendencia de crecimiento en México es contraria a la tendencia mundial, ya que se ha incrementado la generación térmica por sobre las demás fuentes de generación [Álvarez 2004]. Además, se puede apreciar que a pesar del potencial con el que cuenta el país, las inversiones en energía solar y orgánica son nulas.

Tabla 1.5. Inversiones programadas y en marcha en México en 2002.

Generación	Millones de KW	%
Eólica	0.101	0.56%
Solar	-----	-----
Geotérmica	0.210	1.17%
Orgánica	-----	-----
Hidroeléctrica	1.678	9.38%
Térmica	15.898	88.87%

1.2. Descripción del Problema

Comúnmente, un sistema eléctrico aislado para una gran comunidad que integra la energía eólica, incorpora también un respaldo de energía basado en un generador diesel para los instantes en que se tiene un recurso eólico pobre. La operación de este sistema diesel-eólico presenta algunos aspectos técnicos que deben de cuidarse originados precisamente por la variabilidad del recurso eólico. Algunos de estos aspectos técnicos a observar son:

- Control de frecuencia, estabilidad de voltaje y limitada distorsión armónica
- Las condiciones de funcionamiento de los generadores diesel, especialmente en lo que respecta a carga mínima;
- Disposiciones para la utilización de los excedentes de energía eólica.

La relación que se tiene con el estudio es controlar el sistema aislado tanto en su frecuencia como el voltaje por medio de controles.

Los sistemas de energía diesel-viento pueden variar desde simples diseños en los que los aerogeneradores están conectados directamente a la red con un mínimo de características adicionales hasta sistemas más complejos. La incorporación de la energía eólica a las plantas de diesel implica que la producción de energía a partir de los aerogeneradores está controlada por el viento. Es decir, la mayoría de las turbinas no

pueden controlar, el voltaje o la frecuencia de línea y debe utilizar otro tipo de equipo para hacerlo. Considerando pequeñas cantidades de energía eólica los motores diesel pueden ofrecer esta función de control, pero con grandes cantidades de energía eólica se requiere el uso de equipo adicional, el cual puede estar integrado por controladores de electrónica de potencia.

En este sentido existen dos aspectos relevantes a tomar en cuenta en el diseño de sistemas basados en diesel-viento:

Existen dos cuestiones de gran influencia en el diseño del sistema y sus componentes: la cantidad de energía que se espera de las fuentes renovables y la capacidad del sistema para poder mantener un equilibrio de potencia entre generación y consumo. La configuración más sencilla de un sistema viento-diesel se muestra en la Figura 1.2, en donde generadores de inducción con turbina de viento se conectan a la red de CA del sistema. Esto representa un sistema eléctrico de baja penetración.

Cuando la potencia de salida de la turbina de viento es mucho menor que la potencia del consumidor menos la carga mínima del sistema diesel, se activa el control de la frecuencia y el regulador de voltaje del generador síncrono del sistema diesel controla el voltaje.

En el caso que la potencia de salida del aerogenerador sea mayor a la potencia consumida por la carga, se puede implementar un control que absorba el excedente de potencia generada. Este control del excedente de potencia permite regular la frecuencia del sistema. Una alternativa para implementar este control se basa en el uso de resistencias de carga, los cuales se encargan de disipar el excedente de energía.

Si el aerogenerador puede producir más potencia de lo que se demanda entonces es necesario incluir también un sistema de almacenamiento de energía para suavizar las fluctuaciones de la energía eólica. En este caso, los excedentes de energía se almacenan para su posterior utilización cuando la demanda se incrementa. Si la energía producida por el viento es mayor que la demanda de la carga, entonces es posible apagar por completo todos los generadores diesel. Aunque este escenario maximiza el ahorro de combustible se requiere un estricto control de todos los componentes del sistema eléctrico para garantizar la estabilidad del sistema. Además, el carácter fluctuante de la energía eólica puede plantear problemas adicionales para el control y la regulación del sistema.

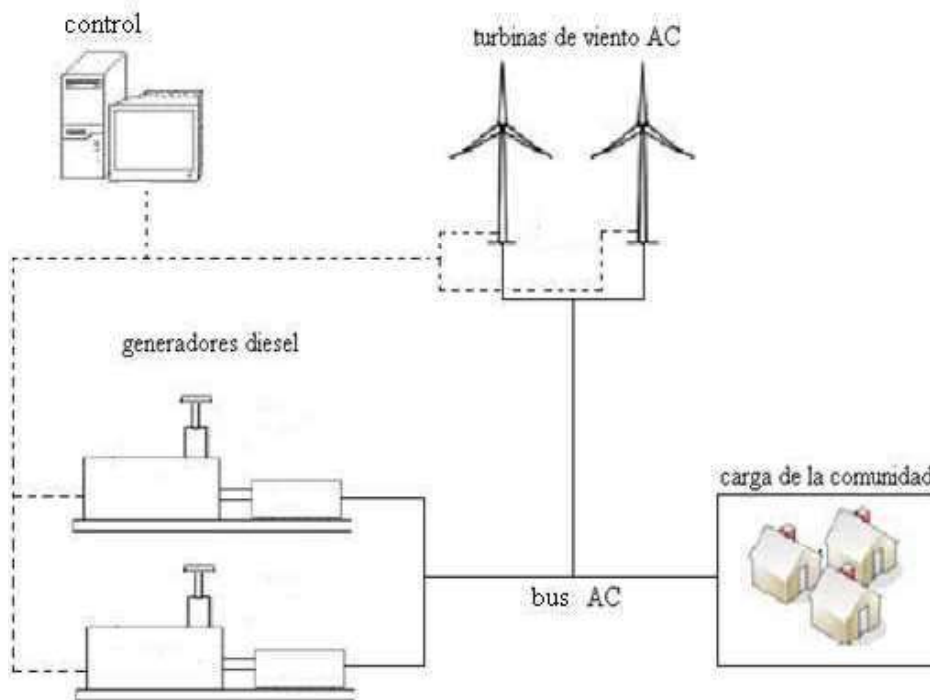


Figura 1.2. Configuración de un sistema diesel-eólico.

El almacenamiento puede ser utilizado para suavizar las fluctuaciones en la carga. Por lo general, se utilizan bancos de baterías o volantes de inercia. Otras formas de almacenamiento que se han propuesto o experimentado son la aplicación de almacenamiento por bombeo, en donde el exceso de potencia se utiliza para bombear agua en un depósito para poder utilizarla posteriormente para impulsar la bomba en sentido inverso para generar electricidad.

1.3. Objetivos

El objetivo principal de esta tesis es estudiar, por medio de simulación en Simulink/Matlab, el desempeño de un generador eólico conectado a una red aislada. La simulación proporciona información del comportamiento dinámico del sistema eléctrico y su sistema de control que ayuda a mantener la frecuencia del sistema con la finalidad de

abastecer de energía eléctrica en poblaciones rurales. A su vez, se incorpora un sistema básico de almacenamiento de energía constituido por un sistema de bombeo para aprovechar los excedentes de potencia que se viene dando por las variaciones del viento.

Los objetivos particulares de esta tesis son:

- Simular la operación de la máquina de inducción conectada a un bus infinito.
- Simular la operación del generador eólico conectada a una red aislada.
- Implementar un control para la regulación de la frecuencia en una red aislada que presenta excedentes de energía.
- Incorporar un sistema básico de almacenamiento de energía basado en el bombeo de agua que permita hacer uso del excedente de energía en el sistema.

1.4. Justificación

En este trabajo se analiza una alternativa para abastecer de energía eléctrica a comunidades rurales en donde las líneas de distribución de las empresas suministradoras no pueden llegar por los altos costos en infraestructura. En este estudio se analiza el desempeño de un aerogenerador con la finalidad de generar energía renovable para alimentar a una pequeña población. De esta forma se pueden resolver algunas de sus necesidades básicas de la comunidad como son el alumbrado y refrigeración. Además, se propone aprovechar el exceso de energía en las horas de mayor velocidad de viento mediante el uso de un sistema de bombeo de agua.

1.5. Metodología

En este trabajo de tesis se modela el generador eólico por medio de una máquina asíncrona y una turbina de viento. El modelo de la turbina permite especificar datos de entrada como la velocidad del rotor y el par, los cuales están en función de la velocidad del viento y la velocidad de la turbina. La implementación de la máquina asíncrona trifásica se basa en un modelo en el marco de referencia dq , con una capacidad de 275KVA. El generador se opera en conjunto con una máquina síncrona operada como condensador

síncrono con el objeto de constituir una red eléctrica aislada. La máquina síncrona es modelada en el marco de referencia dq y con una capacidad 300KVA.

Algunos elementos adicionales del sistema eléctrico aislado como la carga del sistema se representa con resistencias trifásicas con la finalidad de hacer la simulación, tanto para la carga principal que alimenta el sistema aislado como cargas adicionales que se conectan al mismo para la regulación de la frecuencia. Se incluye un banco de capacitores para compensar la potencia reactiva demandada por la máquina asíncrona. Además, se incorporan seis máquinas de inducción que constituyen un sistema de bombeo con la finalidad de aprovechar el exceso de potencia generada debido a las variaciones del viento. Se utiliza el simulador Simulink/Matlab ya que cuenta con modelos de circuitos eléctricos, circuitos electrónicos y máquinas eléctricas.

1.6. Descripción de los capítulos

El presente trabajo está estructurado en cinco capítulos, los cuales se describen a continuación:

En el capítulo 1 se presenta los antecedentes más relevantes sobre generación distribuida y la energía eólica. Se mencionan los objetivos, justificación y metodología de esta tesis.

En el capítulo 2 se presenta el modelo de la máquina de inducción incluyendo diagrama eléctrico, formulación y simulación en el programa Simulink/Matlab operando como motor o generador.

En el capítulo 3 se presenta el generador eólico aislado y se describen las partes que lo componen. Se reporta el desempeño del aerogenerador bajo condiciones de velocidad variable.

En el capítulo 4 se presenta el estudio de una red aislada basada en un aerogenerador y un controlador de frecuencia en base en la conexión de carga.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se mencionan los trabajos futuros.

Capítulo 2

La máquina de inducción

En este Capítulo se presentan los fundamentos de la máquina de inducción, así como también la descripción de su modelo matemático. Se presenta su comportamiento por medio de simulación en Simulink/Matlab bajo condiciones de operación como motor y generador.

2.1. Generador Asíncrono

El funcionamiento de un generador asíncrono se logra al aplicar una velocidad mayor a la de sincronismo mediante un motor primario externo. Como consecuencia de esta velocidad se invierte la dirección de su par inducido y comenzará a operar como generador. Conforme se incrementa el par que aplica el motor primario a su eje, se incrementa la cantidad de potencia producida. El generador asíncrono demanda potencia reactiva para mantener el campo magnético de su estator ya que esta máquina no posee un circuito independiente de excitación como es el caso de los alternadores. Esta es la principal limitación de los generadores asíncronos, ya que al necesitar una red que le proporcione la potencia reactiva, no puede funcionar como generador aislado como sucede en los alternadores. Uno de los principales problemas de este tipo de máquinas, es que su factor de potencia es relativamente bajo, alrededor de 0.8 a 0.9 en plena carga y este factor de potencia disminuye a menor carga.

La principal ventaja del generador asíncrono reside en su sencillez ya que no necesita un circuito independiente para su excitación, no gira a una velocidad fija y basta que su velocidad sea superior a la de sincronismo. Otra de las razones para la elección de este tipo de generador reside en su confiabilidad y menor costo. Este tipo de generador se emplea, en centrales eólicas en donde las velocidades de viento son muy dispares y no requiere regulación de voltaje debido a que ésta viene impuesta por la red externa. La mayoría de turbinas eólicas utilizan un generador asíncrono trifásico jaula de ardilla [Sans 2006].

2.2. Construcción de la máquina de inducción trifásica

La mayoría de motores de inducción son de tipo rotatorio, básicamente, con un estator estacionario y un sistema de rotación del rotor. El núcleo magnético del estator está formado por el apilamiento de laminaciones finas de acero con ranuras espaciadas, uniformemente selladas en la circunferencia interior para dar cabida a los tres devanados del estator. Para máquinas de 60 Hz, el laminado es de aproximadamente 0,5 mm de espesor. Los devanados del estator se forman mediante la conexión de conductores de cobre o aluminio. Los ejes de los devanados del estator de una máquina de P – polo son espaciadas $(2/P)(2\pi/3)$ radianes mecánicos. Las terminales de las tres fases y los bobinados del estator pueden ser conectados en estrella o delta.

El rotor está compuesto de un núcleo de hierro laminado cilíndrico uniformemente espaciado con ranuras periféricas. Hay dos tipos principales de rotor bobinado: el rotor devanado y el rotor de jaula de ardilla. El rotor devanado tiene un conjunto completo de devanados trifásicos similares a los devanados del estator. Las tres fases de los devanados del rotor están normalmente conectadas en estrella, y los extremos de los tres conductores del rotor están unidos a los anillos deslizantes en el eje del rotor. El rotor jaula de ardilla consta de una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras en la cara del rotor y en cortocircuito en sus extremos mediante anillos de cortocircuito. Se pueden conectar resistencias variables al rotor a través de los devanados de los anillos deslizantes para obtener mayor par de arranque o un control limitado de la velocidad por debajo de la velocidad síncrona [Ong 1998].

2.2.1. Campo magnético giratorio y deslizamiento

La corriente trifásica que fluye simétricamente en los devanados trifásicos del estator produce un campo giratorio dado por [Ong 1998],

$$F(\theta_a^e t) = \frac{3}{2} \frac{4}{\pi} \frac{N}{P} I_m \cos(\theta_a^e - \omega_e t) \quad (2.1)$$

en donde θ_a^e es el ángulo eléctrico medido a partir del eje de la fase a , $\omega_e (= 2\pi f_e)$ es la velocidad angular eléctrico del estator dado en radianes por segundo y f_e es la frecuencia de excitación eléctrica (Hz). La velocidad angular en radianes mecánicos por segundo es:

$$\omega_{sm} = \frac{2}{P} \omega_e \quad (2.2)$$

La velocidad síncrona en revoluciones por minuto se define como,

$$N_s = \frac{60\omega_{sm}}{2\pi} = \frac{120f_e}{P} \quad (2.3)$$

Cuando el rotor está girando a una velocidad mecánica constante ω_{rm} , la velocidad relativa o el deslizamiento entre el rotor y estator es,

$$\text{Velocidad de deslizamiento} = \omega_{sm} - \omega_{rm} \quad (2.4)$$

El deslizamiento está definido como la velocidad de deslizamiento normalizada, esto es,

$$s = \frac{\omega_{sm} - \omega_{rm}}{\omega_{sm}} = \frac{\omega_e - \omega_r}{\omega_e} \quad (2.5)$$

El deslizamiento s es negativo cuando el rotor gira por encima de la velocidad síncrona [Ong 1998].

2.3. El modelo de la máquina de inducción trifásica

La máquina de inducción trifásica posee tres devanados en el estator y tres en el rotor, los devanados del rotor pueden ser reales o ficticios.

En la Figura 2.1 se muestra una sección transversal de la máquina de inducción para el modelado matemático. Las ecuaciones del voltaje del estator y se pueden describir como,

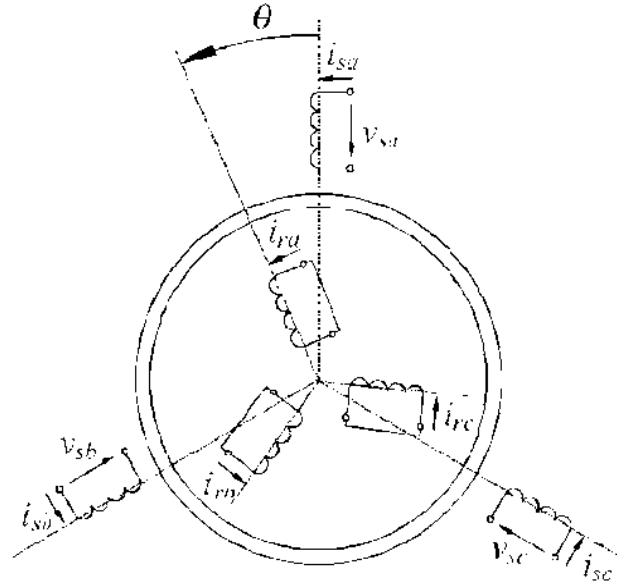


Figura 2.1. Máquina de inducción trifásica.

$$\begin{aligned} V_{as} &= i_{as} r_s + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \\ V_{bs} &= i_{bs} r_s + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \\ V_{cs} &= i_{cs} r_s + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \end{aligned} \quad (2.6)$$

y la ecuaciones de voltaje en el rotor son,

$$\begin{aligned} 0 &= i_{ar} r_r + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \\ 0 &= i_{br} r_r + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \\ 0 &= i_{cr} r_r + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \end{aligned} \quad (2.7)$$

los enlaces de flujo de los devanados del estator y el rotor, en términos de las inductancias y corrientes, se describen como,

$$\begin{pmatrix} \lambda_s^{abc} \\ \lambda_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{ss}^{abc} & L_{sr}^{abc} \\ L_{rs}^{abc} & L_{rr}^{abc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \quad [\text{Wb}] \quad (2.8)$$

en donde,

$$\begin{aligned} \lambda_s^{abc} &= (\lambda_{as}, \lambda_{bs}, \lambda_{cs})^t \\ \lambda_r^{abc} &= (\lambda_{ar}, \lambda_{br}, \lambda_{cr})^t \\ i_s^{abc} &= (i_{as}, i_{bs}, i_{cs})^t \\ i_r^{abc} &= (i_{ar}, i_{br}, i_{cr})^t \end{aligned} \quad (2.9)$$

en donde las submatrices del estator-estator y al rotor-rotor se define como,

$$L_{ss}^{abc} = \begin{pmatrix} L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} & L_{sm} \\ L_{sm} & L_{sm} & L_{ls} + L_{ss} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

$$L_{rr}^{abc} = \begin{pmatrix} L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} & L_{rm} \\ L_{rm} & L_{rm} & L_{lr} + L_{rr} \end{pmatrix} \quad (2.11)$$

en donde L_{ls} inductancia de dispersión del estator, L_{lr} inductancias de dispersión del rotor, L_{ss} es la inductancia propia del devanado del estator, L_{rr} es la inductancia propia del devanado del rotor, L_{sm} es la inductancia mutua respecto a otro devanado, L_{rm} es la

inductancia mutua respecto a otro devanado perteneciente al rotor y L_{sr} la inductancia mutua entre estator y rotor.

La matriz de inductancias mutuas entre el rotor y el estator depende de la posición relativa de los dos sistemas, como se puede observar en la Figura 2.1. La inductancia mutua entre el estator y el rotor depende de la disposición física que existe entre estos dos. En este caso la posición de los ejes de cada sistema varía en función de la velocidad de giro del rotor ω_r y del ángulo inicial θ_0 .

$$\theta_r = \theta_0 + \omega_r t \quad (2.12)$$

La matriz de inductancias mutuas entre el rotor y el estator es,

$$L_{sr}^{abc} = [L_{rs}^{abc}]^t = L_{sr} \begin{pmatrix} \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta_r \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

en donde,

$$\begin{aligned} L_{ss} &= N_s^2 P_g \\ L_{sm} &= N_s^2 P_g \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sr} &= N_s N_r P_g \\ L_{rr} &= N_r^2 P_g \\ L_{rm} &= N_r^2 P_g \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Las transformaciones matemáticas, dq o $\alpha\beta$ [Ong 1998] puede facilitar el cálculo de la solución transitoria de la máquina de inducción, ya que transforman el modelo de ecuaciones diferenciales con inductancias variables en el tiempo a ecuaciones diferenciales con inductancias constantes [Ong 1998].

2.4. Modelo de la máquina en el marco de referencia arbitrario $dq0$

En la Figura 2.2 se muestra el circuito equivalente de la máquina de inducción en el marco de referencia $dq0$.

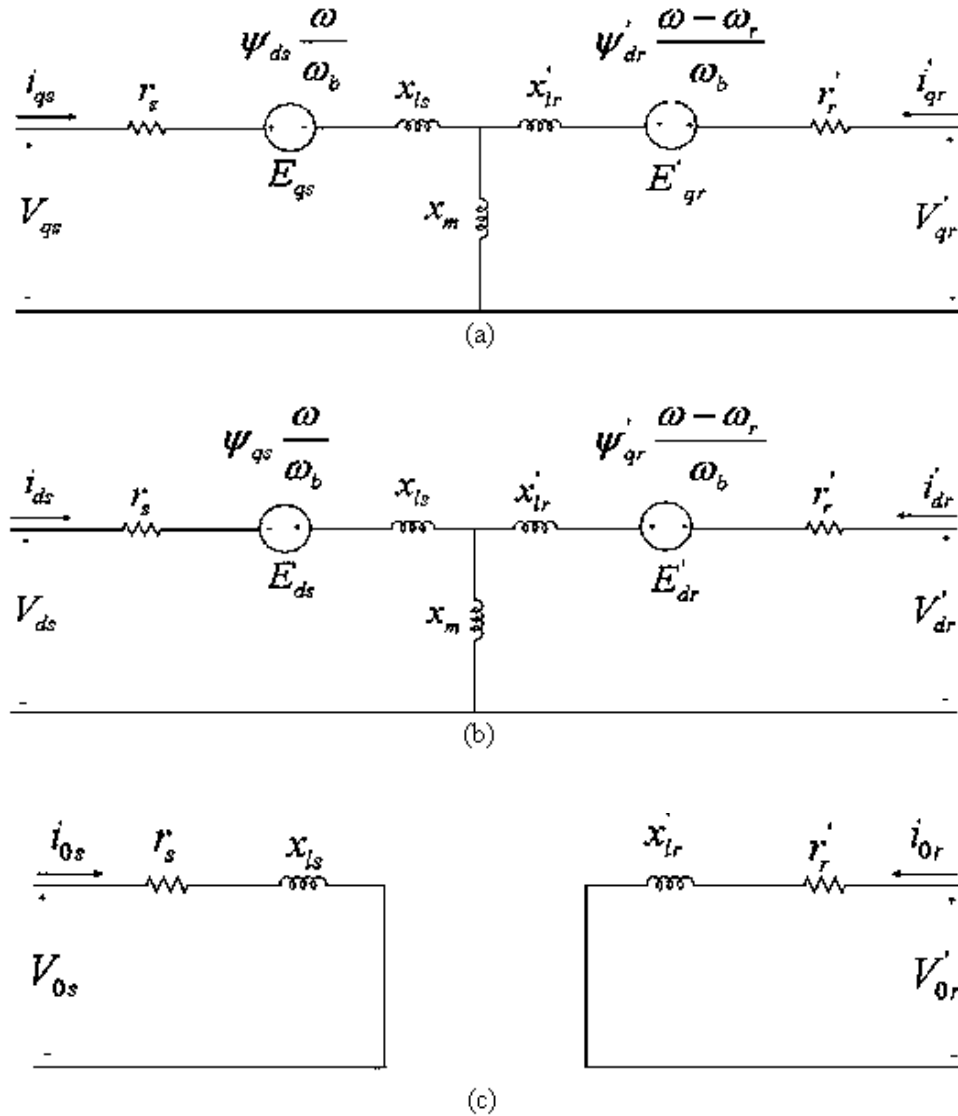


Figura 2.2. Representación equivalente de una máquina de inducción en el marco de referencia arbitrario para el a). Eje q, b). Eje d y c). Secuencia cero.

El marco de referencia $dq0$ suele ser seleccionado sobre la base de la conveniencia o la compatibilidad con las representaciones de los otros componentes de la red. Los dos marcos de referencia utilizados en el análisis de la máquina de inducción son los estacionarios y de rotación síncrona. En la referencia estacionaria, las variables dq de la máquina están normalmente en el mismo marco usado para la red suministro.

La transformación de coordenadas abc al marco de referencia $qd0$ viene dada por,

$$\begin{pmatrix} f_q \\ f_d \\ f_0 \end{pmatrix} = (T_{qd0}(\theta)) \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

en donde la variable f puede ser voltaje, corriente o enlaces de flujo de la máquina. Las matrices de transformación se definen por [Ong 1998],

$$T_{qd0}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

y la transformación inversa es,

$$T_{qd0}(\theta)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

2.4.1. Ecuaciones de voltaje en $qd0$

En notación matricial, los voltajes del estator se pueden expresar como,

$$V_s^{abc} = p\lambda_s^{abc} + r_s^{abc}i_s^{abc} \quad (2.18)$$

La aplicación de la transformación $T_{qd0}(\theta)$ a (2.18) produce,

$$V_s^{qd0} = [T_{qd0}(\theta)] p [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)] r_s^{abc} [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [i_s^{qd0}] \quad (2.19)$$

El término derivativo respecto al tiempo puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$p[T_{qd0}(\theta)]^{-1} [\lambda_s^{qd0}] = \begin{pmatrix} -sen\theta & \cos\theta & 0 \\ -sen\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -sen\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{pmatrix} \frac{d\theta}{dt} [\lambda_s^{qd0}] + [T_{qd0}(\theta)]^{-1} [p\lambda_s^{qd0}] \quad (2.20)$$

Sustituyendo (2.20) en (2.19) se obtiene,

$$V_s^{qd0} = \omega \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda_s^{qd0} + p\lambda_s^{qd0} + r_s^{qd0}i_s^{qd0} \quad (2.21)$$

en donde

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

y

$$r_s^{qd0} = r_s \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Del mismo modo, las cantidades del rotor deben ser transformadas al mismo marco qd . Mediante la transformación $T_{dq0}(\theta - \theta_r)$ se obtienen los voltajes en el rotor en $qd0$ [Ong 1998],

$$V_r^{qd0} = (\omega - \omega_r) \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \lambda_r^{qd0} + p \lambda_r^{qd0} + r_r^{qd0} i_r^{dq0} \quad (2.23)$$

2.4.2. Relación de los enlaces de flujo en $qd0$

Los enlaces de flujo del rotor y estator se expresan en forma compacta como,

$$\begin{pmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

en donde las cantidades del rotor se referencian al estator conforme la siguiente relación,

$$\lambda'_{qr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{qr} \quad \lambda'_{dr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{dr} \quad (2.25)$$

$$i'_{qr} = \frac{N_r}{N_s} i_{qr} \quad i'_{dr} = \frac{N_r}{N_s} i_{dr} \quad (2.26)$$

$$L'_{lr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{lr} \quad (2.27)$$

La inductancia magnetizante en el lado del estator L_m es [Ong 1997],

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ss} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{sr} = \frac{3}{2} \frac{N_s}{N_r} L_{rr} \quad (2.28)$$

2.4.3. Ecuaciones del par en $qd0$

La suma de la potencia instantánea de entrada en los seis devanados del estator y rotor está dado por:

$$P_{in} = v_{as} i_{as} + v_{bs} i_{bs} + v_{cs} i_{cs} + v'_{ar} i'_{ar} + v'_{br} i'_{br} + v'_{cr} i'_{cr} \quad (2.29)$$

En términos de cantidades $dq0$ la potencia instantánea es,

$$P_{in} = \frac{3}{2} (v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + 2v_{0s} i_{0s} + v'_{qr} i'_{qr} + v'_{dr} i'_{dr} + 2v'_{0r} i'_{0r}) \quad (2.30)$$

El par electromecánico desarrollado por la máquina está dada por,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \left[\omega (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) + (\omega - \omega_r) (\lambda'_{dr} i'_{qr} - \lambda'_{qr} i'_{dr}) \right] \quad (2.31)$$

La Ecuación (2.31) también puede ser expresada en la siguiente forma,

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds}) \quad (2.32)$$

La formulación de la máquina de inducción en el marco de referencia arbitrario $qd0$ se resume en la Tabla 2.1 [Ong 1998].

Tabla 2.1. Ecuaciones de la máquina de inducción en el marco de referencia arbitrario.

Ecuaciones de voltaje en el estator	$v_{qs} = p\lambda_{qs} + \omega\lambda_{ds} + r_s i_{qs}$ $v_{ds} = p\lambda_{ds} - \omega\lambda_{qs} + r_s i_{ds}$ $v_{0s} = p\lambda_{0s} + r_s i_{0s}$
Ecuaciones de voltaje en el rotor	$v'_{qr} = p\lambda'_{qr} + (\omega - \omega_r)\lambda'_{dr} + r'_r i'_{qr}$ $v'_{dr} = p\lambda'_{dr} - (\omega - \omega_r)\lambda'_{qr} + r'_r i'_{dr}$ $v'_{0r} = p\lambda'_{0r} + r'_r i'_{0r}$
Enlaces de flujo	$\begin{pmatrix} \lambda_{qs} \\ \lambda_{ds} \\ \lambda_{0s} \\ \lambda'_{qr} \\ \lambda'_{dr} \\ \lambda'_{0r} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L'_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L'_{lr} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \\ i_{0s} \\ i'_{qr} \\ i'_{dr} \\ i'_{0r} \end{pmatrix}$
Ecuación de par	$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda'_{qr} i'_{dr} - \lambda'_{dr} i'_{qr}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{ds} i_{qs} - \lambda_{qs} i_{ds}) = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i'_{dr} i_{qs} - i'_{qr} i_{ds})$

2.5. Simulación en Matlab

La Figura 2.4 muestra el circuito desarrollado en Simulink/Matlab para la operación de la máquina de inducción jaula de ardilla operando como motor. El modelo que se utiliza es en el marco de referencia $dq0$.

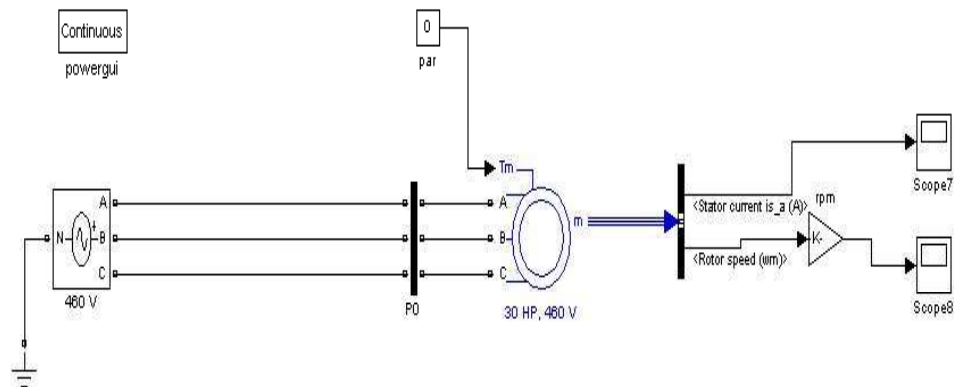


Figura 2.4. Diagrama en Simulink/Matlab para la simulación de la máquina de inducción como motor.

En la Tabla 2.1 se muestran los parámetros de la simulación del motor de inducción.

Tabla 2.2. Parámetros de la máquina de inducción.

PARAMETROS	
Potencia nominal (VA)	37300
Voltaje (línea a línea)	460
Frecuencia (Hz)	60
Resistencia en el estator (ohm)	0.087
Inductancia en el estator (H)	0.0302/377
Resistencia en el rotor (ohm)	0.228
Inductancia en el rotor (H)	0.0302/377
Inductancia de magnetización (H)	13.08/377
Coefficiente de fricción (N.m.s)	0
Numero de polos	4
Par de carga (N.m)	0 y 50
Inercia (J(Kg.m ²))	1.662

La Figura 2.5 muestra la velocidad de la máquina de inducción operando como motor y en vacío. Se puede observar que la máquina alcanza una velocidad de 1800 rpm en aproximadamente 0.4seg.

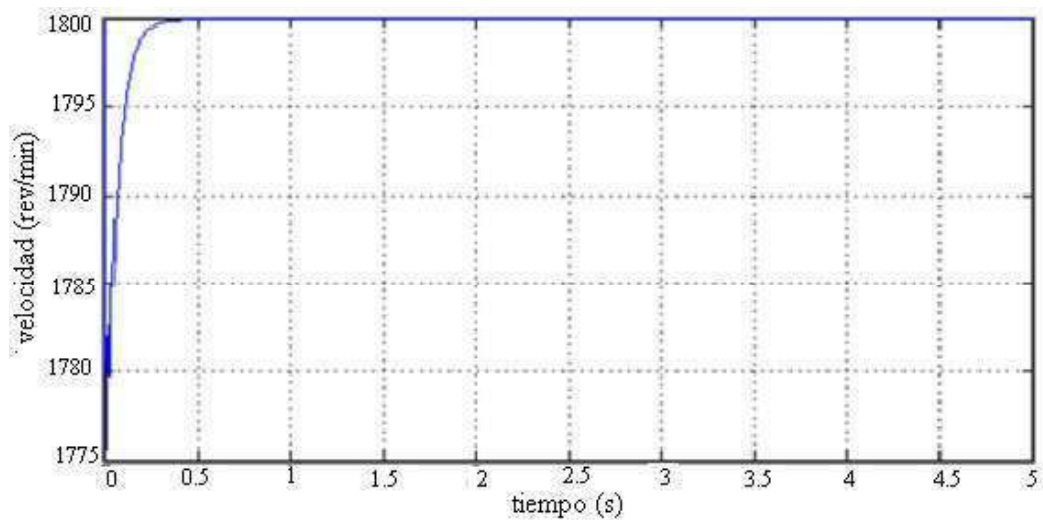


Figura 2.5. Velocidad del motor de inducción.

Si el rotor del motor de inducción gira a velocidad síncrona, entonces las barras del rotor estarán estacionarias en relación con el campo magnético y no habrá ningún voltaje inducido. Si el voltaje inducido es igual a cero, entonces no existe corriente en el rotor y no se producen un campo magnético. Debido a que no se produce un campo magnético en el rotor, el par inducido es cero después de un transitorio de arranque de aproximadamente 0.3seg., como se muestra en la Figura 2.6.

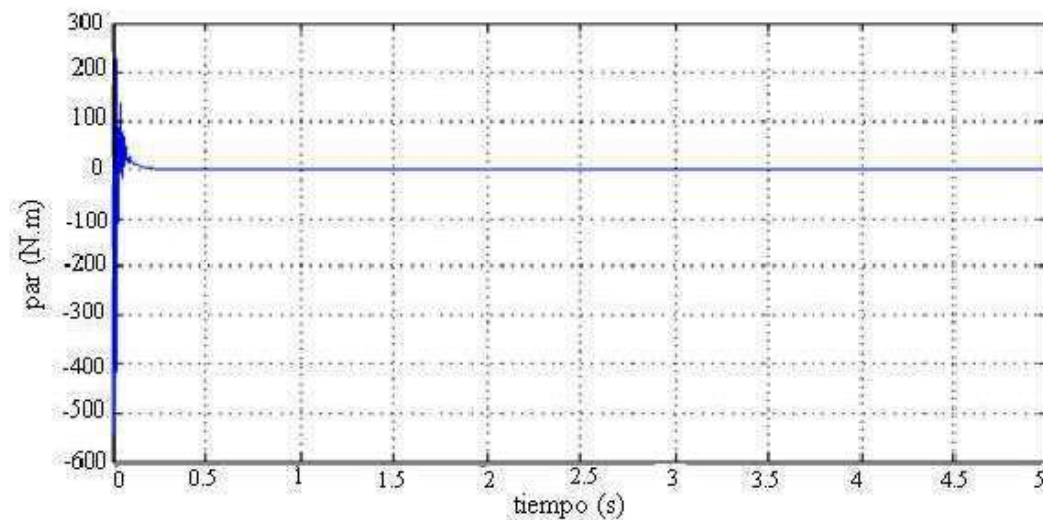


Figura 2.6. Par inducido en el motor de inducción.

Se tienen transitorios por las variaciones de las corrientes que se da al arranque, conforme se aumenta la carga a 50N.m del motor de inducción el deslizamiento aumenta y se reduce la velocidad como se ve en la Figura 2.7 a comparación con el motor de inducción que se analiza en vacío (ver Figura 2.5). Como se presenta un deslizamiento se tiene un par inducido resultante (ver Figura 2.8). La potencia que entrega la fuente para alimentar el motor, durante la aplicación de un par de carga, se muestra en la Figura 2.9.

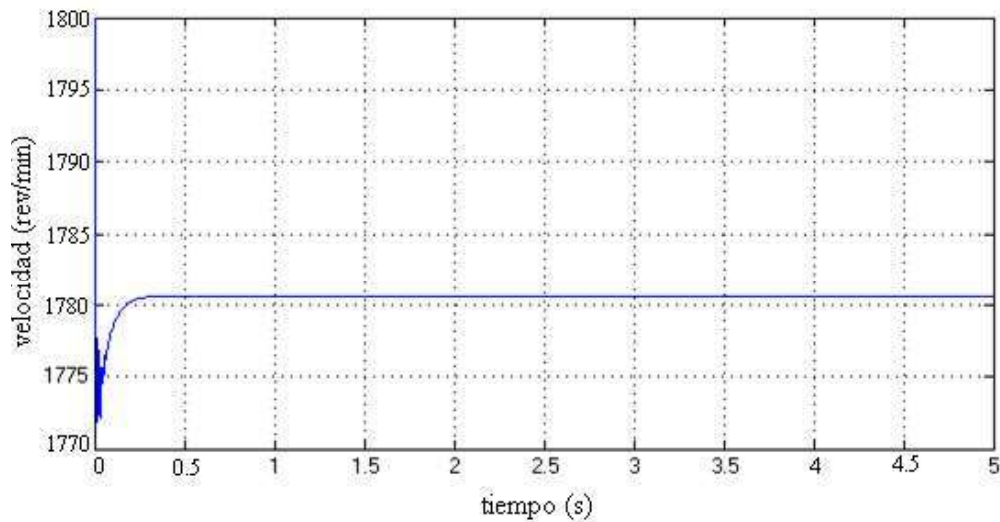


Figura 2.7. Velocidad del motor con un par de carga de 50N.m.

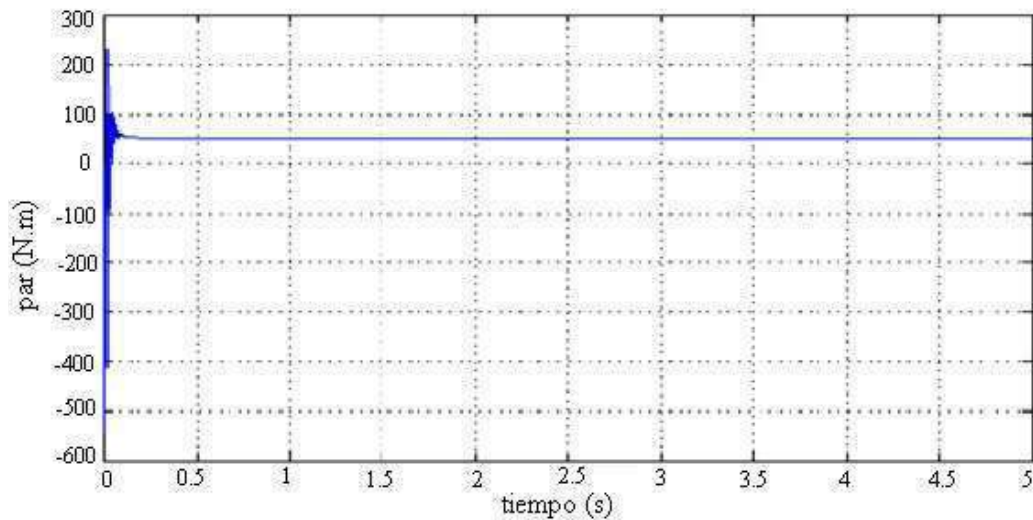


Figura 2.8. Par inducido al aplicar una carga de 50N.m.

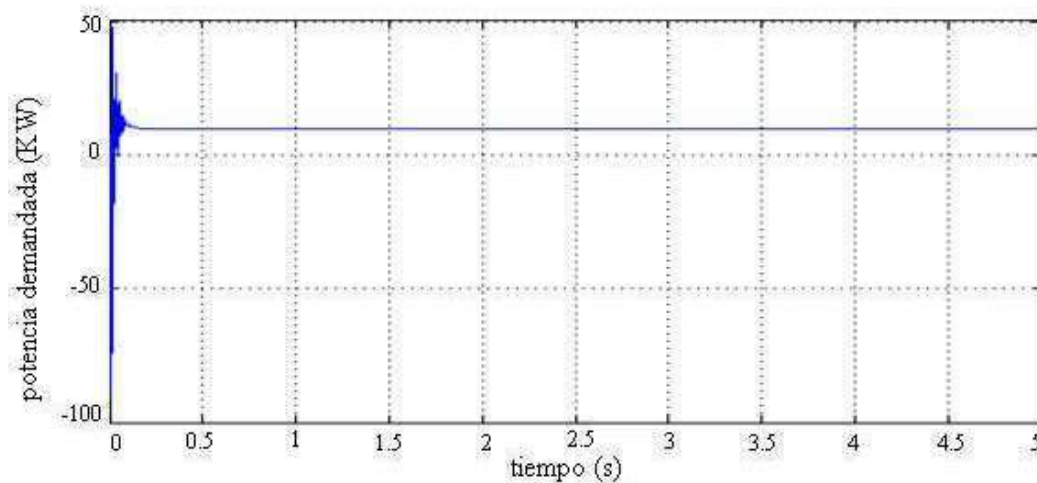
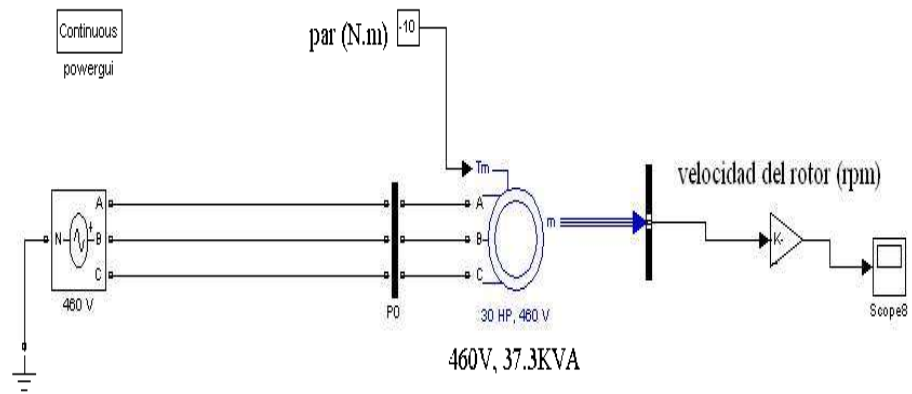


Figura 2.9. Potencia demandada por el motor de inducción.

La máquina de inducción operando como generador requiere de una fuente externa de potencia reactiva en todo momento para mantener el campo magnético de su estator. Esta fuente externa de potencia reactiva también debe controlar el voltaje en terminales del generador. Si no hay corriente de campo, un generador no puede controlar su propio voltaje de salida. Normalmente, el sistema de potencia externo al que está conectado mantiene el voltaje del generador [Chapman 2005].

Una máquina de inducción también puede funcionar como un generador aislado, independiente de cualquier sistema de potencia, siempre y cuando existe una fuente de reactivos disponible para suministrar la potencia reactiva requerida por el generador [Chapman 2005]. En la Figura 2.10 muestra la conexión de un generador de inducción a una fuente de 460V y un par de carga de -10N.m. La Figura 2.11 muestra el comportamiento de la velocidad del generador de inducción, en donde se puede apreciar que presenta una velocidad mayor que la velocidad síncrona. La potencia generada por la máquina de inducción se muestra en la Figura 2.12, siendo la potencia de generación de aproximadamente 1.75KW.



Figura

2.10. La máquina de inducción como generador.

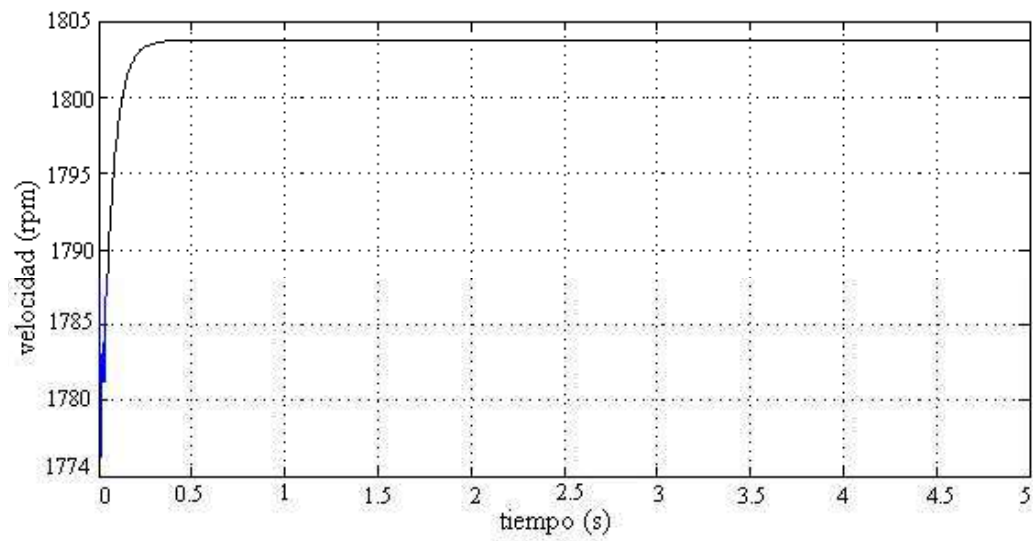


Figura 2.11. Velocidad del generador asincrono.

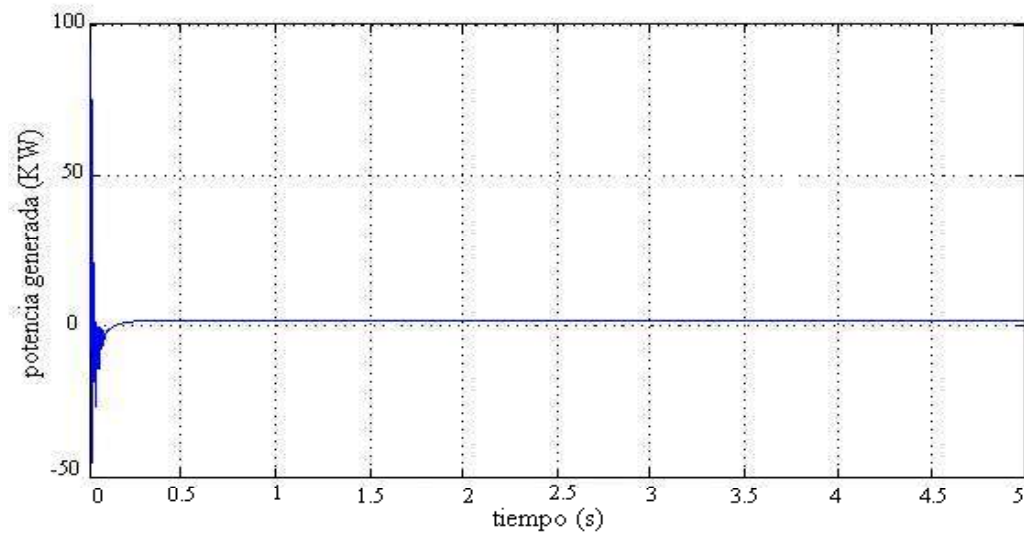


Figura 2.12. Potencia generada por el generador de inducción.

Haciendo un acercamiento al estado estable se observa claramente que la potencia de generación es de 1.75KW, como se aprecia en la Figura 2.13.

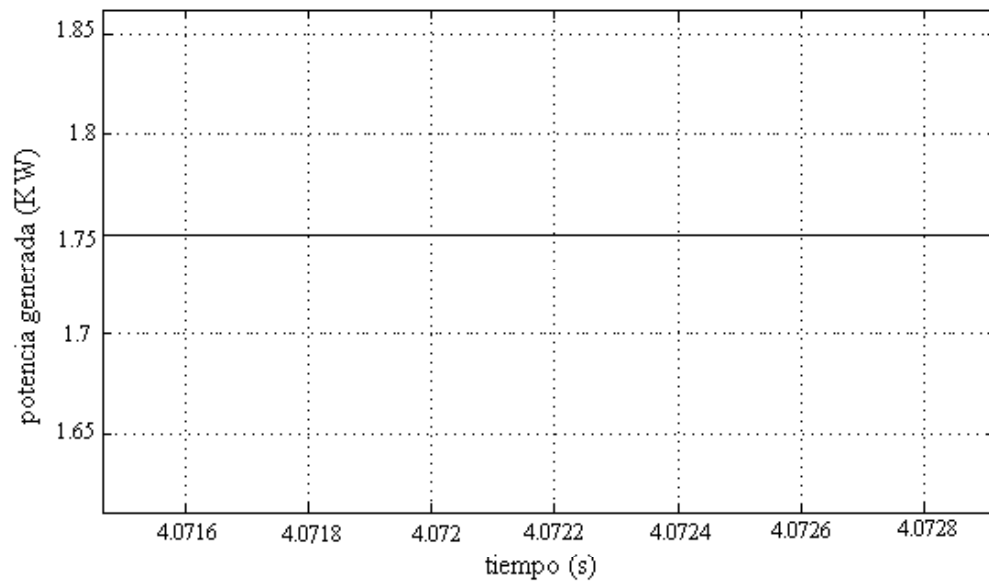


Figura 2.13. Potencia generada en estado estable.

La potencia reactiva demandada por el generador de inducción se muestra en la Figura 2.14. Esta potencia reactiva tiene un valor en estado estable de 15KVAR; la provee la fuente trifásica (ver Figura 2.15).

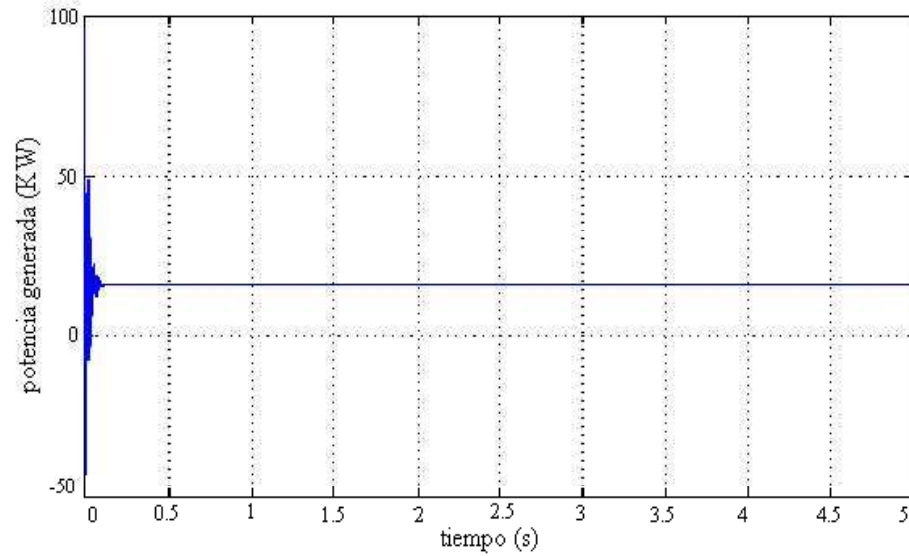


Figura 2.14. Potencia reactiva demandada por el generador de inducción.

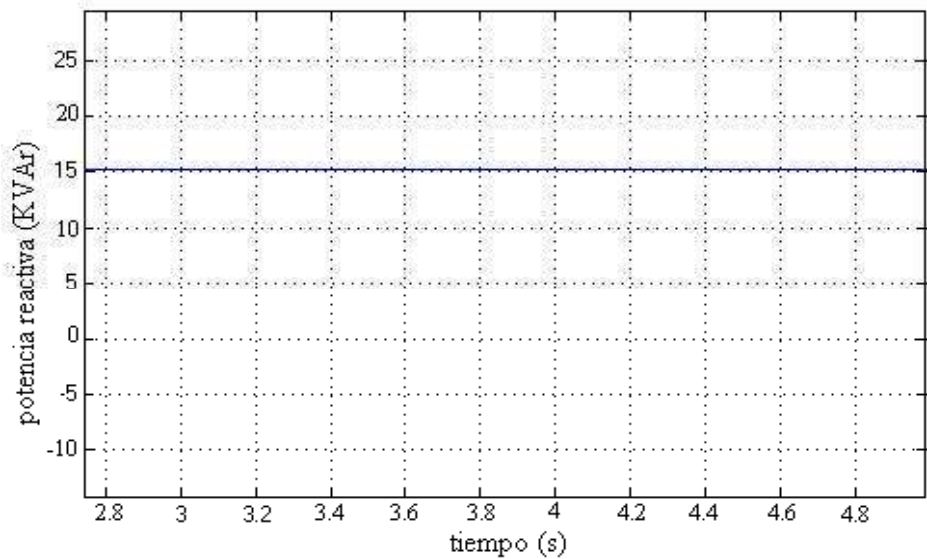


Figura 2.15. Potencia reactiva demandada por el generador de inducción en estado estable.

2.6. Conclusiones

Se presento el modelo matemático de la máquina de inducción para su simulación en Simulink/Matlab y los parámetros de la máquina de inducción.

Los resultados obtenidos se dan respecto al análisis de la simulación, como en el primer caso en donde se hizo la simulación de la máquina de inducción en vacío lo cual alcanzo una velocidad igual a la de sincronismo por eso no se tiene un par inducido.

En el segundo análisis se tuvo un par de carga de 50N.m donde la velocidad de la máquina de inducción es de 1781rpm debido a que se tiene un deslizamiento y por lo tanto un par inducido. Los resultados obtenidos cuando la máquina de inducción opera como generador se tiene que la velocidad es mayor a la velocidad síncrona esto ocasionan que el par se invierta y empiece a generar como se ve en la Figura 2.13, como el sistema es aislado y la máquina de inducción cuando se comporta como generador necesita de potencia reactiva para su buen funcionamiento, lo cual se tiene un banco de capacitores para proveer la potencia reactiva necesaria para el sistema.

Capítulo 3

Operación del generador eólico

En este capítulo se presenta la operación de un generador eólico en una red aislada. Se reportan los resultados de la simulación en Simulink/Matlab considerando condiciones de viento constantes y variables.

3.1. Generación eólica

La generación eólica utiliza diversos desarrollos tecnológicos para transformar la energía del viento en energía eléctrica. Este tipo de sistemas alcanzan índices de fiabilidad cercanos al 97% [Counan 1986]. Sin embargo la desventaja que presentan es la dificultad de predecir la potencia generada, debido a que el viento es una fuente de energía variable. Otro problema es el conocido como fenómeno de parpadeo debido al paso de las palas delante de la torre donde se apoya el generador produciendo pequeñas y repetidas variaciones de voltaje [Ackermann 2005].

3.1.1. Turbina Eólica

El modelo de una turbina eólica comprende tres partes principales [Counan 1986]:

- El viento como fuente de energía, en donde las diferentes componentes de la velocidad del viento deben ser representadas adecuadamente.
- Las características aerodinámicas de las palas, que se traducen en una curva de potencia dependiente de la velocidad del viento.
- El sistema mecánico formado por el conjunto palas, buje, multiplicador y acoplamiento al eje del generador. Se caracteriza por la inercia elevada de la turbina y la baja rigidez del acoplamiento al generador, especialmente en las máquinas más grandes.

En la Figura 3.1 se muestra los elementos que integran la turbina eólica, en donde se observa el modelo del viento, la potencia que está en función de la velocidad del viento y el modelo mecánico.

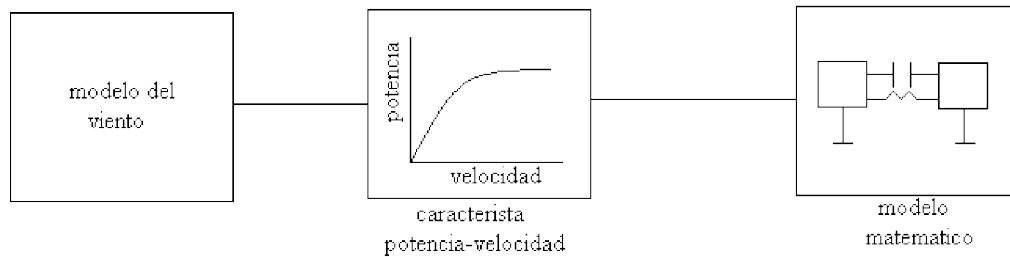


Figura 3.1. Componentes del modelo de turbinas eólicas.

3.1.2. El viento

La existencia del viento en el planeta es consecuencia de la acción del sol, ya que la radiación de esta estrella, en combinación con otros factores activa la circulación de las masas de aire. Los factores que influyen en el movimiento de las masas de aire son la inclinación y el desplazamiento de la tierra en el espacio o la distribución de los continentes y los océanos. A gran escala, existe una serie de corrientes de vientos dominantes que circulan por todo el planeta, los cuales están influidas por la temperatura y la presión atmosférica. Por otro lado, cerca de la superficie terrestre, a nivel local, soplan otros vientos más específicos caracterizados por el relieve del terreno y otras variables como la rugosidad o la altura.

El aumento de la velocidad del viento en función de la altura, puede evaluarse mediante la siguiente expresión [Álvarez 2006],

$$V(h) = V_0 * \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (3.1)$$

en donde,

$V(h)$ = velocidad del viento que se desea estimar a la altura h del suelo.

V_0 = velocidad del viento conocida a una altura h_0 .

h = altura a la que se requiere estimar la velocidad del viento.

h_0 = altura de referencia.

α = valor que depende de la rugosidad existente en el emplazamiento.

El valor que toma α depende de la rugosidad del terreno, como se aprecia en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Estimación del valor α para distintos terrenos.

Tipo de terreno	α
Liso (mar, arena, nieve)	0.10-0.13
Rugosidad moderada (hierba, cultivos)	0.13-0.20
Rugoso (bosques, edificaciones)	0.20-0.27
Muy rugoso (ciudades)	0.27-0.40

3.1.3. Modelo de las características aerodinámicas

La capacidad de una turbina eólica para extraer la energía del viento depende de tres factores: (i) la potencia eólica disponible, (ii) la curva de potencia de la máquina, y (iii) el desempeño de la máquina para responder a fluctuaciones de la velocidad del viento [Freris 1990]. La potencia mecánica obtenida por una turbina eólica es [Counan 1986],

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^3 \quad (3.2)$$

en donde:

- P_w es la potencia debido al viento (W),
- ρ es la densidad específica del aire (un valor típico es $1,225 \text{ Kg} / \text{m}^3$),
- A es el área barrida por las palas de la turbina (m^2),
- C_p es el coeficiente de eficiencia aerodinámica
- V_w es la velocidad del viento (m / s).

3.2. Configuraciones de generadores eólicos

La Figura 3.2 muestra una turbina eólica comercial que impulsa un generador de inducción jaula de ardilla por medio de una caja de velocidad. El estator del generador se conecta a la red de potencia de la compañía suministradora de energía a través de un transformador elevador. Como consecuencia, el flujo magnético en el estator gira a la velocidad síncrona de la frecuencia de la red y el rotor gira ligeramente más rápido. Por lo tanto, la turbina gira básicamente a velocidad constante y no es posible extraer la máxima cantidad de energía del viento. La potencia reactiva absorbida por el generador la provee el banco de capacitores.

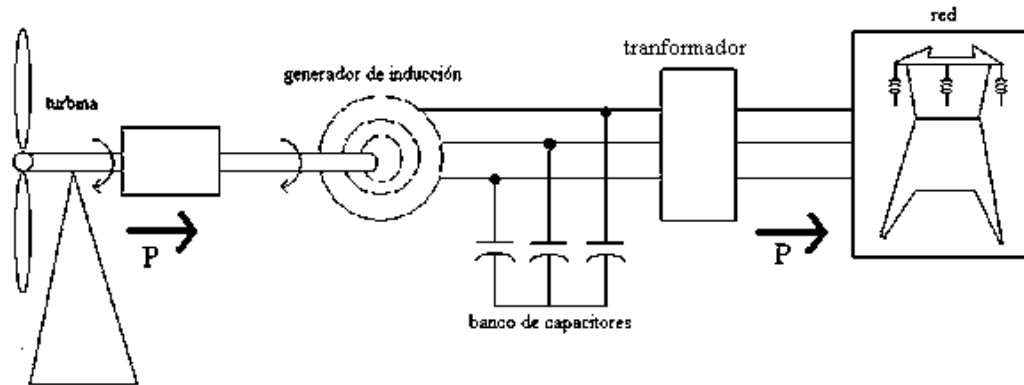


Figura 3.2. Turbina eólica impulsada por un generador asíncrono jaula de ardilla por medio de una caja de velocidad.

La Figura 3.3 muestra un esquema de generación en donde el estator del generador de inducción jaula de ardilla se conecta a un convertidor encargado de producir una frecuencia variable. Como consecuencia, la velocidad síncrona del generador se puede variar dependiendo de la velocidad del viento para extraer la máxima cantidad de energía. Mientras el convertidor 1 absorbe la potencia real generada por la turbina y provee la potencia reactiva demandada por el generador de inducción, el convertidor 2 se encarga de inyectar en el sistema la potencia almacenada en el capacitor de enlace en forma de un voltaje trifásico a una frecuencia de 60Hz.

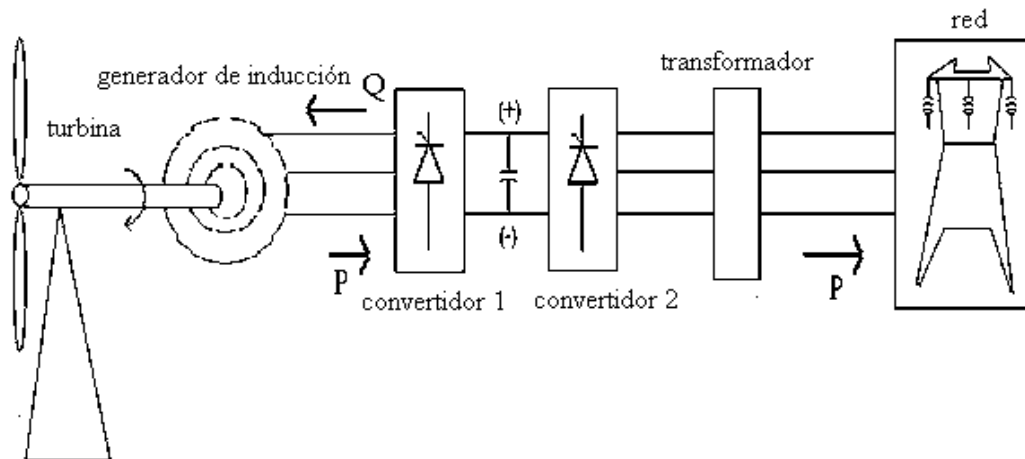


Figura 3.3. Turbina eólica impulsada por un generador asíncrono jaula de ardilla conectada a un convertidor de frecuencia variable.

La Figura 3.4 muestra una turbina de viento acoplada a un generador de inducción de rotor devanado a través de una caja de velocidades. El voltaje de la red de potencia se reduce con la ayuda de un transformador. El estator de la máquina síncrona se conecta directamente a la red de potencia a 60 ó 50Hz. El rotor se conecta al convertidor 1, en donde el voltaje y frecuencia en terminales de este convertidor se puede variar de tal forma que se puede controlar el flujo de potencia proveniente del generador de inducción. Por lo tanto, la potencia total inyectada en la red de potencia tiene una contribución asociada al estator y al rotor de la máquina síncrona.

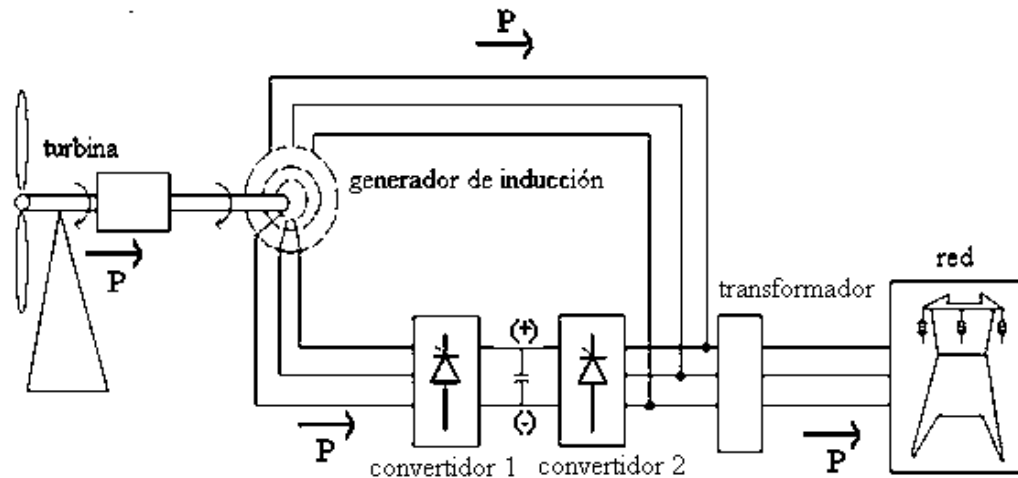


Figura 3.4. Turbina eólica acoplada a un generador asíncrono de rotor devanado doblemente alimentado.

La Figura 3.5 muestra una turbina eólica directamente conectada a un alternador de imanes permanentes. Los convertidores de electrónica de potencia y el transformador realizan las mismas funciones establecidas para el esquema de la Figura 3.3. Este esquema tiene la ventaja de no requerir una caja de velocidades y se recomienda en arreglos para niveles de generación de 2 a 5MW [Wildi 2006].

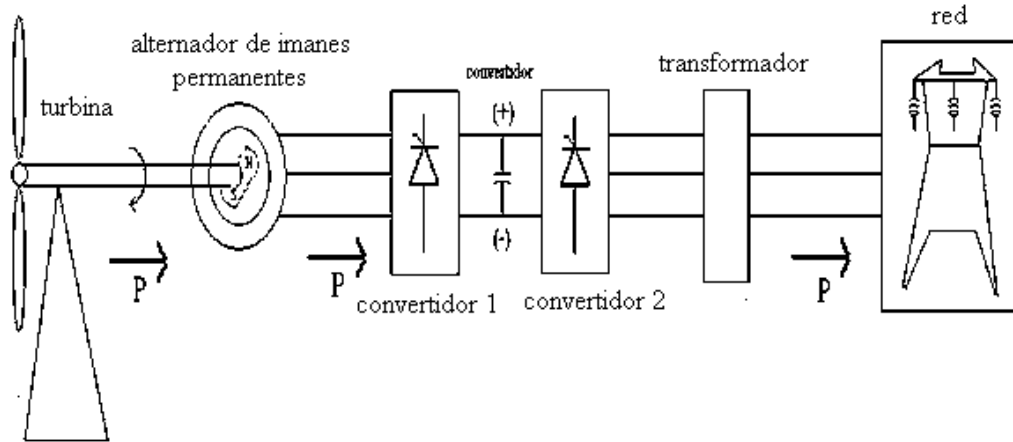


Figura 3.5. Turbina eólica directamente conectada a un alternador de imanes permanentes.

3.3. El aerogenerador aislado

En la Figura 3.6 se muestra el sistema de generación aislado implementado en este trabajo. La máquina síncrona trifásica es esencialmente utilizada como un condensador síncrono ya que no abastece energía eléctrica al sistema pero proporciona potencia reactiva. Esta máquina está modelada en el marco de referencia dq y los parámetros usados se muestran en la Tabla 3.2. La potencia mecánica que se inyecta a la máquina síncrona en este caso $P_m = 0$ ya que se desea operar esta máquina como un condensador síncrono.

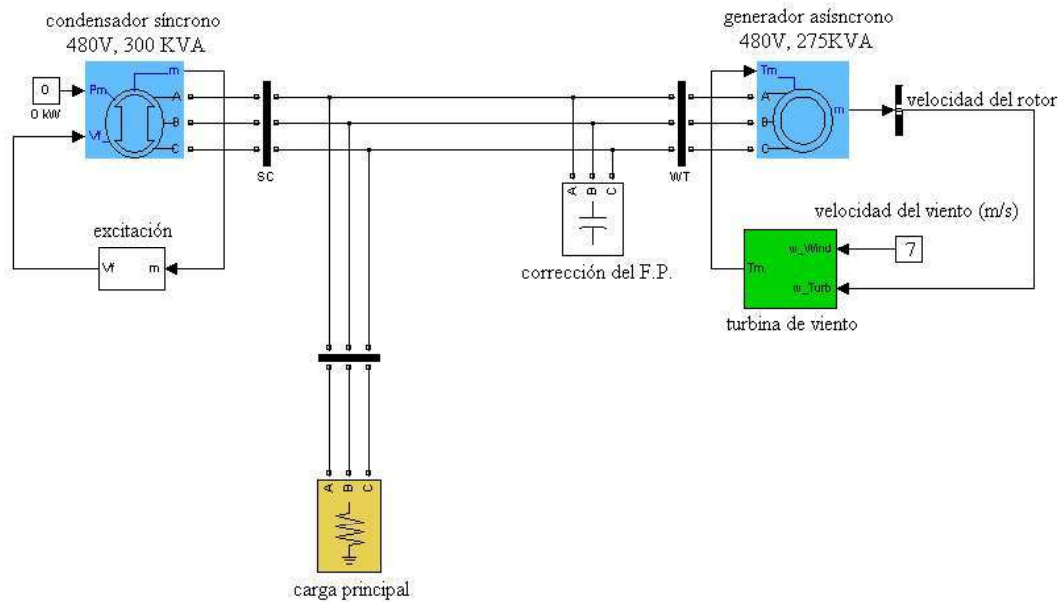


Figura 3.6. Sistema de generación aislado.

El bloque de excitación de la Figura 3.6 tiene una entrada de 22 señales que incluyen corrientes en el estator en las componentes abc , las corrientes del estator en $dq0$, las corrientes de las bobinas $dq0$, los flujos en la máquina, voltajes en el estator en $dq0$, desviación del ángulo del rotor, el ángulo mecánico del rotor, la velocidad del rotor, la potencia eléctrica, la desviación de la velocidad del rotor, el par electromagnético, potencia activa y potencia reactiva. Lo cual por medio de un bloque de Simulink se selecciona los voltajes del estator en la referencia arbitraria $dq0$.

El bloque de excitación tiene una salida que representa el voltaje de campo V_{fd} en pu, que aplicado a Simulink representa la entrada del bloque de la máquina síncrona V_f . El sistema de excitación proporciona regulación en las terminales del voltaje de la máquina síncrona.

El objetivo fundamental del bloque de excitación es realizar el ajuste automático de la corriente de campo en la máquina síncrona de modo que se mantenga el voltaje de salida a un valor constante. También es capaz de controlar las perturbaciones transitorias que se presentan en el sistema. El bloque de excitación describe en la Figura 3.7, en donde se observa que está integrado por cinco bloques básicos.

Excitador: este bloque proporciona la energía eléctrica de alimentación del campo rotatorio del condensador síncrono, constituyendo la fuente de poder del sistema de control de excitación.

Regulador: este bloque procesa y amplifica la señal de entrada a un nivel y forma apropiada para el control. Este incluye las regulaciones y funciones de estabilidad del sistema de control.

Terminal de voltaje transductor y compensador de carga: mide el voltaje en terminales del generador y, opcionalmente, estima la diferencia de voltaje en el nodo de inyección a la red.

Estabilizador de potencia del sistema: este bloque provee una señal de salida adicional hacia el regulador, la cual se usa para amortiguar las oscilaciones del sistema.

Limitadores y circuitos de protección: esta unidad incluye funciones de protección para garantizar que los límites de capacidad del excitador y el generador no se excedan. Algunas de las funciones más usadas son los limitadores de corriente de campo, límite máximo de excitación, limitador de voltaje, regulación y protección de V/Hz y limitador de bajo voltaje [Vargas 2008].

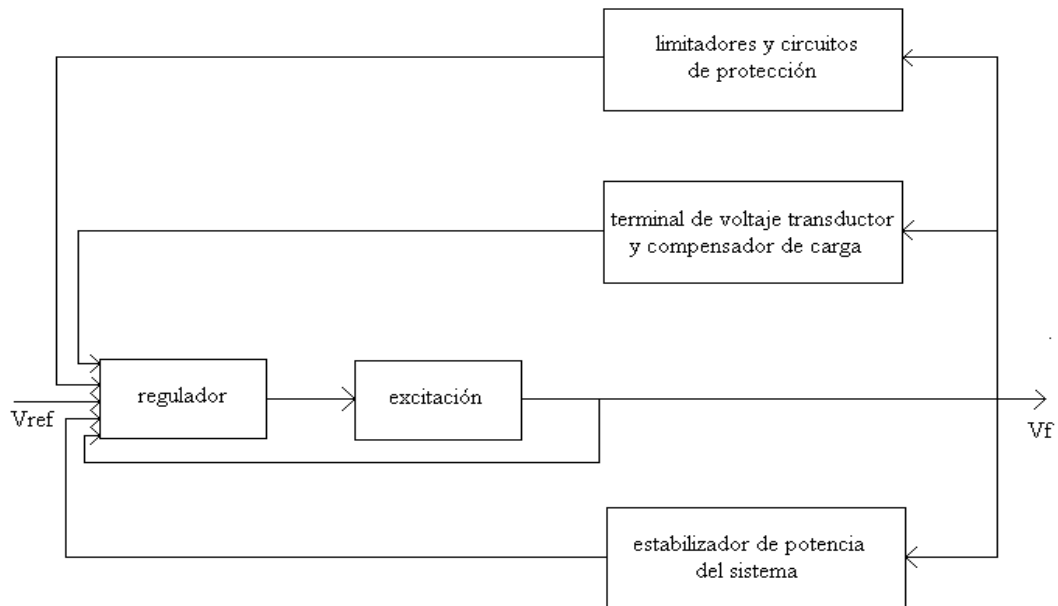


Figura 3.7. Sistema de excitación.

Tabla 3.2. Parámetros de la máquina síncrona [Mathwork 2008].

PARAMETROS	VALORES
Potencia nominal (VA)	300000
Voltaje (línea a línea)	480
Frecuencia (Hz)	60
Reactancias (pu)	$X_d = 3.23$ $X_d' = 0.21$ $X_d'' = 0.15$ $X_q = 2.79$ $X_q'' = 0.37$ $X_l = 0.09$
Constantes de tiempo (s)	$T_{d_0}' = 1.7$ $T_{d_0}'' = 0.008$ $T_{q_0}'' = 0.004$
Resistencia en el estator (pu)	0.017
Coefficiente de inercia (H)	1
Factor de fricción (F)	0
Pares polos	2

El banco de capacitores mostrada en la Figura 3.6 proporciona compensación de potencia reactiva a la máquina de inducción. Este banco tiene una capacidad de 50KVAR.

En la Figura 3.8 se muestra el generador asíncrono acoplado a la turbina de viento. El generador de inducción esta modelado en el marco de referencia dq y los parámetros utilizados se indican en la Tabla 3.3. La turbina de viento recibe datos de entradas tales como la velocidad del viento w_Wind y la velocidad del rotor w_Turb . Debido a que la velocidad de la máquina está dada en unidad se multiplica por una ganancia de 1800rpm. El bloque de la turbina de viento utiliza el método de interpolación lineal que consiste en determinar los valores entre los valores conocidos, y la extrapolación determina los valores

de la potencia fuera del rango de valores conocidos. La característica de la turbina de viento utilizada en este trabajo se muestra en la Figura 3.9 [Sharaf y Abo-Al-Ez, 2006].

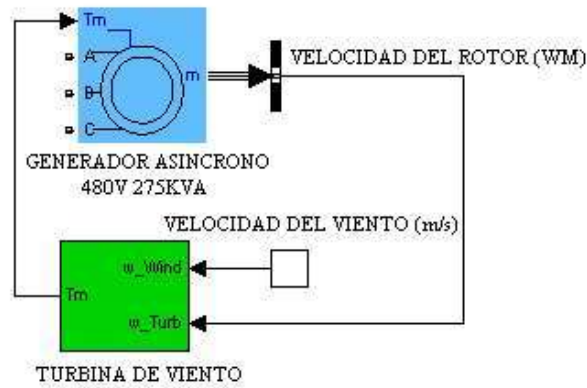


Figura 3.8. Generador de potencia.

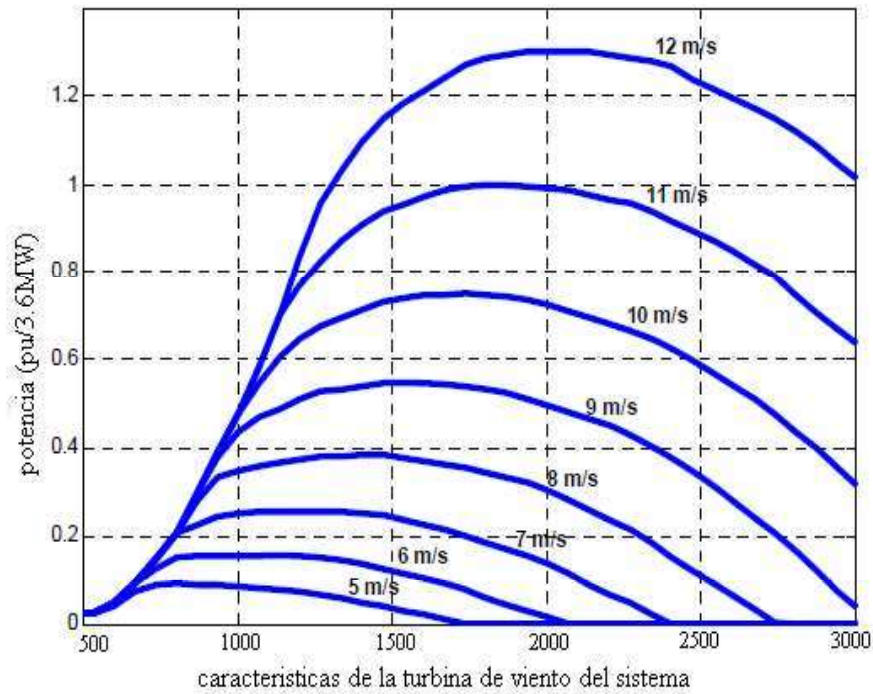


Figura 3.9. Características de la turbina de viento.

Tabla 3.3. Parámetros del generador asíncrono [Mathwork 2008].

PARAMETROS	
Potencia nominal (VA)	275000
Voltaje (línea a línea)	480
Frecuencia (Hz)	60
Resistencia en el estator (ohm)	0.016
Inductancia en el estator (H)	0.06
Resistencia en el rotor (ohm)	0.015
Inductancia en el rotor (H)	0.06
Inductancia de magnetización (H)	3.5
Fricción (N.m.s)	0
Pares de polos	2
Par (N.m)	-0.7373 lo proporciona la turbina
Inercia (J(Kg.m ²))	2

3.4. Caso de estudio

En esta sección se presentan los casos de estudio asociados al generador eólico conectado a una red aislada, en donde la velocidad del viento se simula con valores fijos y variables.

3.4.1. Velocidad fija

En este caso de estudio se presenta la simulación del sistema suponiendo una velocidad fija para el viento de 7 m/s. La Figura 3.10 muestra la velocidad a la que gira el generador asíncrono la cual se puede observar que es mayor de 1 pu e indica la operación de la máquina eléctrica en el modo generador, como se puede ver la velocidad se estabiliza en un valor de 1.0038pu. En la Figura 3.11 se reporta la potencia real generada por el aerogenerador, lo cual es de 50KW.

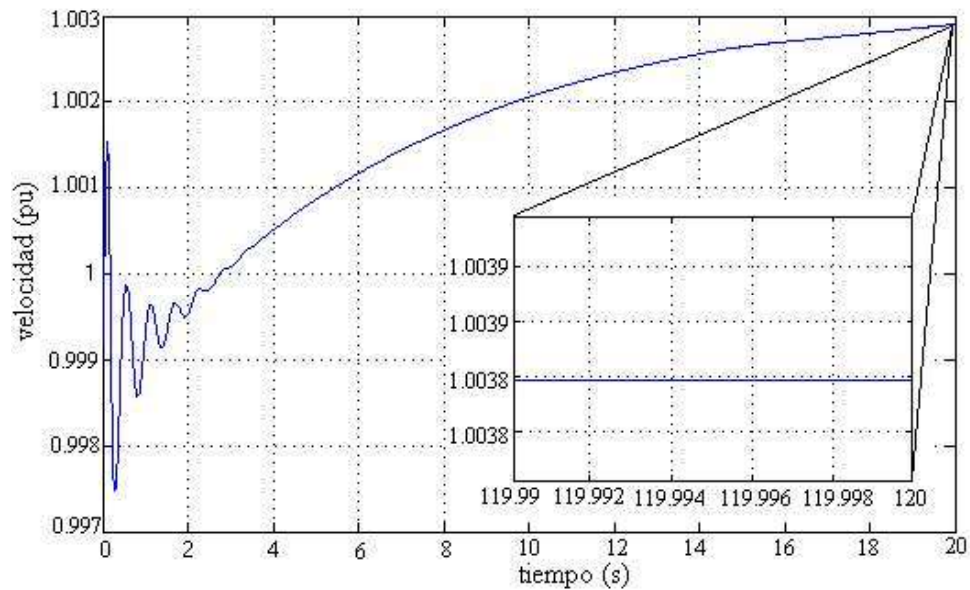


Figura 3.10. Velocidad del generador asíncrono.

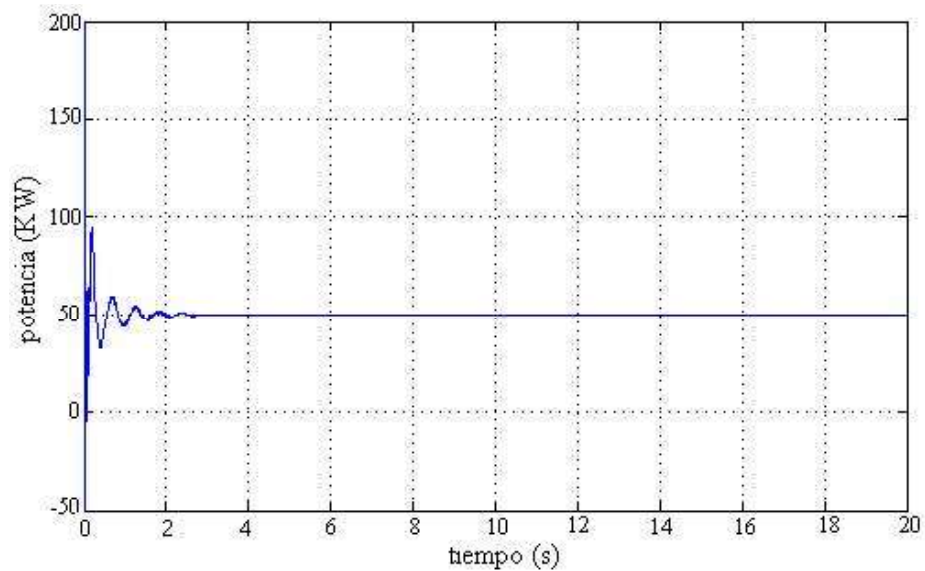
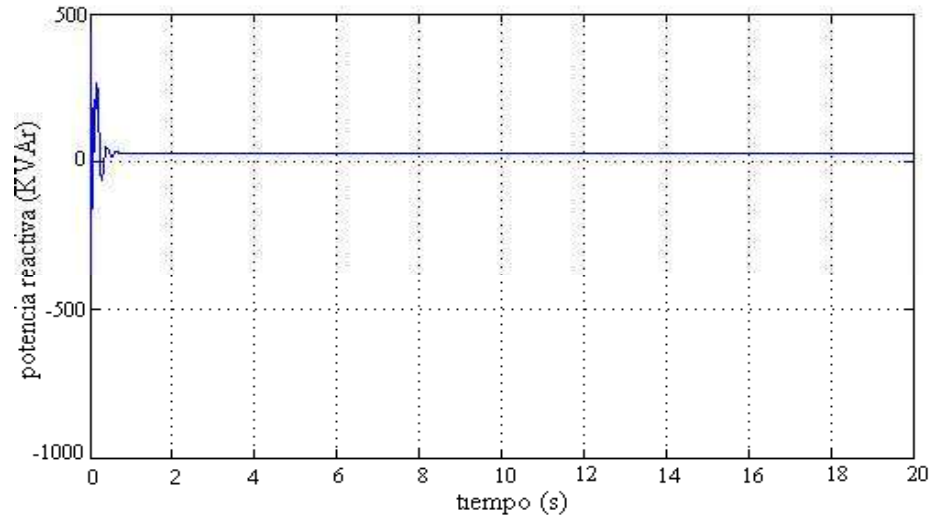


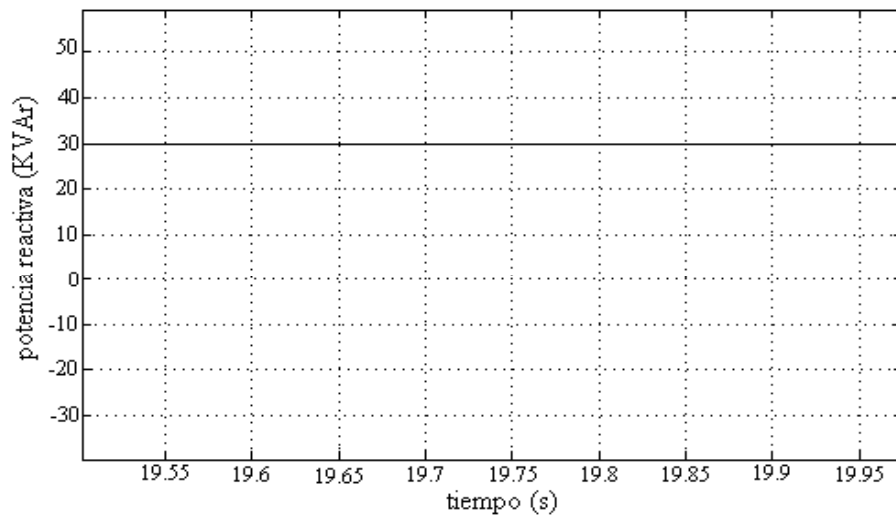
Figura 3.11. Potencia real generada por el sistema.

En este caso de estudio el motor síncrono está sobreexcitado, y suministra potencia reactiva al sistema. El banco de capacitores contribuye a la corrección de factor de potencia en conjunto con el condensador síncrono. En la Figura 3.12(a) se muestra la potencia reactiva que aporta el condensador síncrono y en la Figura 3.12(b) se muestra un

acercamiento al valor de estado estable de 30KVAR. En la Figura 3.13(a), se muestra la aportación por parte del banco de capacitores de 50KVAR y la figura 3.13(b) muestra un acercamiento al valor de estado estable.

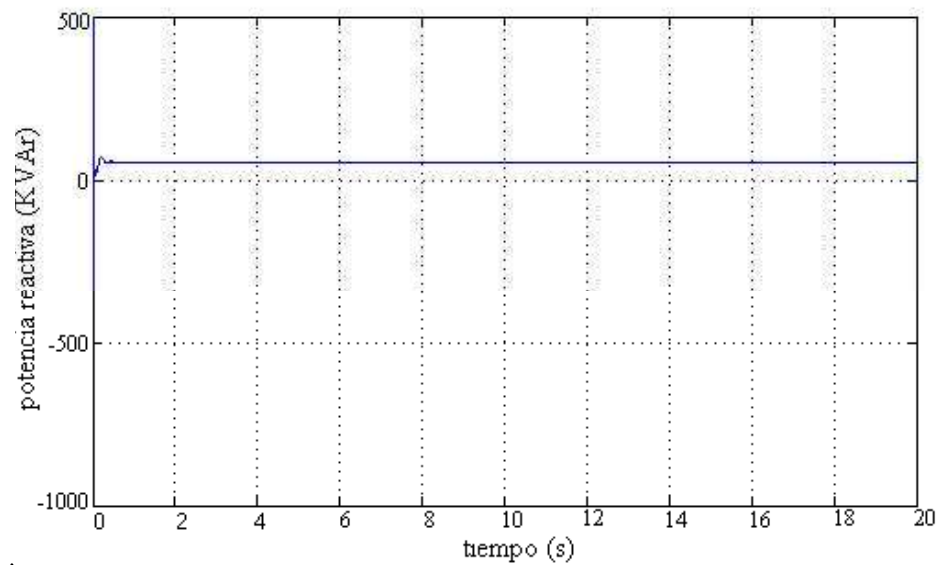


(a)

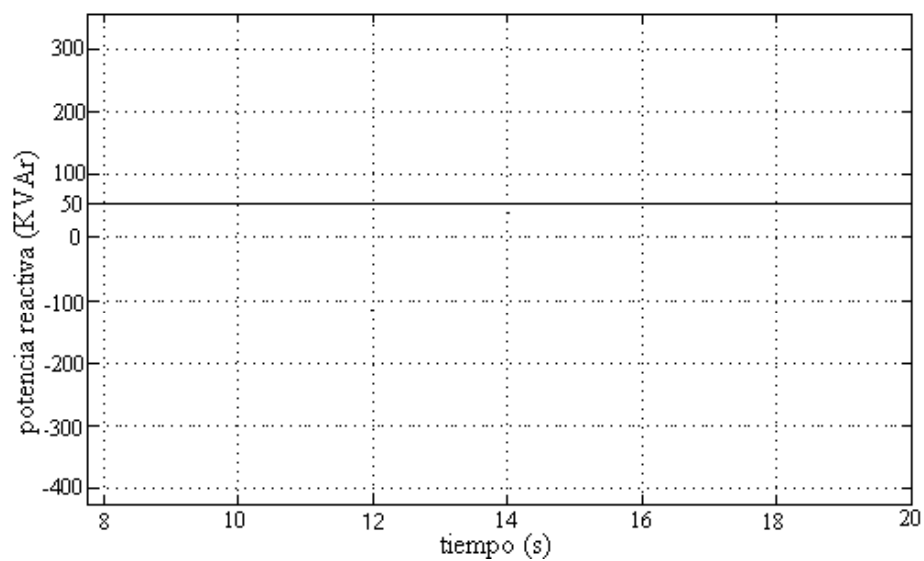


(b)

Figura 3.12. Simulación de (a) potencia reactiva generada por el condensador síncrono y (b) acercamiento al valor estable de la potencia reactiva.



(a)

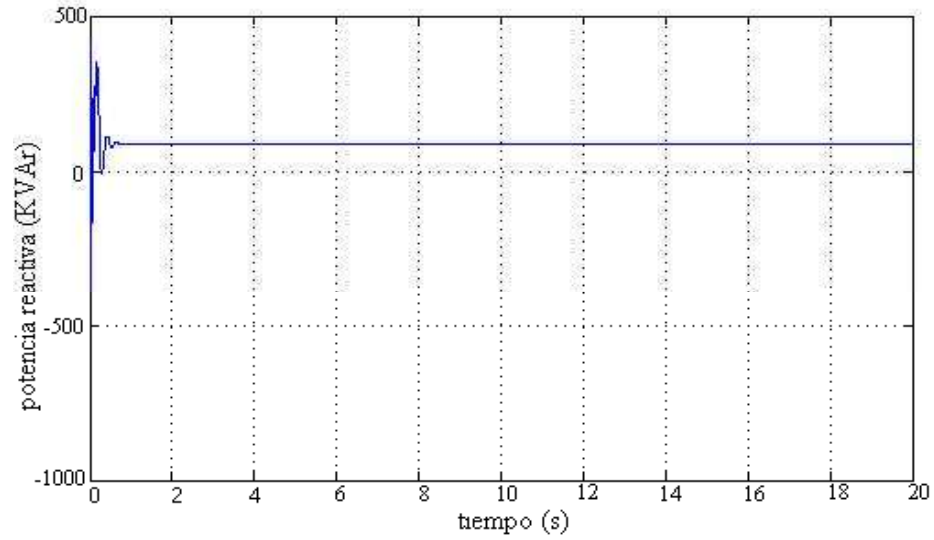


(b)

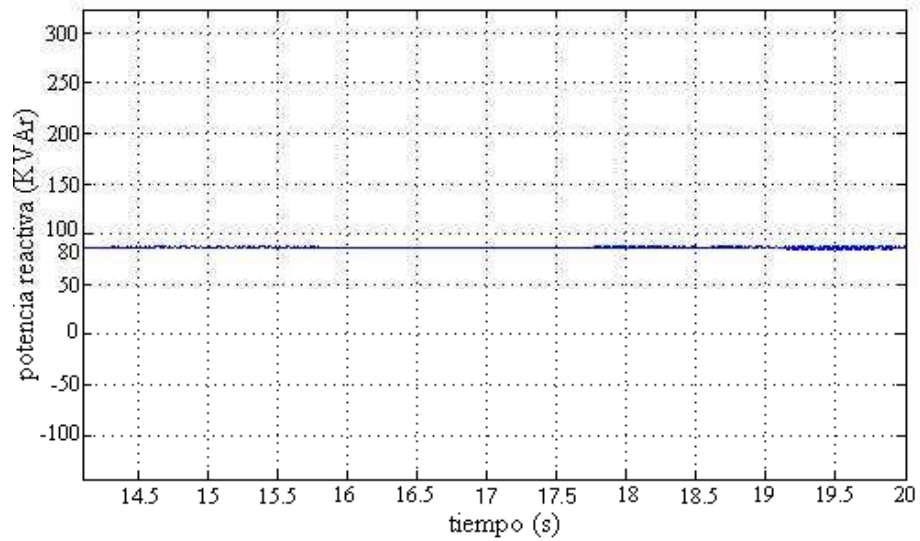
Figura 3.13. Simulación de (a) Potencia reactiva generada por el banco de capacitores y (b) acercamiento al valor de estado estable.

La potencia reactiva demandada por el generador de inducción es de 80KVAR, (ver Figura 3.14). Se puede apreciar que el banco de capacitores se encarga de aportar el 62.5%

(ver Figura 3.13b y Figura 3.14b) de la potencia reactiva demandada mientras que el condensador síncrono aporta el 37.5% (ver Figura 3.12b y Figura 3.14b).



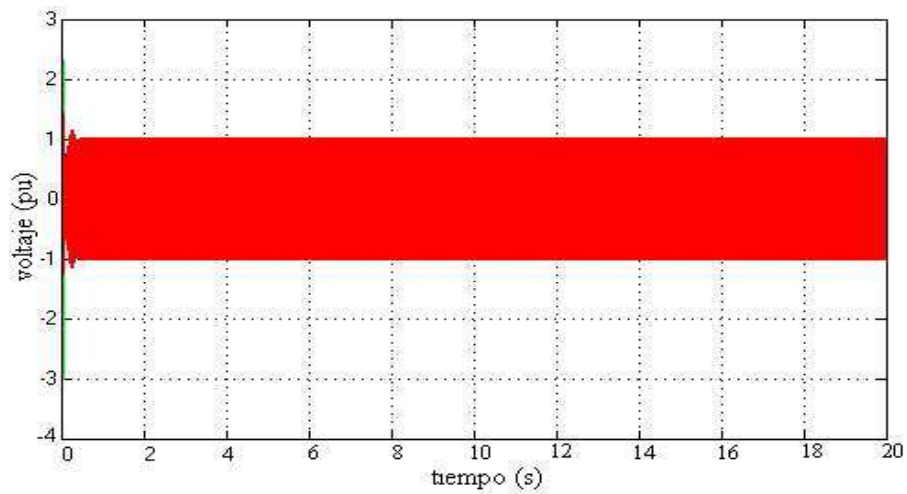
(a)



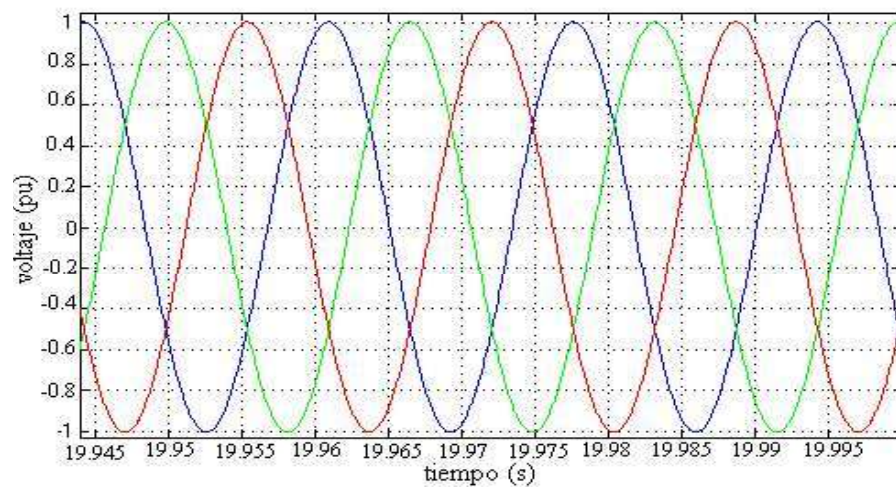
(b)

Figura 3.14. Simulación de (a) la potencia reactiva consumida por el generador de inducción y (b) el valor de dicha potencia en estado estable.

El voltaje del sistema se mantiene en un valor constante en 1 pu, como se muestra en la Figura 3.15(a) y haciendo un acercamiento a su valor estable se muestra en la Figura 3.15(b). Por otra parte en la Figura 3.16 se puede observar que la frecuencia del sistema presenta pequeñas variaciones alrededor de 60Hz. Estas pequeñas variaciones entorno al valor de 60Hz se deben al hecho de que la potencia generada (ver Figura 3.11) es igual a la potencia de la carga principal.



(a)



(b)

Figura 3.15. (a) Voltaje del sistema y (b) acercamiento a su valor estable.

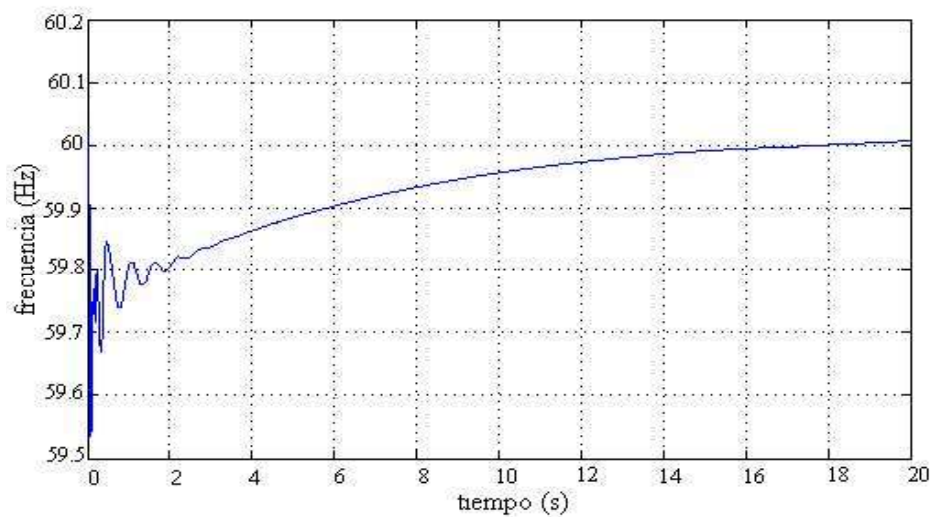


Figura 3.16. Frecuencia del sistema.

3.4.2. Velocidad variable

En esta sección se simula el sistema de generación aislado cuando se tiene una variación de la velocidad del viento. En la Tabla 3.4 se muestran los datos del viento utilizados en esta simulación. Los cuales corresponden a las mediciones realizadas en la comunidad de Juchitán del Estado de Oaxaca.

Tabla 3.4. Datos generales del recurso eólico en una localidad del Estado de Oaxaca.

ESTADO	OAXACA
REGIÓN	JUCHITAN
ZONA	LA VENTA
ESTACIÓN	LV01
MES	ABRIL
DÍA DE INICIO	1
DÍA DE TERMINACIÓN	30
AÑO	2006
ALTURA SNMM	70 m
ALTURA DE MEDICIÓN	15 m
ALTURA DE MEDICIÓN	32 m
DENSIDAD DEL AIRE	$1.225 \text{ kg} / \text{m}^3$

La Figura 3.17 muestra el sistema de generación aislado simulado con los datos de la velocidad del viento medidos en el mes de abril del 2006 en la Venta Oaxaca. Los datos corresponden a una altura de 15 metros, en un periodo de 24 horas y periodo de muestreo de 10 minutos. En la Figura 3.18 se muestra los datos de medición del recurso eólico usados en esta simulación.

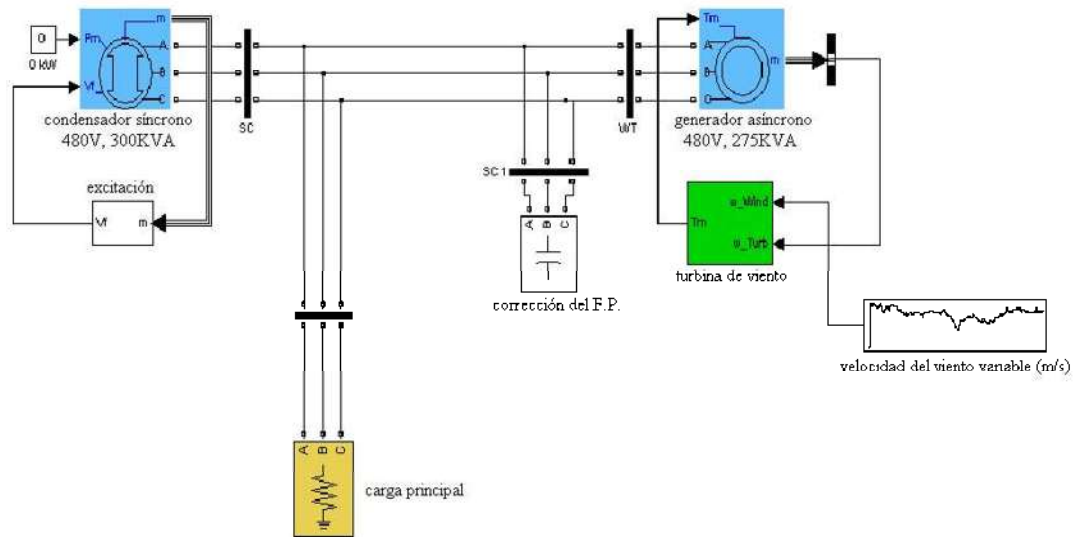


Figura 3.17. Aplicando una velocidad variable al sistema.

Se puede apreciar en la Figura 3.19 que la velocidad del generador eólico varía por las variaciones de la velocidad del viento que oscilan entre 6 y 16 m/s. La Figura 3.20 muestra las variaciones de la potencia generada por el sistema usando los datos de la velocidad del viento que se muestra en la Figura 3.18. La potencia reactiva que aporta el condensador síncrono se muestra en la Figura 3.21(a) la cual presenta variaciones por causa de la velocidad del viento variable, mientras que la Figura 3.21(b) se muestra un acercamiento a la potencia generada por el condensador síncrono de 80KVAr.

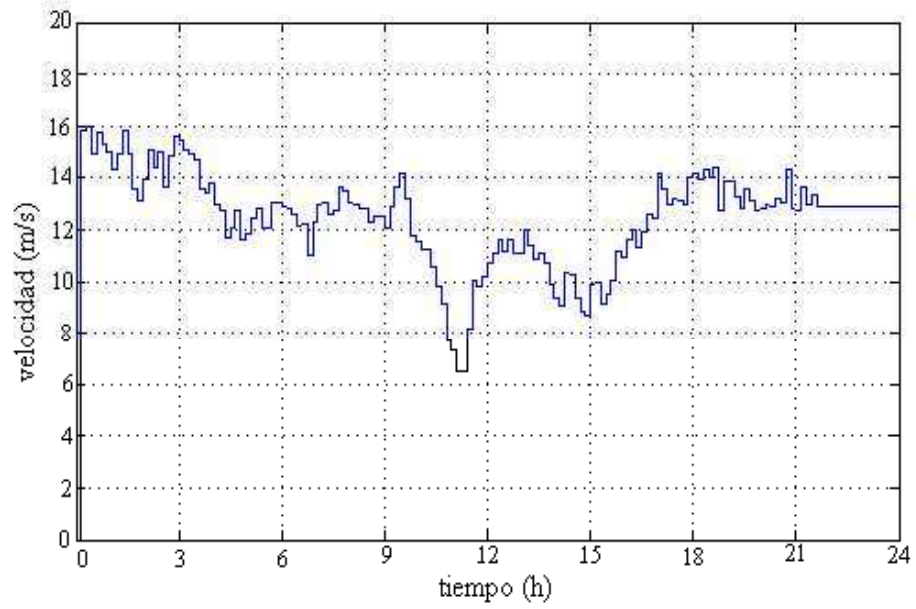


Figura 3.18. Datos del viento medidos en un periodo de 24 horas.

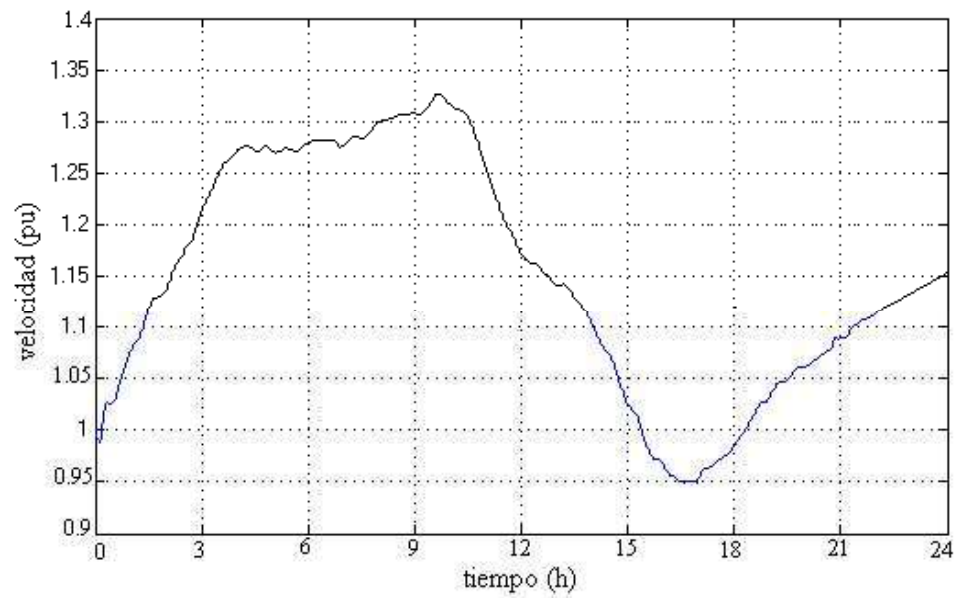


Tabla 3.19. Velocidad del generador asíncrono.

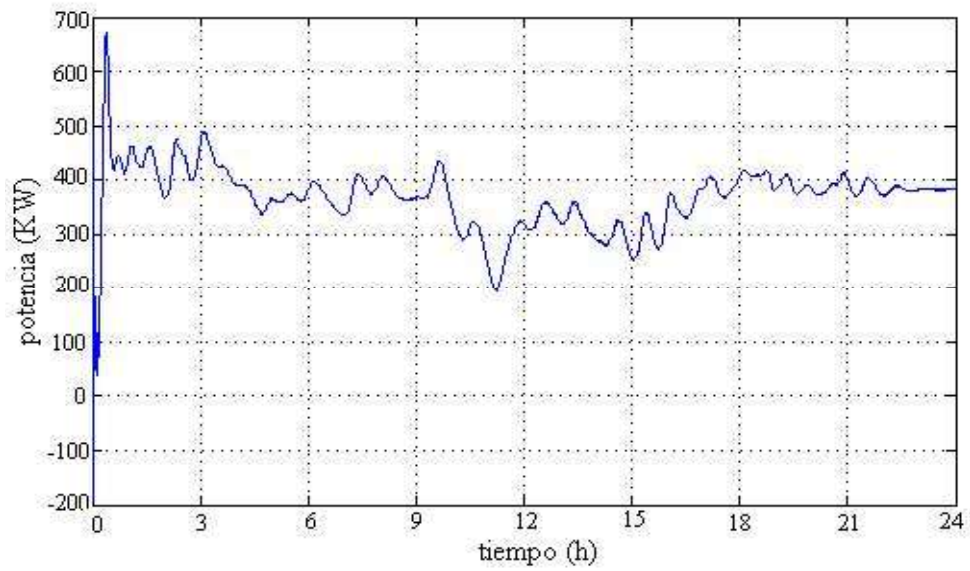
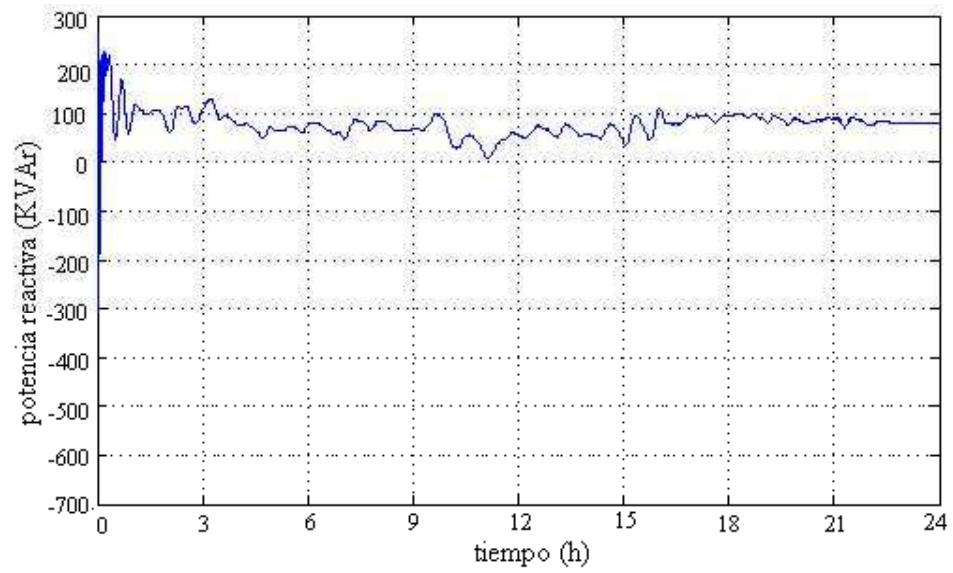
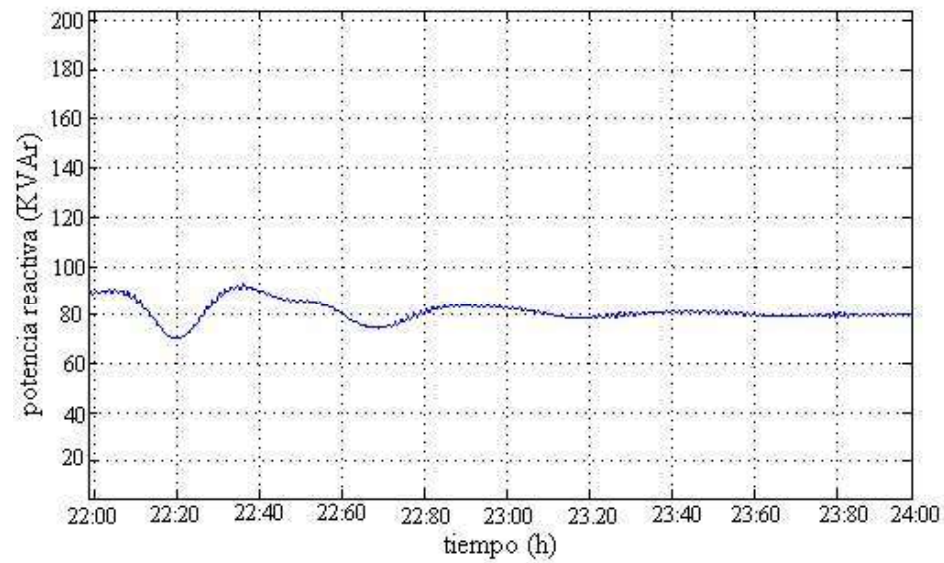


Figura 3.20. Generación de potencia real con una velocidad variable.



(a)

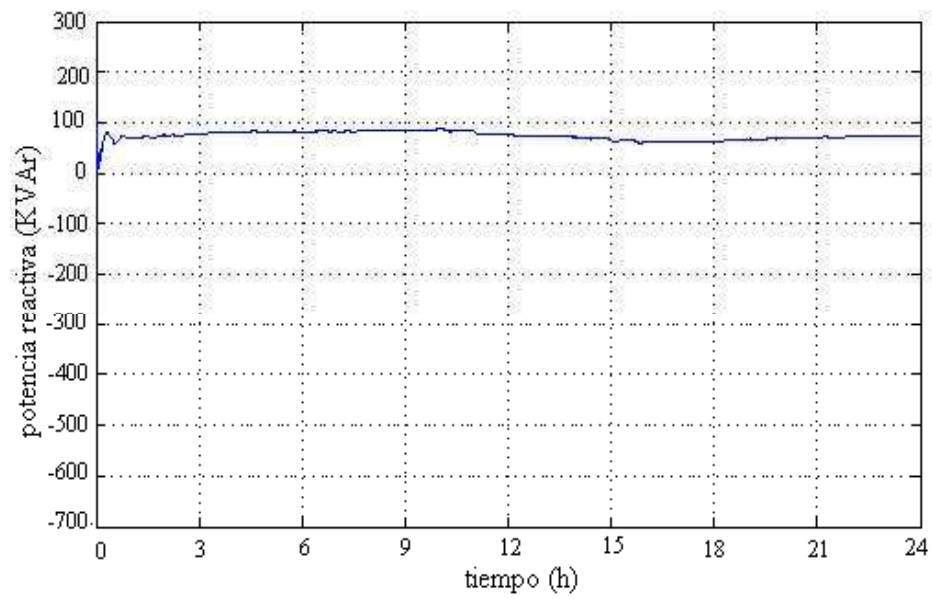


(b)

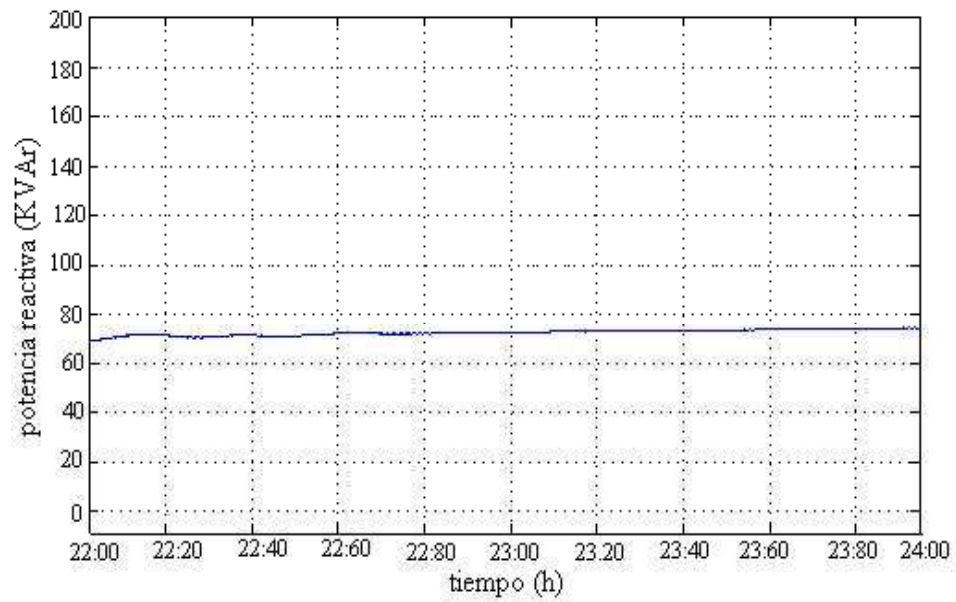
Figura 3.21(a) y (b). Potencia reactiva generada por el condensador síncrono.

La Figura 3.22(a) muestra la potencia reactiva que el banco de capacitores está aportando al sistema y la Figura 3.22(b) muestra un acercamiento al valor final.

La Figura 3.23(a) muestra la potencia reactiva absorbida por el generador asíncrono, la cual se suministra tanto por el banco de capacitores como por el condensador síncrono. Realizando un acercamiento al resultado en estado estable se puede observar de la Figura 3.23(b) que esta es 160KVar.

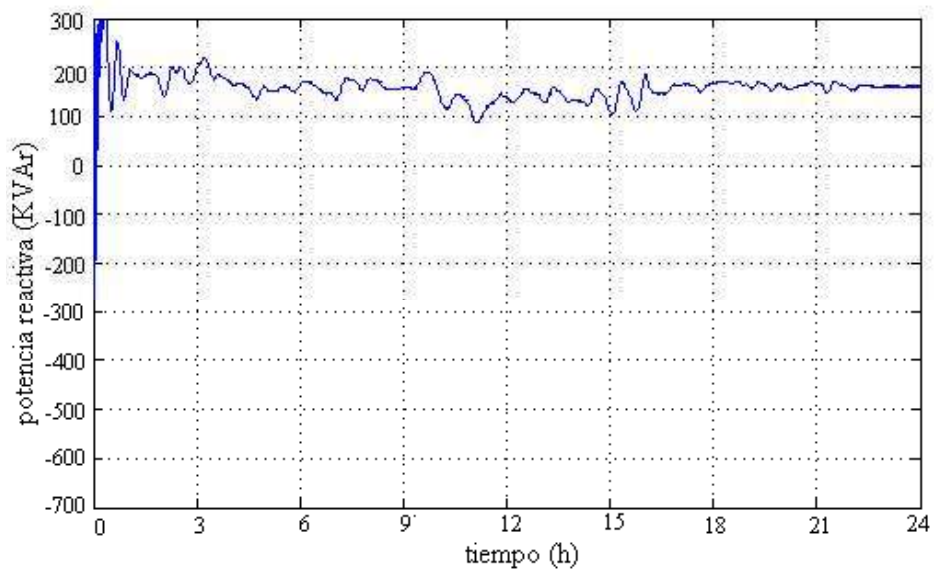


(a)

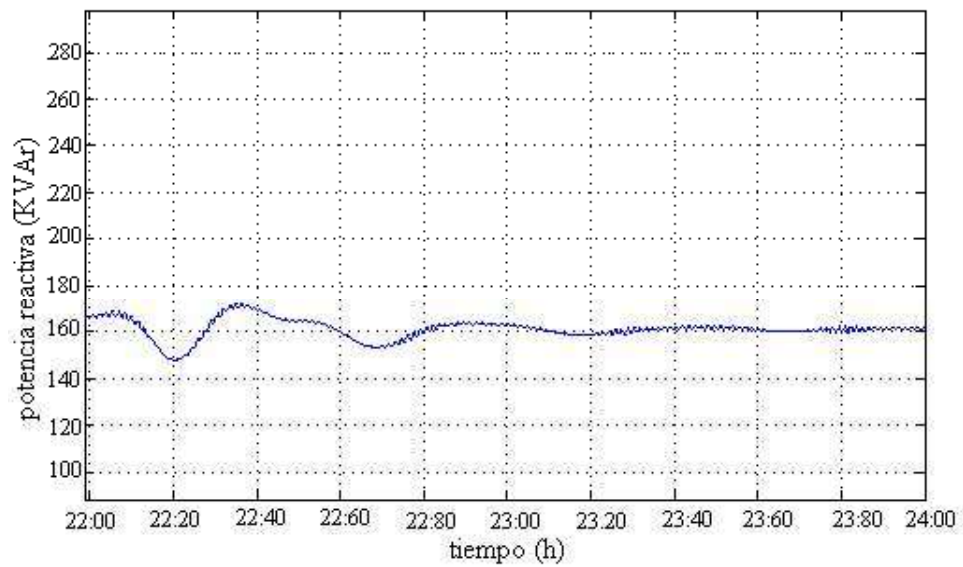


(b)

Figura 3.22. Potencia reactiva aportada por el banco de capacitores durante (a) un periodo de 24 horas y (b) valor de estado estable.



(a)



(b)

Figura 3.23. Potencia reactiva aportada por el generador asíncrono durante (a) un periodo de 24 horas y (b) el valor final de estado estable.

En la Figura 3.24 se muestra el comportamiento de la frecuencia del sistema aislado durante el periodo de operación de 24 horas. Se puede apreciar que la frecuencia del

sistema es superior a 60Hz, alcanzando valores de hasta 75Hz. Estos valores de frecuencia no son aceptables por lo cual es necesario incorporar una etapa de control que se encargue de regular dicha frecuencia.

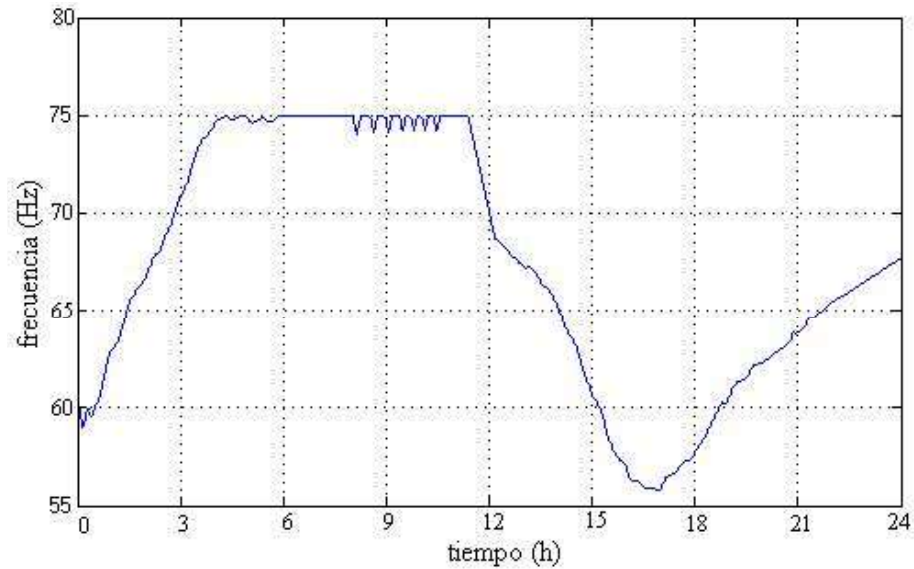
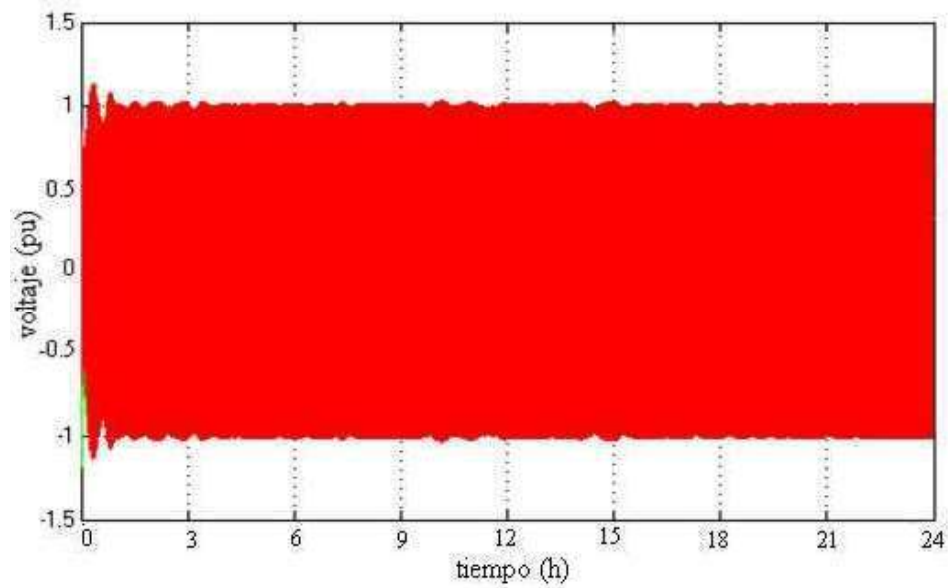
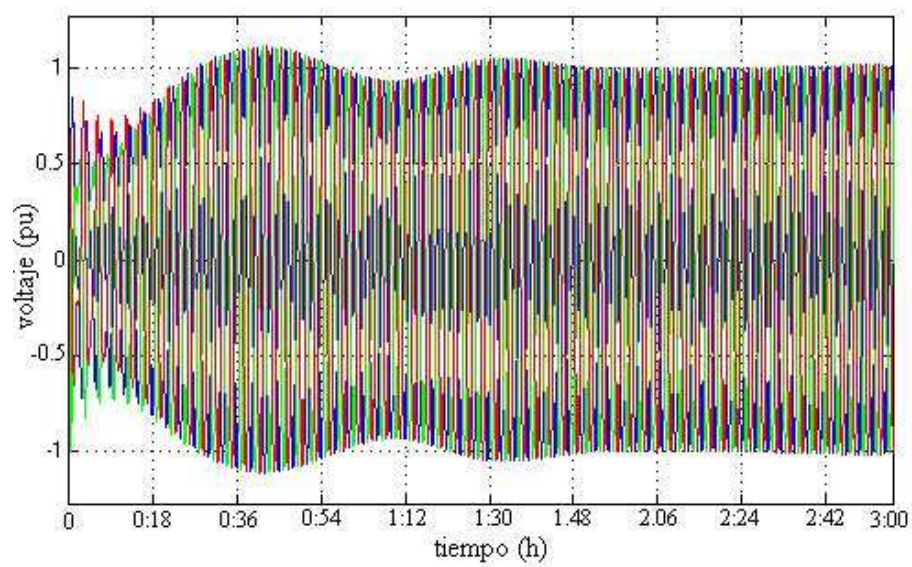


Figura 3.24. Frecuencia del sistema.

La Figura 3.25(a) presenta el voltaje trifásico de la red aislada, en donde se observa que en el lapso de tiempo 0 a 3 horas no se mantiene en 1 pu debido a las variaciones de viento y a la falta de un sistema de control. Con la finalidad de mantener el sistema con una mejor eficiencia, en la Figura 3.25(b) se hace un acercamiento para poder observar las variaciones de voltaje que existe en el periodo de 0 a 3 horas.



(a)



(b)

Figura 3.25. Voltaje del sistema de generación durante (a) la operación en el intervalo de 24 horas y (b) acercamiento al periodo 0 a 3 horas.

3.5. Conclusiones

En este capítulo se presentó la estructura del sistema de generación aislado. Se analizó por medio de simulación el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación con velocidad de viento fija y variable. Se observó que en el caso de la velocidad de viento variable se tiene una mayor generación de lo requerido para abastecer la carga principal. Por esta razón la frecuencia del sistema aumenta considerablemente por lo que no existe algún control que mantenga constante el sistema aislado.

El análisis del sistema a velocidad fija se observa que la potencia de generación es igual a la requerida por la carga, en este caso se tiene variación en la frecuencia la cual es muy pequeña, por lo que no existe una generación mayor que la carga principal, como no se tiene un control la velocidad del generador asíncrono se va incrementando por arriba de 1pu.

Capítulo 4

Control de la frecuencia de la red aislada

En este capítulo se presenta un estudio por simulación del control de la frecuencia del sistema basado en la conexión de carga. En este control se usan dos tipos de cargas: motores de inducción de mediana capacidad que representan un sistema de bombeo y carga resistiva.

4.1. Control auxiliar en base a motores de inducción

En la Figura 4.1 se muestra el esquema del control de frecuencia que se utiliza para regular la frecuencia del sistema por un conjunto de motores de inducción y resistencias trifásicas de carga.

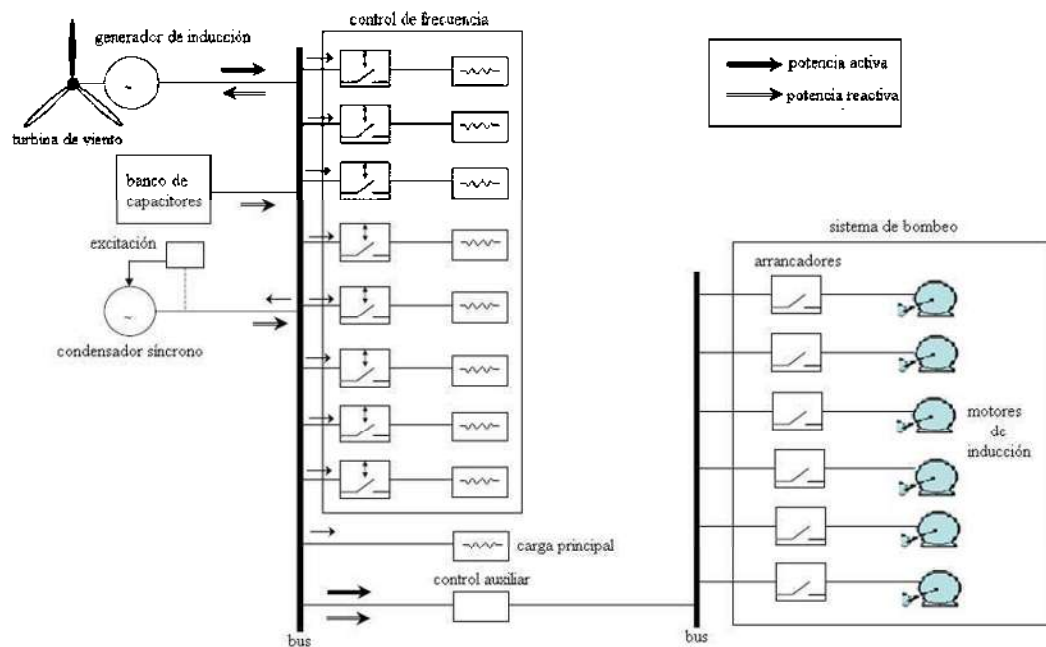


Figura 4.1. Esquema general del sistema aislado.

En este trabajo se propone un control para regular la frecuencia del sistema eléctrico aislado que aproveche la potencia excedente. Es por ello que el sistema de control tiene como prioridad primeramente energizar el sistema de bombeo integrado por seis motores de inducción con la finalidad de consumir la mayor cantidad de potencia excedente. El sistema de bombeo dispone de hasta 6 motores de inducción, cada uno con una capacidad de 22.38KW. Dichos motores pueden estar acoplados a bombas de agua para constituir un sistema de bombeo que almacene el exceso de potencia que se genere en un momento determinado.

Para los motores de inducción se incorporan arrancadores que permiten energizar dichas máquinas evitando transitorios en el sistema eléctrico aislado (ver Figura 4.2).

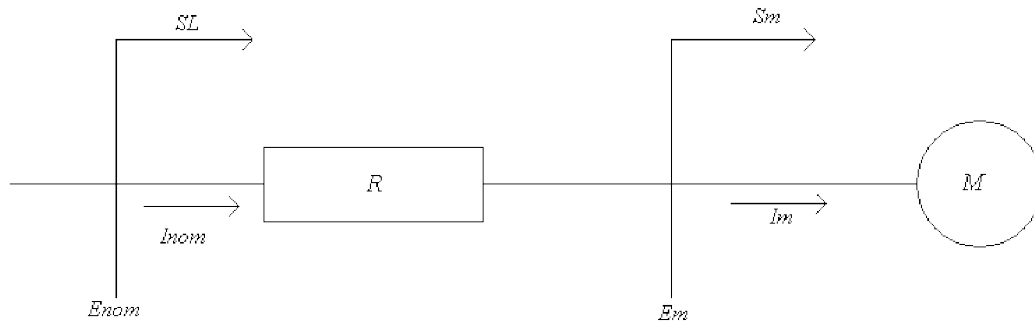


Figura 4.2. Diagrama del arrancador para la máquina de inducción.

El arrancador utilizado se basa en el uso de resistencias primarias el cual permite conectar resistencias en serie con el motor durante el periodo de arranque. Después de transcurrido un cierto tiempo preestablecido dichas resistencias se remueven. La caída de voltaje a través de las resistencias es alta al principio pero disminuye gradualmente conforme la velocidad aumenta y la corriente disminuye. Para tener un arranque suave es necesario elegir las resistencias para que el voltaje a rotor bloqueado a través del estator sea de 0.65 pu. Para el cálculo de las resistencias se toma en cuenta que la potencia aparente absorbida por el motor a voltaje pleno y condiciones de rotor bloqueado es,

$$S = \sqrt{3} E_{nom} I_{nom} \quad (4.1)$$

La potencia aparente absorbida por el motor cuando los resistores están presentes es,

$$S_m = \sqrt{3} E_m I_m \quad (4.2)$$

en donde

E_m Es el voltaje multiplicado por 0.65pu.

I_m Es la corriente multiplicada por 0.65pu.

La potencia aparente desde la línea, con los resistores en el circuito es,

$$S_L = \sqrt{3} E_{nom} I_m \quad (4.3)$$

Potencia activa consumida por el motor es,

$$P_m = S_m \cos \theta \quad (4.4)$$

La potencia reactiva absorbida por el motor es,

$$Q_m = \sqrt{S_m^2 - P_m^2} \quad (4.5)$$

Las resistencias consumen solo potencia real. Por lo tanto la potencia reactiva alimentada por la línea debe ser igual a la absorbida por el motor $Q_m = Q_L$.

Potencia activa alimentada por la línea.

$$P_L = \sqrt{S_L^2 - Q_L^2} \quad (4.6)$$

La potencia absorbida por las tres resistencias es,

$$P_R = P_L - P_m \quad (4.7)$$

La corriente a rotor bloqueado multiplicada por 0.65 I_m es la corriente en cada resistencia. Por lo tanto el valor de cada resistencia es [Wildi 2007],

$$R = \frac{P}{I^2} \quad (4.8)$$

Considerando los valores de $E_m = 299\text{v}$, $I_m = 31.85\text{A}$, $E_{nom} = 460\text{v}$, $I_{nom} = 49\text{A}$ y sustituyendo los valores en las ecuaciones anteriores se tiene que la resistencia calculada es de $R = 3.87\Omega$.

En la Figura 4.3 se muestra el control que se encarga de conectar los motores al sistema, el cual determina la diferencia entre la potencia generada y la potencia demandada. Posteriormente se compara la potencia generada excedente con la potencia total de los motores para determinar el número de motores y el instante de conexión de los motores.

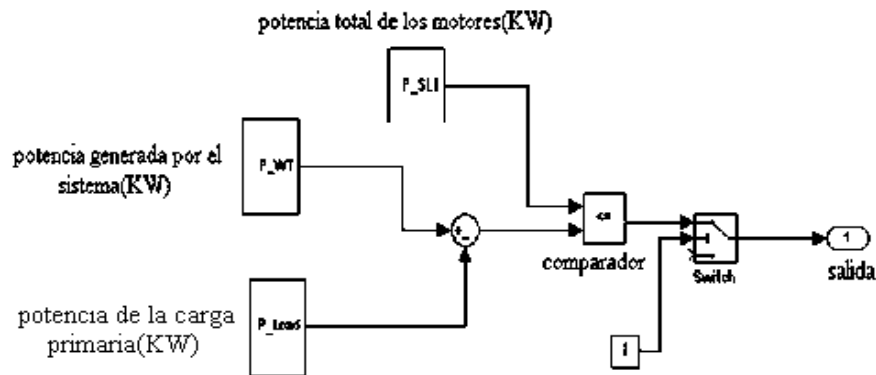


Figura 4.3. Determinación de la entrada en funcionamiento de los motores de inducción.

4.2. Controlador de frecuencia en base a cargas resistivas

En esta tesis se utiliza un regulador de frecuencia previamente propuesto [Szeidert 2002], el cual está basado en la conexión de carga resistiva en el sistema aislado para regular la frecuencia. La Figura 4.4 muestra la estructura del esquema de control de la frecuencia. La entrada del regulador de frecuencia utiliza los voltajes trifásicos, los cuales se usan en un bloque PLL para medir la frecuencia en el voltaje trifásico de la red si la frecuencia medida no es igual a la frecuencia de referencia. La señal de error se alimenta a un controlador PID y la señal analógica obtenida es convertida en una señal digital de 8

bits. La salida del regulador de frecuencia activa las cargas secundarias usadas para controlar la frecuencia [Szeidert 2002].

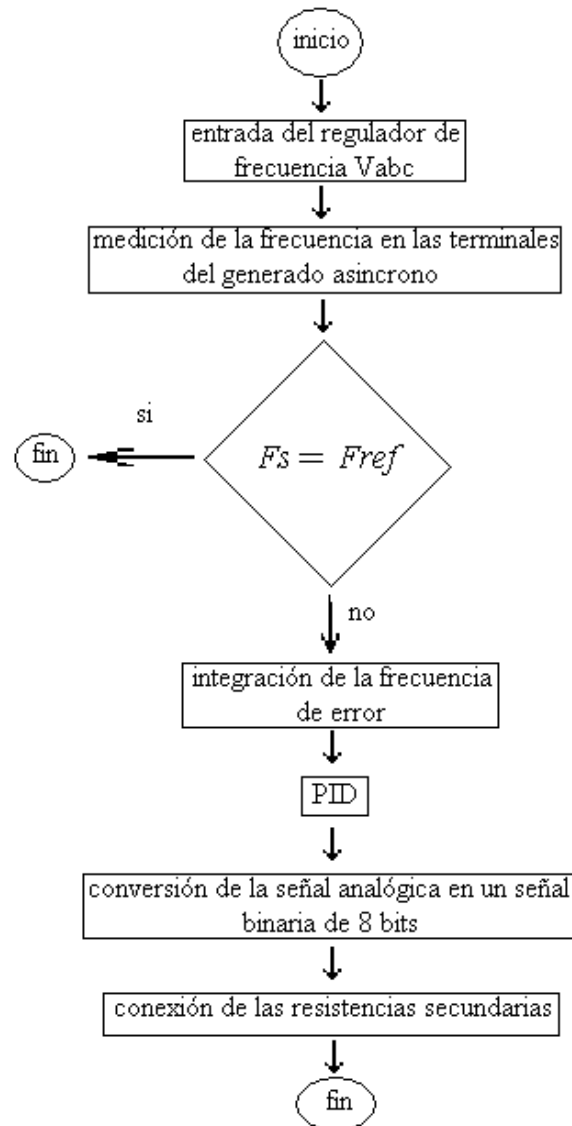


Figura 4.4. Esquema del regulador de frecuencia.

La Figura 4.5 muestra los bloques del programa en Simulink para el control de la frecuencia. La salida del regulador de frecuencia es la que activa las cargas secundarias para disipar el exceso de energía generada por el aerogenerador y al mismo tiempo

mantener constante la frecuencia. Las cargas secundarias se componen de 8 juegos de resistencias trifásicas conectadas en serie con válvulas GTO. La progresión binaria de 8 bits permite variar la resistencia que se conecta al sistema desde cero hasta un valor máximo con una resolución de 256 pasos. De esta manera, la carga pueda variar de 0 a 446.25KW con pasos de 1.75KW. En la Figura 4.6 se muestra el arreglo del banco de las resistencias [Szeidert 2002].

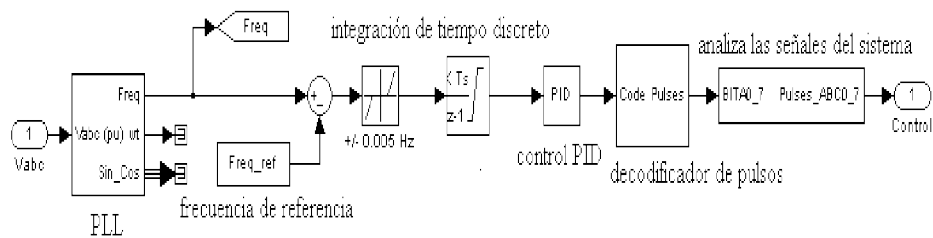


Figura 4.5. Control de frecuencia.

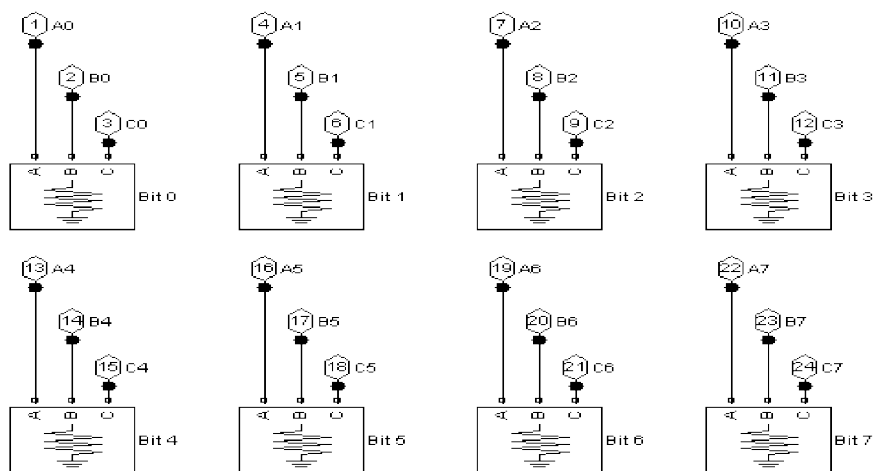


Figura 4.6. Banco de resistencias, para el control de la frecuencia.

4.3. Caso de estudio

4.3.1 Desempeño del control de la frecuencia basado en resistencias

Para evaluar el desempeño del control de la frecuencia se simula su operación en el sistema de generación aislado mostrado en la Figura 4.7. La finalidad de este control es mantener constante la frecuencia bajo la presencia de una fuente de viento variable.

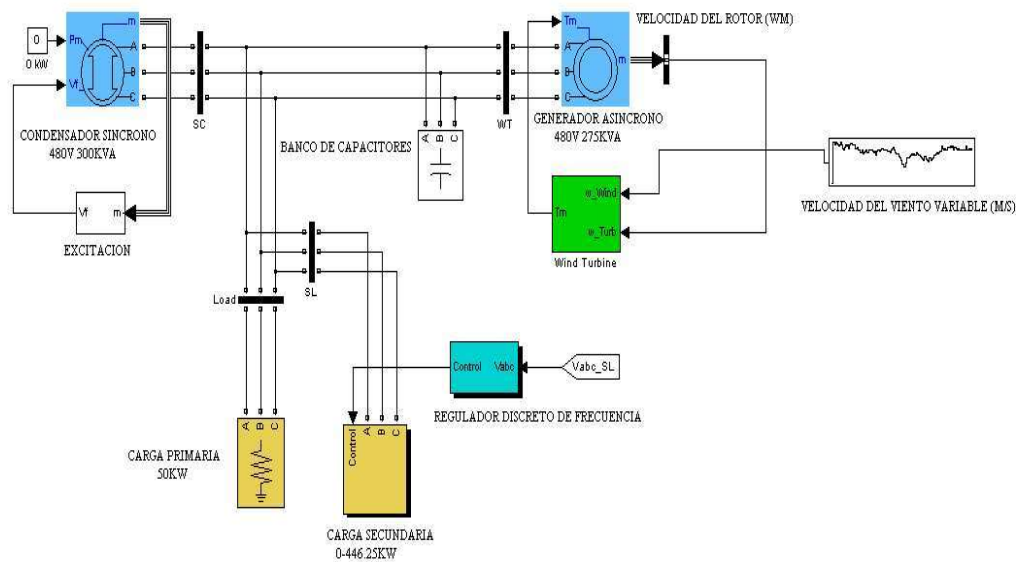


Figura 4.7. Generador aislado con el control de frecuencia.

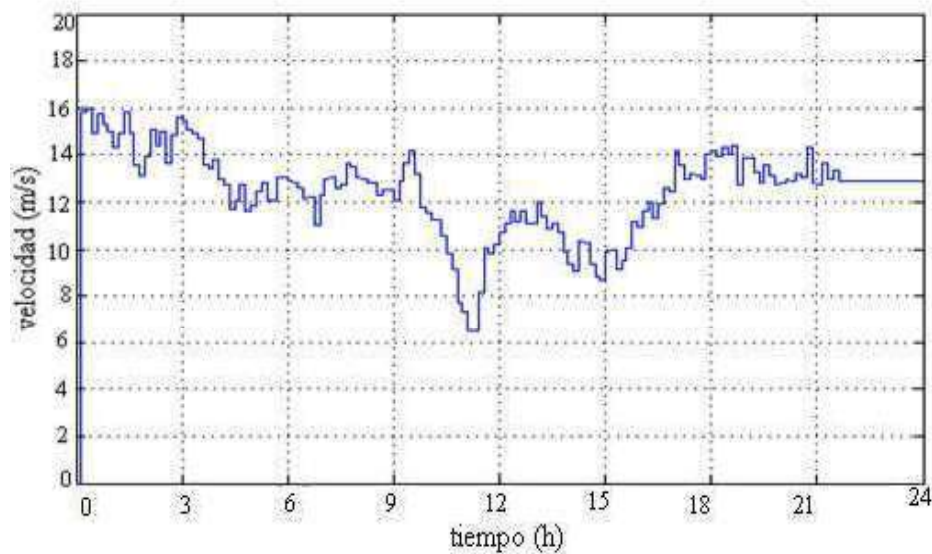


Figura 4.8. Variación de la velocidad del viento.

En la Figura 4.8 se muestra la variación del viento que se empleo para el análisis del sistema de generación aislado.

La Figura 4.9 muestra la frecuencia del sistema aislado cuando opera conjuntamente con el sistema de control implementado en este trabajo. Se puede apreciar un incremento importante en la frecuencia en el rango de tiempo de 0 a 3 horas, lo cual se atribuye a la variación de la velocidad del viento que está en el rango de 12 a 16 m/s. En este punto el sistema de control no puede mantener constante la frecuencia a pesar de conectar toda la carga resistiva disponible. Cuando la velocidad de viento disminuye el control es capaz de mantener constante la frecuencia alrededor de 60Hz a pesar de la variación del viento.

La velocidad del generador asíncrono se muestra en la Figura 4.10, en donde se puede observar que con la operación del control de frecuencia el generador no incrementa la velocidad de forma tan importante como se observó en el caso sin el control de frecuencia. Se observa que la velocidad del generador se incrementa por arriba de 1.15pu en el rango de tiempo desde las 0 horas hasta las 3 horas. El control no es capaz de mantener constante la frecuencia y la velocidad ya que en ese lapso de tiempo hay un

exceso de generación que no puede absorberse con la conexión del número máximo de resistencias de control.

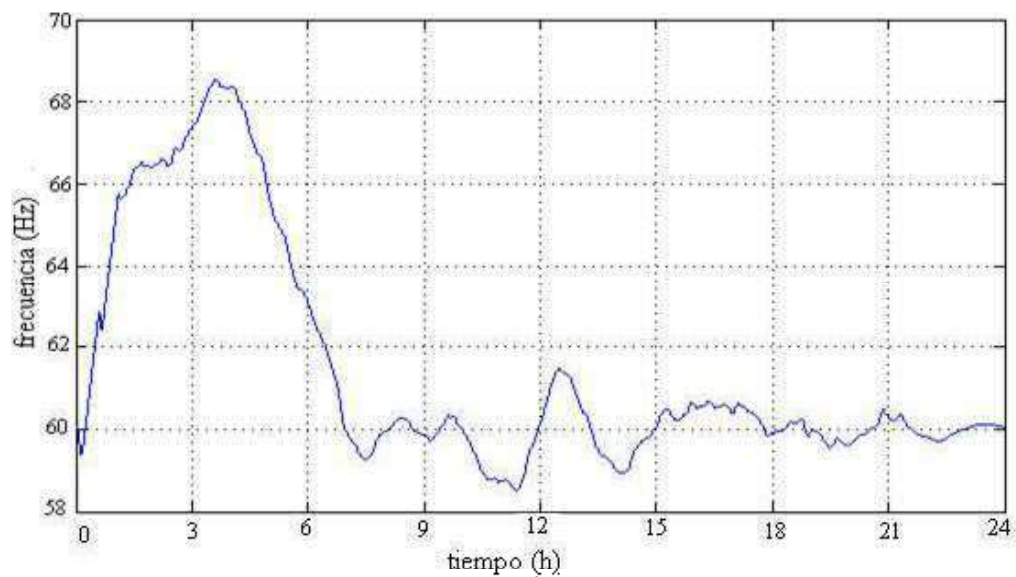


Figura 4.9. Frecuencia del sistema ante la variación del viento.

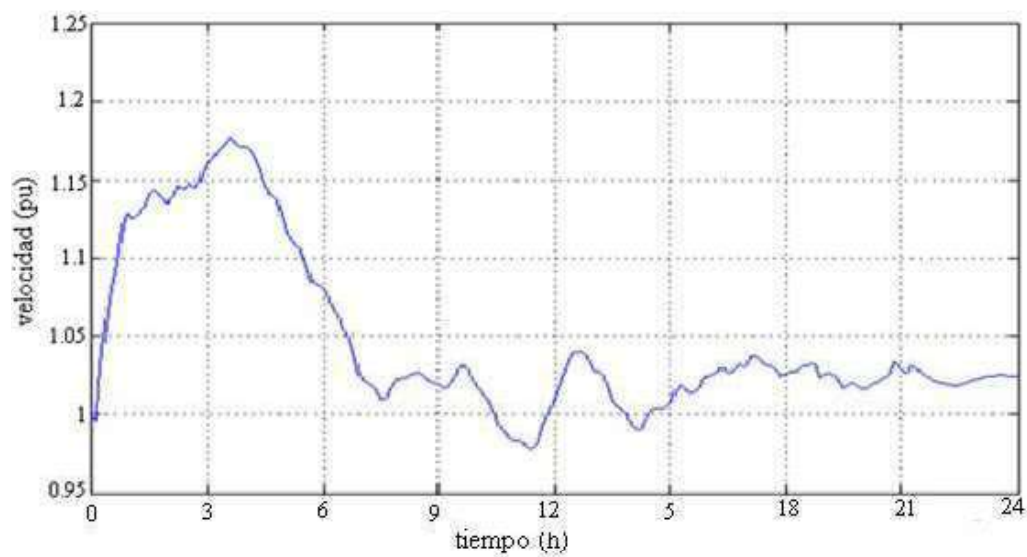


Figura 4.10. Velocidad del generador asíncrono.

La Figura 4.11 muestra la potencia que está absorbiendo el bloque de resistencias del sistema de control de frecuencia. Como se puede observar, en el rango de 0 a 1 horas el control no puede mantener estable el sistema ya que la carga secundaria tiene una capacidad máxima de 446.25KW para disipar el excedente de potencia, mientras que la potencia generada es mayor a esta potencia, debido a la variabilidad de la velocidad del viento que se encuentra en el rango de 12 a 16 m/s (ver Figura 4.8). La Figura 4.12 muestra la potencia generada por el sistema de generación aislado con las variaciones del viento.

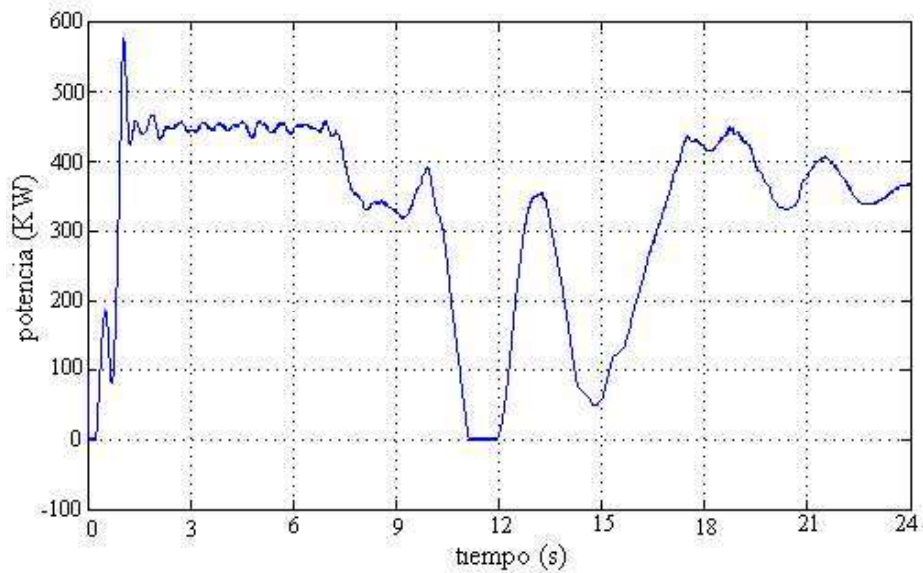


Figura 4.11. La potencia absorbida por el controlador de frecuencia basado en resistencias.

La potencia reactiva que aporta el condensador síncrono se muestra en la Figura 4.13, en donde se observan oscilaciones que se presentan por la variación de la velocidad del viento. Por su parte, la Figura 4.14 muestra la potencia reactiva aportada por el banco de capacitores.

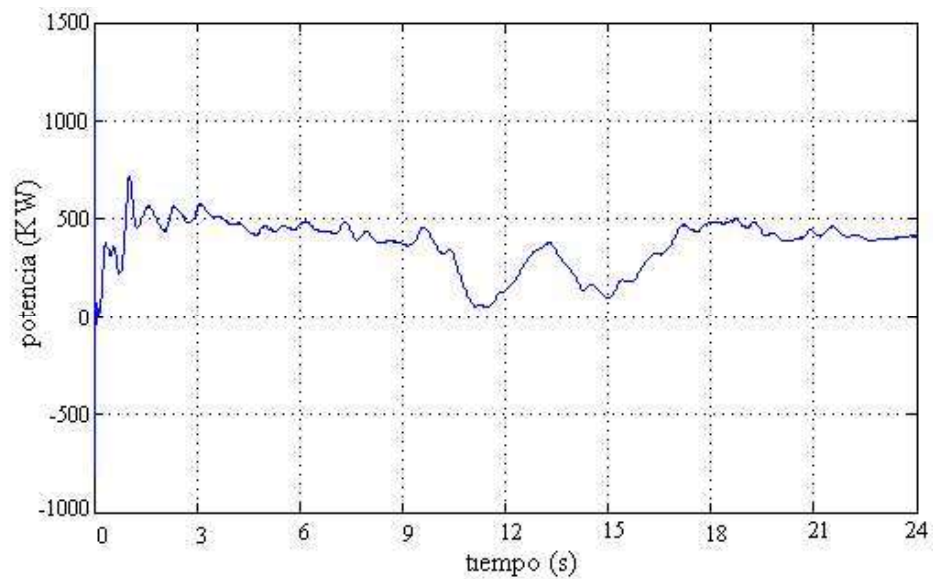


Figura 4.12. Potencia generada por el sistema de generación aislado con variaciones de la velocidad del viento.

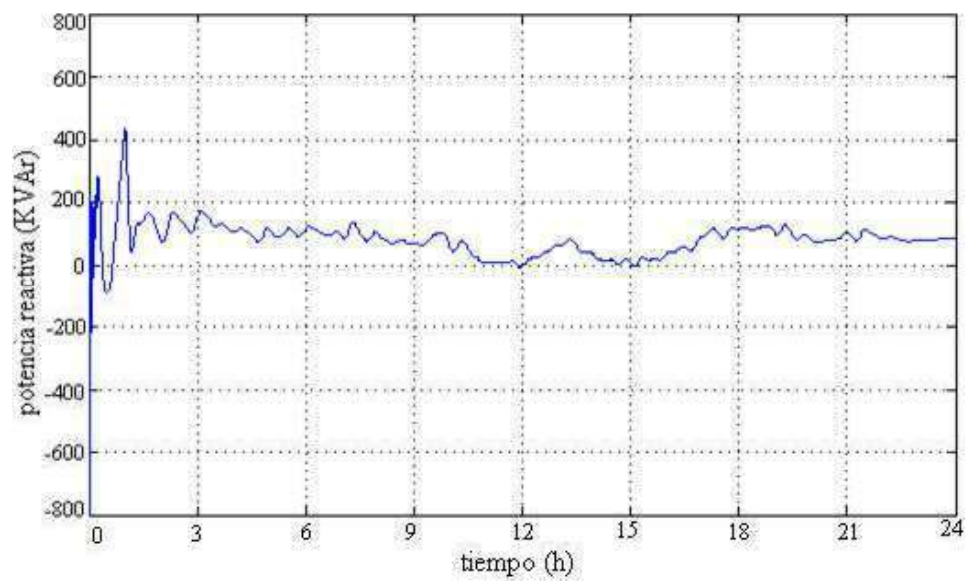


Figura 4.13. Potencia reactiva que aporta el condensador síncrono al sistema de generación aislado.

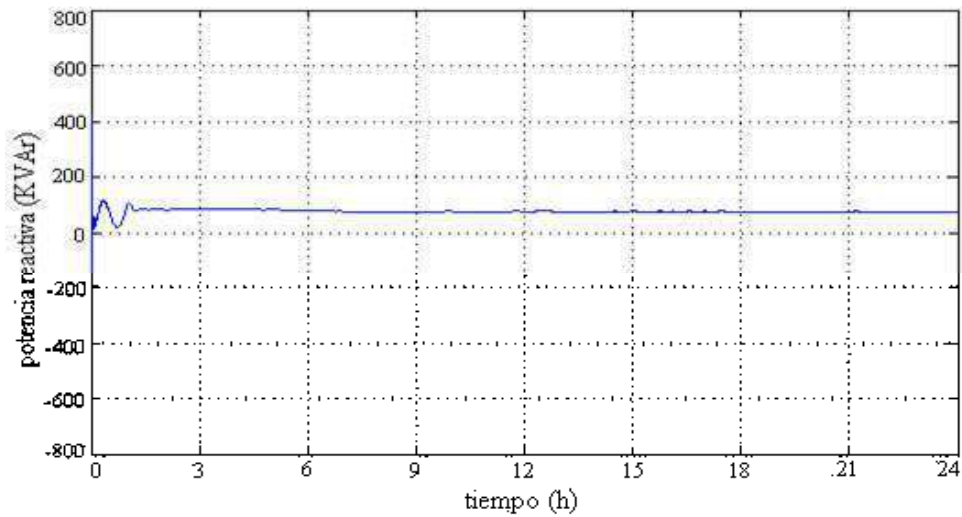


Figura 4.14. Potencia reactiva que aporta el banco de capacitores.

La Figura 4.15 muestra la potencia reactiva que absorbe el generador asíncrono, la cual la provee tanto el condensador síncrono como el banco de capacitores. En el rango de 0 a 1 horas se puede observar que tenemos una oscilación de la potencia lo cual lo causa la variación de la velocidad del viento (ver Figura 4.8) y como en el arranque se tiene corrientes muy grandes no es posible controlar esos transitorios que se observa en el rango de 0 a 1 horas.

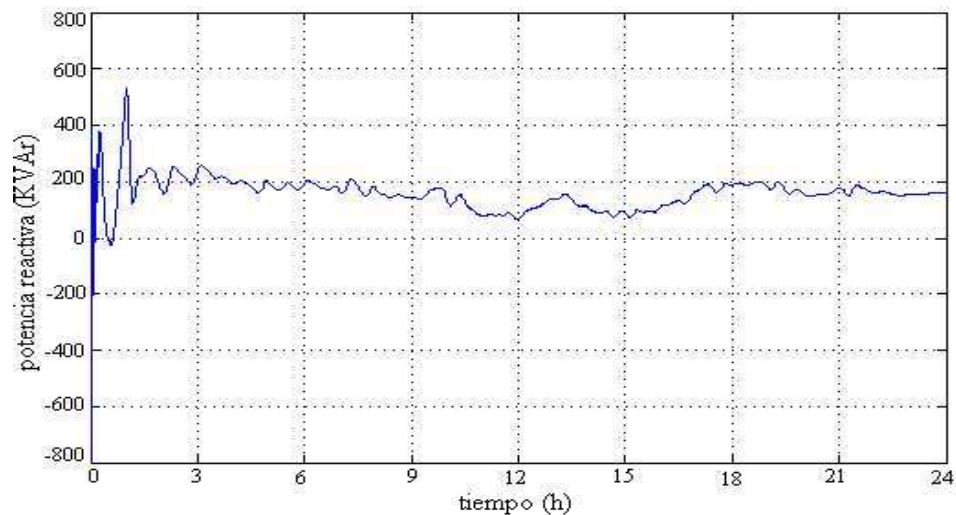


Figura 4.15. Potencia reactiva consumida por el generador asíncrono.

La Figura 4.16 indica los instantes de conexión de las resistencias secundarias del control de frecuencia. Se observa que cuatro bancos de resistencias se mantienen conectadas (ver Figuras 4.16(a), (b), (c) y (d)) en el intervalo de tiempo de 0 a 9 horas debido a la variación de la velocidad del viento (ver Figura 4.8). Conforme descende la velocidad del viento de 14 a 6.5m/s (ver Figura 4.8) los bancos de resistencia se desconectan ya que no son necesarios, por lo que cuatro bancos que se mantienen conectados (ver Figura 4.16(a), (e), (g), (h)) son suficientes para poder disipar la potencia excedente del sistema.

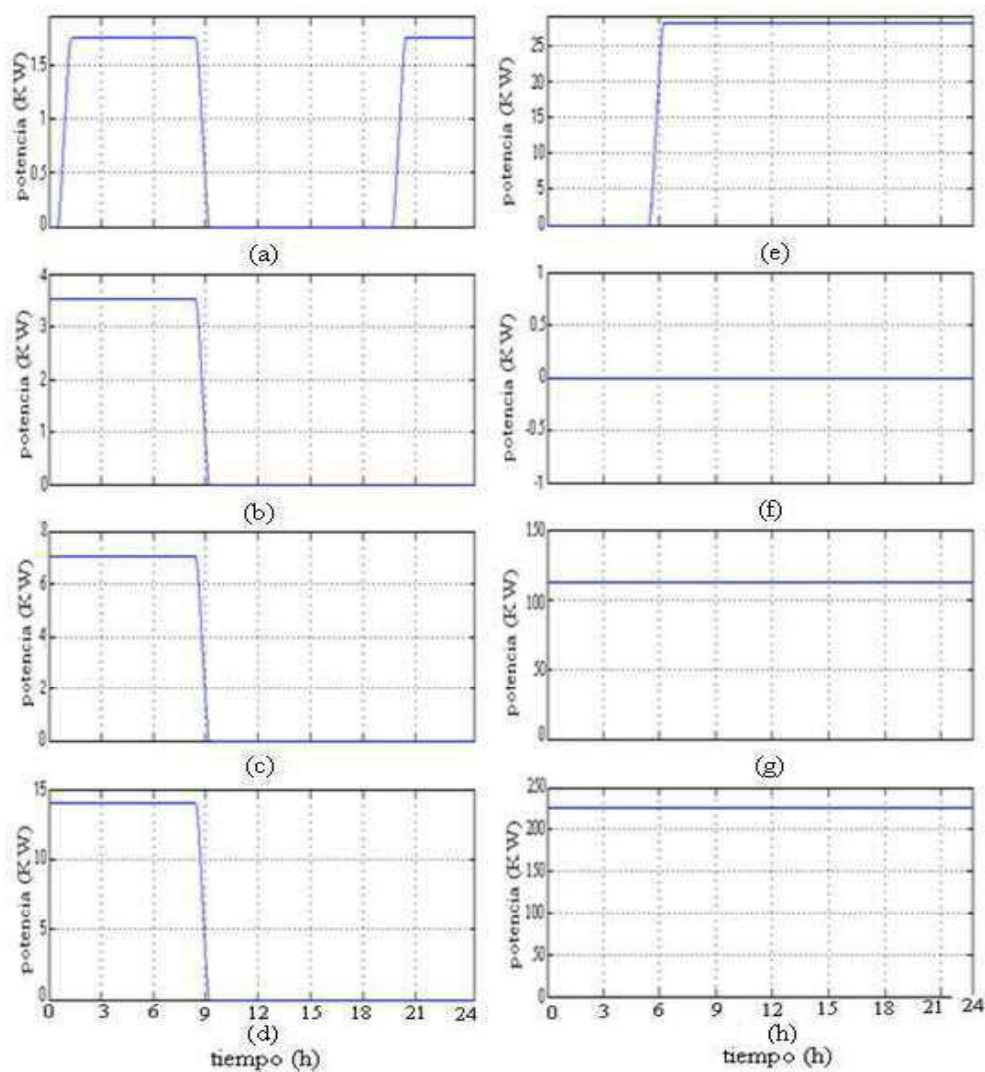


Figura 4.16. Conexión de las resistencias del control de frecuencia.

Tabla 4.1. Capacidad de cada banco de resistencias.

Resistencias	Potencia (KW)
(a)	1.75
(b)	3.5
(c)	7
(d)	14
(e)	28
(f)	56
(g)	112
(h)	224
TOTAL	446.25

4.3.2. Desempeño del controlador principal y auxiliar

En esta sección se presenta la simulación del control de la frecuencia basada en resistencias y el auxiliar basado en un sistema de bombeo (ver Figura 4.17).

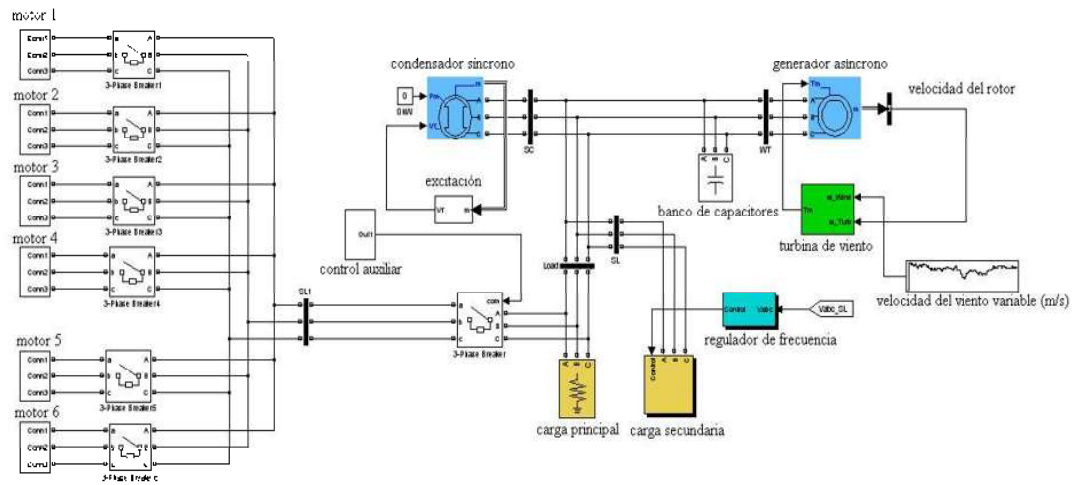


Figura 4.17. Sistema de generación aislado con controlador de frecuencia y sistema de almacenaje de energía.

Los motores que integran el sistema de bombeo cuentan con un arrancador basado en resistencias de limitación de la corriente, que permite ajustar los instantes de conexión/desconexión de dichas resistencias. Este arrancador tiene la finalidad de evitar transitorios drásticos en el arranque de los motores.

En la Figura 4.18 se muestran los datos de la velocidad del viento usados en este estudio, en donde se observa que la velocidad varía en el rango de 6 y 16 m/s en un periodo de 24 horas.

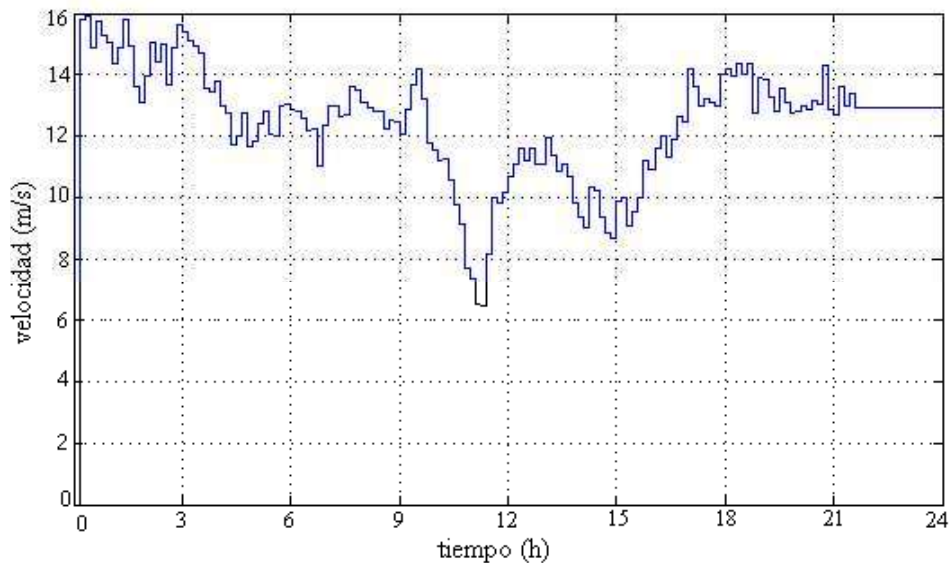


Figura 4.18. Velocidad del viento en la localidad de la Venta, en el estado de Oaxaca.

La respuesta en la frecuencia del sistema se muestra en la Figura 4.19. Se observa un transitorio en el tiempo 0 a 1 horas, lo cual se debe a la velocidad del viento cercana a los 16 m/s (ver Figura 4.18). Durante este intervalo el control no puede regular la frecuencia a pesar de haber conectado el sistema de bombeo y toda la carga secundaria. Sin embargo, se puede apreciar un mejoramiento evidente en el control de la frecuencia respecto a la Figura 4.9. La Figura 4.20 muestra la velocidad de generador asíncrono, en donde se puede observar un incremento en el intervalo 0 a 1 horas cercano a 1.08pu debido a la velocidad del viento en ese intervalo.

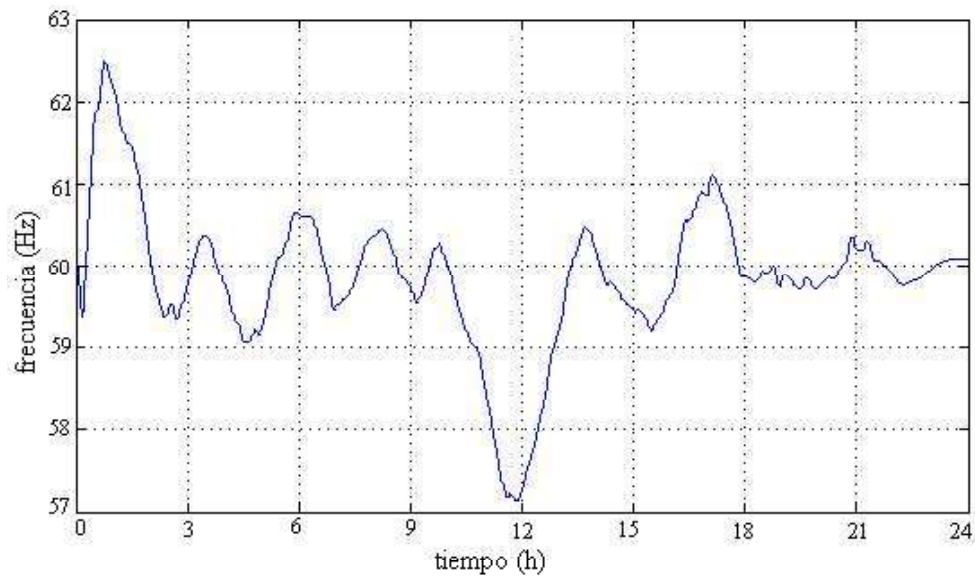


Figura 4.19. Frecuencia del sistema.

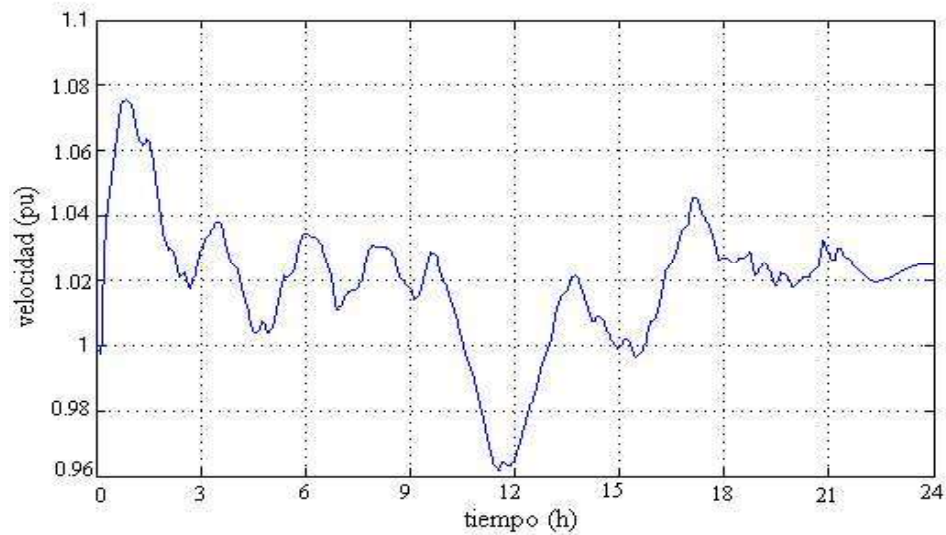
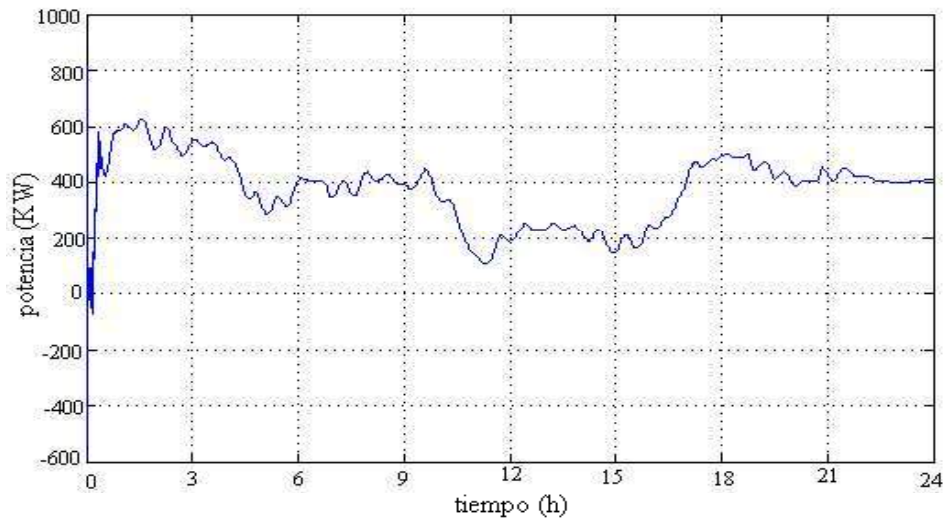


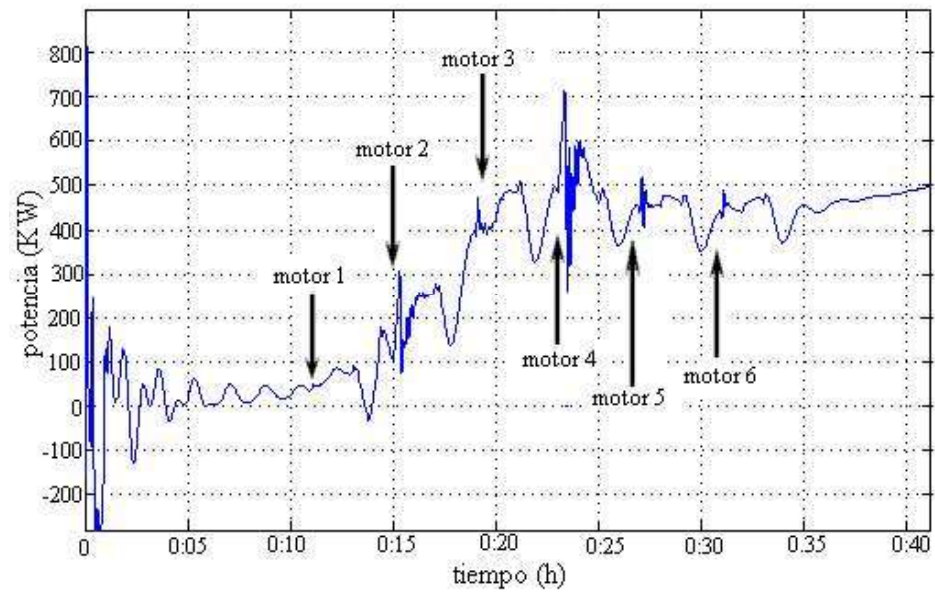
Figura 4.20. Velocidad del generador asíncrono.

La potencia generada por el sistema de generación aislado es la que se muestra en la Figura 4.21(a) Se puede apreciar que existen valores máximos de generación por arriba de 600KW en el intervalo de tiempo de 0 a 2:40 horas debido a la variabilidad de la velocidad

del viento y en la Figura 3.21(b) se hace un acercamiento para observar el instante de la entrada del funcionamiento de cada motor.



(a)



(b)

Figura 4.21. (a) Potencia generada por el sistema de generación aislada y (b) conexión de los motores del sistema de bombeo.

La Figura 4.22 muestra el sistema de control que determina de forma simultánea la conexión de los bancos de resistencias trifásicas para regular la frecuencia. Como se puede ver la capacidad del banco de resistencias trifásicas es de 446.25KW en donde en el rango de 0 a 2 horas donde la velocidad es mayor a 16m/s hay una mayor generación y el control activa los bancos de resistencias para poder disipar el excedente de potencia generada por el sistema. En el rango de 11 a 17 horas no se activan las resistencias secundarias del control ya que la velocidad del viento es menor de 8m/s. La potencia generada en este intervalo la consume tanto la carga principal y el sistema de bombeo.

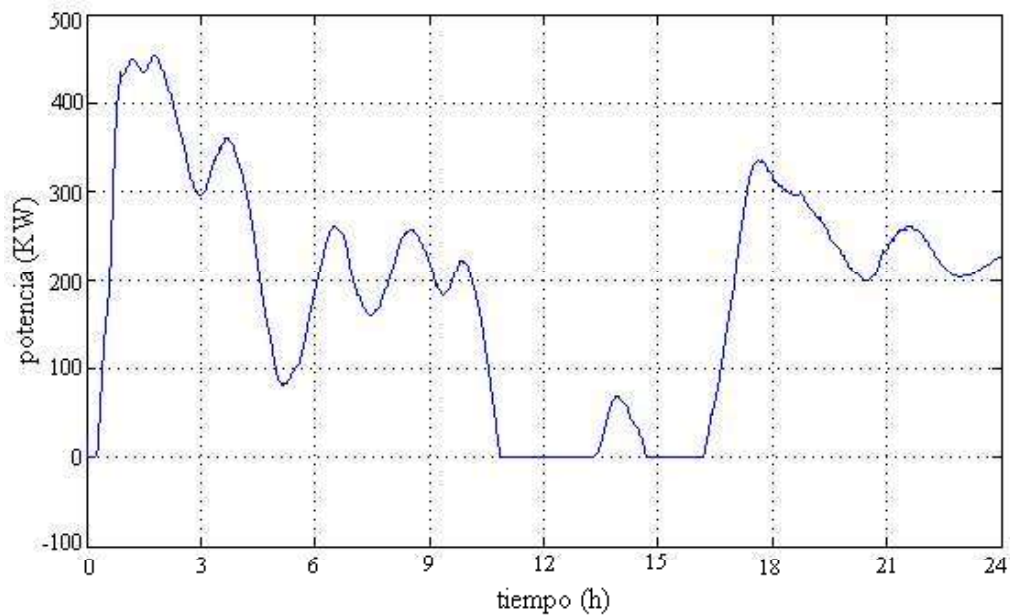


Figura 4.22. Potencia absorbida por el banco de resistencias secundarias.

La Figura 4.23 muestra la entrada en operación de los 8 bancos de resistencias que permiten regular la frecuencia del sistema. En donde se puede observar que las Figuras 4.23(a), (b), (c), (d), (e), (f) y (g) no se conectan en el rango de 0 a 16 horas ya que los motores están en operación en conjunto con un banco de resistencias (ver Figura 4.23(h)) para mantener el sistema estable, después de un incremento en la velocidad de 9 a 14.5m/s (ver Figura 4.18) en el intervalo de tiempo de 16 a 19 horas los bancos de resistencias se

conectan con la finalidad de mantener estable el sistema ante la variación de la velocidad del viento, ya estabilizado el sistema las resistencias se desconectan.

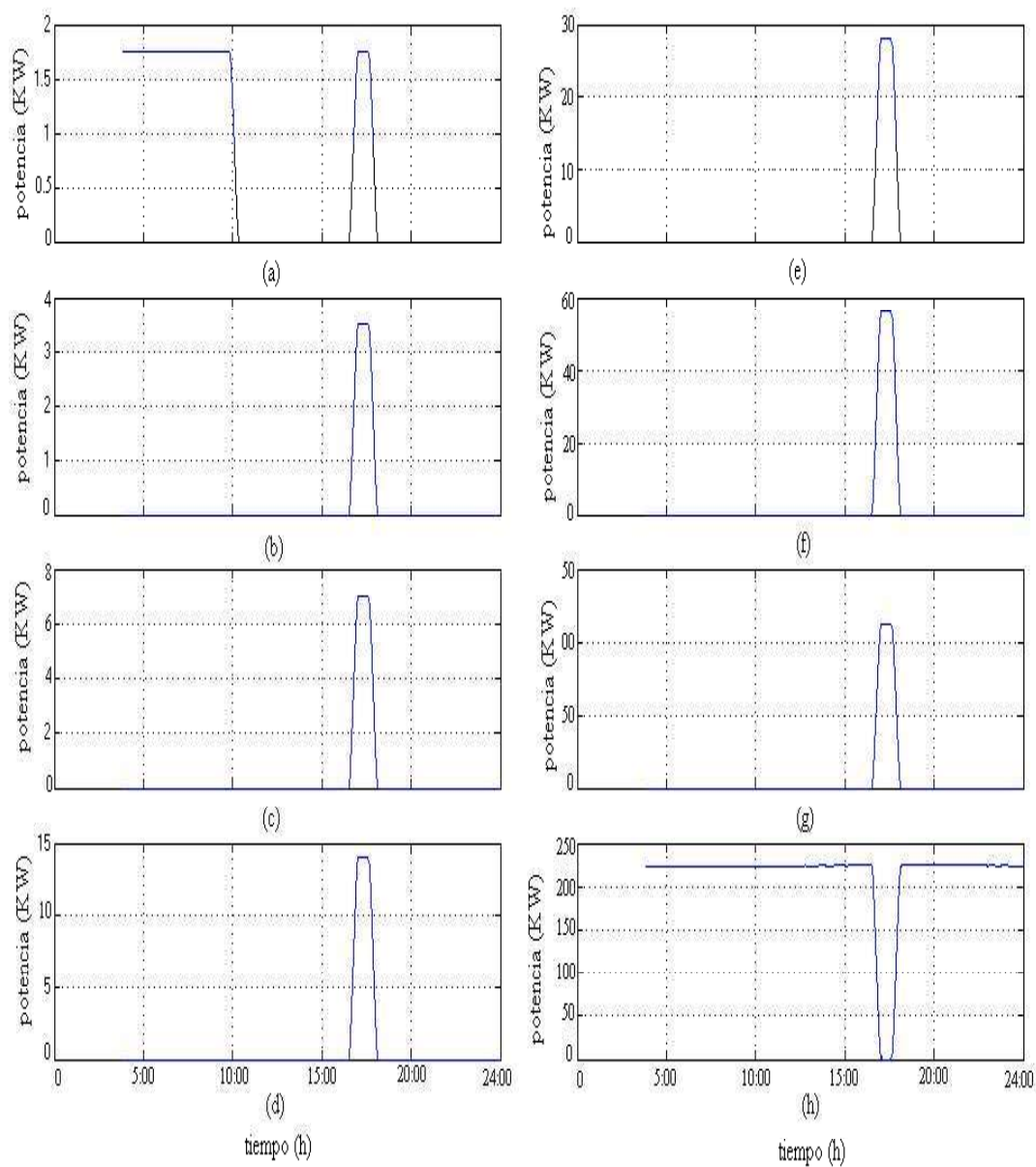


Figura 4.23. Entrada en operación de las resistencias secundarias.

4.4 Conclusiones

En este capítulo se presentó el análisis por simulación de la operación de un sistema de generación aislado basado en un generador eólico y un controlador de frecuencia. Se presentó la implementación de un sistema de control basado en la conexión de carga para regular la frecuencia del sistema eléctrico aislado. Dicho control incluye la conexión de motores de inducción para el bombeo de agua, con la finalidad de almacenar el exceso de potencia generada en las horas de mayor velocidad del viento. La energía generada que no es posible utilizar en el sistema de bombeo se disipa a través de bancos de resistencias, las cuales permiten a su vez la regulación de la frecuencia del sistema. Se observó que para un periodo de análisis de 24 horas con variaciones de velocidad de 6 a 16 m/s, el control de la frecuencia trabaja adecuadamente. Sin embargo, en el lapso de tiempo con presencia de velocidad de vientos cercanos a los 16 m/s el control de la frecuencia no logra mantener la frecuencia cercana a los 60Hz.

Capítulo 5

Conclusiones

En este capítulo se describen las conclusiones de esta tesis.

5.1. Conclusiones generales

Se presentó el análisis por simulación de la operación de un sistema de generación aislado basado en un generador eólico y un controlador de frecuencia. Este sistema de generación aislado tiene como elementos principales un aerogenerador, una máquina síncrona comportándose como condensador y un sistema de control de la frecuencia del sistema. Estos sistemas se utilizan para proveer de energía a comunidades rurales que no cuentan con el servicio de electricidad.

Se presentó la formulación básica del modelo de la máquina de inducción y se realizó el estudio de la máquina por medio de simulación en Simulink/Matlab. Se opera la máquina en los modos motor/generador y se presentó la operación de la máquina de inducción funcionando como generador conectado a un bus infinito. Para el análisis de la máquina de inducción como generador se simuló un par de entrada constante para llevar la máquina a una velocidad mayor a la de sincronismo, con la finalidad de invertir la dirección de su par inducido. Se analizó por medio de simulación el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación con velocidad de viento fija y velocidad variable. Se observó que en el caso de la velocidad de viento variable se tiene una mayor generación de la requerida para abastecer la carga. Por esta razón la frecuencia del sistema aumenta considerablemente y presenta oscilaciones. Para análisis del sistema a velocidad fija se observó que la potencia de generación es mayor que la requerida por la carga, por esta razón se tiene un incremento de la velocidad del generador asíncrono ya que no cuenta con un control que mantenga la frecuencia constante a 60Hz.

La implementación de un sistema de control basado en la conexión de carga para regular la frecuencia del sistema eléctrico aislado mostró resultados satisfactorios lo cual se vio en el control de la frecuencia. Dicho control incluye la conexión de motores de

inducción que integran un sistema de bombeo de agua con la finalidad de almacenar el exceso de potencia generada en las horas de mayor velocidad del viento. La energía generada que no es posible utilizar en el sistema de bombeo se disipa a través de bancos de resistencias, las cuales permiten a su vez la regulación de la frecuencia del sistema. Se observó que para un periodo de análisis de 24 horas con variaciones de velocidad de 6 a 16 m/s, el control de la frecuencia trabaja adecuadamente. Sin embargo, en el lapso de tiempo con presencia de velocidad de vientos cercanos a los 16 m/s el control de la frecuencia no logra mantener la frecuencia cercana a los 60Hz. Esto se debe al valor de las resistencias trifásicas usadas para regular la frecuencia. Una posible solución a este problema implicaría adicionar al menos un banco de resistencias adicionales que permita disipar el exceso de energía existente en el sistema de generación para velocidades de viento mayores a 16 m/s. Sin embargo, el uso de las resistencias no es el método más eficiente ya que la energía se disipa en forma de calor. Por lo tanto, se deben explorar otras opciones más eficientes, tales como el uso de volantes de inercia, bancos de baterías, almacenamiento de energía en superconductores magnéticos y supercondensadores.

Uno de los potenciales más importantes de los desarrollos tecnológicos en almacenamiento es poder utilizar eficientemente los recursos energéticos, como almacenar energía en periodos con sobregeneración para ser usada en periodos de mayor demanda y así aprovechar toda la energía posible

5.2. Trabajos futuros

En este trabajo se mostró la posibilidad de un sistema de generación básico a las comunidades rurales que permita el mejoramiento del nivel de vida de sus habitantes. Por lo tanto se recomienda desarrollar para trabajos futuros los siguientes aspectos:

- Incorporar un generador diesel para los intervalos en donde la velocidad del viento sea menor a 6 m/s.
- Incorporar modelos de paneles solares para abastecer de energía a la comunidad.
- Incorporar otros sistemas de almacenaje de energía como bancos de baterías, aprovechar el exceso de energía durante las horas de máxima velocidad del viento.

Referencias:

[Alvarez 2006]

Clemente Alvarez, Manuales de energia renovables. Energia Eólica, Madrid, septiembre 2006.

[Pazmiño e Hidalgo 2007]

M. Pazmiño e R. Hidalgo, Medición del Potencial Eólico para la Construcción del Futuro Parque Eólico en el Campus Presperina” ESPOL, vol 20, Ecuador, octubre 2007.

[Alvar 2006]

M. Alvar, “Contribuciones al Sistema Electronico de Control de un Convertidor NPC de tres Niveles de 250KVA usado en Turbinas Eólicas”, Universidad de Alcalá. Escuela Politecnica, Ingenieria Tecnica de Telecomunicaciones. Argentina, Junio de 2006.

[Alvarez 2004]

A. Alvarez, “Futuro de la Generación en Energía Eléctrica”, Foro de Energias Alternativas en el Estado de Michoacan, Michoacan 2004.

[Bor 2002]

J. Bor, “Estudio del Modelado Matemático del Motor de Inducción Trifásico Simulación en Régimen Dinámico”, Universitat Rovira I Virgili, junio 2002.

[Camocardi 2004]

P. Camocardi, “Sistema Autonomo de Conversión de Energia Eólica con Máquina de Doble Bobinado. Aplicación del Bombeo de Agua”, Universidad Nacional de la Plata, Chile 2004.

[Counan 1986]

C. Counan, “Fontionement Dynamique D’aerogenerateurs Raccordes a un Reseau Electrique”, Bulletin de la Direction des Etudes et Recherches, Electriques, Materiels, 1986.

[Gallardo 2002]

R.Gallardo, “Sistemas Aislados de Aerogeneradores de Electricidad en Escuelas Rurales”, Universidad de Magallanes, Chile, mayo 2002.

[Gagnon 2002]

R.Gagnon, “Modeling of a Generic High-Penetration no-Storage Wind-Diesel System Using Matlab/Powersystemblockset”, global windpower conference, Paris, France, 2002.

[Hansen 2001]

L.H. Hansen, “Conceptual Surver of Generators and Power Electronics for Wind”. Riso national laboratory, roskilde, denmarck, december 2001.

[Labriola 2007]

V.M. Labriola, “Desarrollo en Escala de Turbinas Eólicas de 1KW para Vientos Patagonicos” 8° congreso iberoamericano de ingeniería mecánica, Buenos Aires, octubre de 2007.

[Martinez 2007]

J. Martinez, “Representación en Espacio de Estado de Sistemas de Generación Distribuida basados en Sistemas Híbridos Eólicos-Fotovoltaicos de Pequeña Escala”, Agosto 2007.

[Sharaf y Abo-Al-Ez, 2006]

A. M. Sharaf, K.M. Abo-Al-Ez, A Novel FACTS Based (DDSC) Compensator for Power-Quality Enhancement of L.V. Distribution Feeder with a Dispersed Wind Generator, International Journal of Emerging Electric Power System, 2006.

[Szeidert 2002]

I. Szeidert, “Two Axis Modeling of Induction Generators for Windmills”, Global Windpower Conference, Paris 2002.

[Vargas 2003]

L. Vargas, “Análisis Dinámico de la Operación de Parques Eólicos Interconectados al SIC”, Chile 2003.

[Ackermann 2005]

T. Ackermann, Wind Power in Power System, England: John Wiley & Sons, 2005.

[Chapman 2005]

S. J. Chapman, Maquinas Electricas, México: McGraw-Hill, 2005.

[Freris 1990]

L.L. Freris, Wind Energy Conversion Systems, New York: Prentice Hall, 1990.

[Ong 1998]

C. M. Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink, New Jersey: Prentice hall, 1998.

[Wildi 2007]

T. Wildi, Maquinas Electricas y Sistemas de Potencia, México, Prentice Hall, 2007.

[CONAE 2005]

CONAE. Generación Distribuida. Octubre del 2005. www.conae.gob.mx.

[IEEE_1547, 2003]

IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power System, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2003.

[Mathwork 2008]

Mathwork. Asynchrhonous Machine. Noviembre 2008. www.mathwork.com.

[World Energy Council 2007]

Surver of Energy Resources Executive Summary, www.worlddenenergy.org, Londres, 2007

[Vargas 2008]

L. Vargas, Sistema de Excitación de máquinas Sincronicas, Facultad de Cienciad Fisicas y Matematicas, Universidad de Chile, 2008.

[Sans 2006]

X. J. Sans, “Diseño de un Grupo Eólico de Pequeña Potencia”, Universitat Rovira I Virgili, septiembre de 2006.