

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Simulación del sistema eólico con generador de inducción implementado
en Turiguanó, Ciego de Ávila.**

Autor: Manuel Mesa Rodríguez

Tutor: Ing. Gilberto Machado Burguera

Santa Clara

2014

"Año 56 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Automática y Sistemas Computacionales



TRABAJO DE DIPLOMA

**Simulación del sistema eólico con generador de inducción implementado
en Turiguanó, Ciego de Ávila.**

Autor: Manuel Mesa Rodríguez.

Email: mmesa@uclv.edu.cu

Tutor: Ing. Gilberto Machado Burguera.

Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

Email: gilberto@uclv.edu.cu

Consultante: Dr. José Abreu García.

Dpto. de Automática, Facultad de Ing. Eléctrica, UCLV

Email: abreu@uclv.edu.cu

Santa Clara

2014

"Año 56 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Autor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

[...] Mientras no seamos un pueblo realmente ahorrativo, que sepamos emplear con sabiduría y con responsabilidad cada recurso, no nos podremos llamar un pueblo eternamente revolucionario.

Fidel Castro.

DEDICATORIA

- A mis padres por haberme dado la vida, porque han sido mi ejemplo y mi motor para seguir adelante.
- A mi novia por su ayuda, comprensión y todo el amor brindado durante este tiempo.
- A mi hermana y a mi hermano por apoyarme en todo momento.
- A mis suegros por confiar en mí y darme fuerza para seguir adelante.
- A mis abuelos por su apoyo y amor brindado durante todos estos años.
- A mi tía por enseñarme a luchar por lo que quiero y por nunca dejarme caer.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas sin cuyo apoyo, colaboración y paciencia este trabajo jamás hubiera sido posible.

- ✚ A mi tutor y amigo Gilberto por su ayuda, su tiempo y preocupación por la feliz culminación de este trabajo.
- ✚ A mis padres Idania y Manuel por el apoyo brindado y el sacrificio realizado para que pudiera terminar mis estudios.
- ✚ A mi novia por ayudarme a afrontar estos momentos tan difíciles, darme aliento cuando más lo necesitaba, por brindarme su amor y comprensión.
- ✚ A mis hermanos por apoyarme siempre.
- ✚ A mis abuelos y mi tía por estar siempre pendientes de mí.
- ✚ A mis suegros por ayudarme y apoyarme como si fuera un hijo.
- ✚ A Lesyani por su dedicación y disposición en la realización de este trabajo.
- ✚ Al profesor Abreu por haber compartido parte de sus conocimientos conmigo.
- ✚ A los compañeros del parque eólico de Turiguanó por recibirme siempre con las puertas abiertas.
- ✚ Al compañero Arias por ayudarme con su conocimiento.
- ✚ A toda mi familia por el apoyo brindado.
- ✚ A mis amigos por todos estos años que vivimos juntos y por todo su apoyo.
- ✚ A todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron a la realización de este sueño.

TAREA TÉCNICA

- La realización de un estudio sobre las características de los sistemas de generación eólica.
- La caracterización de los sistemas eólicos con generador de inducción jaula de ardilla.
- El análisis y simulación del aerogenerador de este tipo.
- Confección y presentación del informe final.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

La energía eólica es hoy en día una de las opciones más efectivas y prácticas para la generación de electricidad a partir de energías renovables. Sin embargo, su incremento provoca que los sistemas de potencia se vuelvan más dependientes a las variaciones de la velocidad del viento, lo que hace importante el tipo de tecnología utilizada, ya que los aerogeneradores de velocidad fija conectados directamente a la red tienen un gran consumo de potencia reactiva. El MATLAB es un software que provee información valiosa de la interacción dinámica entre los aerogeneradores y las redes de potencia a las que se conectan, por lo que en este trabajo se realiza un análisis de la máquina de inducción con rotor jaula de ardilla en régimen generador, partiendo de la utilización del Simulink de MATLAB, el cual permitió obtener el comportamiento del parque eólico mediante distintas gráficas en función del tiempo (potencia reactiva, potencia activa y velocidad del rotor), además de otros resultados que demuestran el comportamiento de estos sistemas ante una falla en la línea.

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA TÉCNICA	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
Organización del informe	3
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA ENERGÍA EÓLICA	5
1.1 Antecedentes.....	5
1.2 Estado del arte.....	7
1.3 Energías Renovables.....	8
1.3.1 Energía Solar.....	8
1.3.1.1 Energía Solar fotovoltaica.....	9
1.3.1.2 Energía Solar fototérmica.....	9
1.3.1.3 Energía termoeléctrica.....	9
1.3.2 Energía Hidráulica.....	9
1.3.2.1 Ventajas de la Energía Hidráulica.....	10
1.3.2.2 Desventajas de la Energía Hidráulica.....	10
1.3.3 Energía Geotérmica.....	10
1.3.4 Energía de la Biomasa.....	11
1.3.4.1 Ventajas.....	11
1.3.4.2 Inconvenientes.....	11
1.3.5 Energía Eólica.....	12

1.3.5.1	Tipos de aerogeneradores.....	12
1.3.5.1.1	Aerogeneradores de eje horizontal.....	13
1.3.5.1.2	Aerogeneradores de eje vertical.....	14
1.3.5.2	Aerogeneradores convencionales de eje horizontal.....	14
1.3.5.2.1	Funcionamiento de un aerogenerador.....	15
1.3.5.3	Velocidad de operación de los aerogeneradores.....	16
1.3.5.3.1	Aerogenerador de velocidad fija.....	17
1.3.5.3.2	Aerogenerador de velocidad variable.....	17
1.4	Sistemas de Generación Eólica.....	18
1.4.1	Generador de CD.....	18
1.4.2	Generador Síncrono.....	19
1.4.3	Generador de inducción.....	19
1.5	Desarrollo de la Energía Eólica en el mundo.....	21
1.6	Desarrollo de la Energía Eólica en Cuba.....	24
1.7	Ventajas y desventajas de la Energía Eólica.....	25
1.7.1	Ventajas.....	26
1.7.2	Desventajas.....	27
1.8	Conclusiones parciales del capítulo.....	27
CAPÍTULO 2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA.....		28
2.1	Introducción al capítulo.....	28
2.2	Par producido en un motor de inducción.....	28
2.3	Deslizamiento del rotor.....	30
2.4	Generador eólico de inducción de velocidad fija.....	31
2.4.1	Formas de operación.....	32

2.4.1.1	Operación en modo de frenado electromagnético.	33
2.4.1.2	Operación en modo de motor.....	33
2.4.1.3	Operación en modo de generador.	34
2.5	Circuito equivalente del motor y generador de inducción trifásico.	34
2.6	Software empleado.	38
2.6.1	MATLAB.....	38
2.6.1.1	Simulink.....	39
2.6.1.2	SimPowerSystems.	39
2.7	Simulación en MATLAB.....	40
2.7.1	Sistema de generación.	41
2.8	Conclusiones parciales del capítulo.	43
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		44
3.1	Introducción.	44
3.2	Resultado de la simulación de velocidad del generador de velocidad fija.	44
3.3	Resultado del comportamiento de la potencia reactiva.	45
3.4	Resultado del comportamiento de la potencia activa.....	46
3.5	Resultado del comportamiento del voltaje trifásico.	46
3.6	Resultado del sistema ante una falla.	47
3.6.1	Comportamiento de la velocidad de los aerogeneradores.	47
3.6.2	Comportamiento de la potencia del sistema.	48
3.6.3	Comportamiento de la potencia reactiva de los aerogeneradores.....	49
3.6.4	Comportamiento del voltaje trifásico ante un cortocircuito.	50
3.7	Conclusiones parciales del capítulo.	51
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		52

Conclusiones.....	52
Recomendaciones.	52
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
ANEXOS	55
Anexo I Parque eólico de Turiguanó.	55

INTRODUCCIÓN

El progresivo agotamiento de los combustibles fósiles unido al cambio climático que el planeta está experimentando en los últimos años ha motivado la investigación de fuentes de energía alternativas. Algunas de ellas como la energía eólica, solar, la energía de la biomasa o la energía geotérmica están teniendo un desarrollo espectacular en los últimos años. La utilización del viento como medio para generar energía con grandes aerogeneradores en la última década ha crecido, debido a que es una fuente inagotable, no contaminante y de libre acceso.

El propósito de la generación de electricidad en Cuba, ha sido siempre satisfacer la demanda de los clientes, respondiendo a las exigencias de los índices de desarrollo económico alcanzados por el país. En los últimos años, el consumo se ha incrementado debido a la revolución energética, algunas inversiones y la paulatina reactivación del país. Más del 50 % de toda la potencia disponible es obtenida del llamado crudo nacional, un combustible más barato que ha permitido reducir la importación de petróleo, aunque al ser más pesado, su impacto en el ambiente debe ser siempre tenido en cuenta. El pronóstico es alcanzar, en los próximos cinco años, que el 90 % de la generación de electricidad utilice el petróleo nacional, teniendo como base el mejoramiento del uso de nuevas tecnologías, que reduzcan los impactos asociados a su uso.

Sin embargo, Cuba también apuesta al desarrollo, a la aplicación de la energía eólica y de otras fuentes renovables de energía, pues estas serán la clave para el futuro de toda la humanidad. Estudios preliminares, muestran oportunidades en los sitios donde no hay red eléctrica, algo que es común en áreas rurales de los países en desarrollo. Miles de sistemas aislados para el bombeo de agua operan en Cuba, pero el uso de pequeños sistemas aislados de energía eólica es limitado y prácticamente no existen.

Se puede afirmar que la energía eólica se encuentra entre las energías con mayor crecimiento dinámico en la actualidad y se sitúa a la vanguardia de las energías renovables. Los planes futuros de la empresa eléctrica cubana es seguir desarrollando estos proyectos y para que los mismos sean viables, deberán ser más competitivos desde el punto de vista económico, disminuyendo sus costos de inversión por kilowatt (kW) eólico instalado.

El uso de la energía renovable, gana protagonismo en la mayoría de los países por razones económicas, el cuidado del medio ambiente, etc. Los resultados de las investigaciones en este sentido tendrán un impacto en la sociedad de manera inmediata. Diversos autores han estudiado modelos matemáticos para los sistemas eólicos, así como la calidad de la energía eléctrica. La carrera de Ingeniería Eléctrica de la UCLV ha desarrollado investigaciones sobre esta materia y con la realización de este trabajo, se pretende evaluar la posibilidad de inserción en proyectos ya existentes, tratando de centrar los esfuerzos fundamentales, en todo lo relacionado con el control de estos sistemas y de poder mejorar determinados índices de funcionamiento. Desde el punto de vista teórico, el trabajo plantea un grupo de ideas y recomendaciones, para la realización de futuros estudios sobre el tema. Apostar por las energías renovables es apostar por el desarrollo.

Situación del problema

Independientemente de los estudios previos realizados sobre los generadores de inducción, los mismos adolecen de una visión desde el punto de vista del control. Otros criterios y estrategias que son abordadas en el campo de la automática podrían enriquecer dichos estudios. Mediante el uso de un software específico se pudiera profundizar en el conocimiento del comportamiento de este sistema.

A partir de lo anterior se enuncia el siguiente problema científico:

¿Cómo contribuir a la profundización del estudio y simulación de un sistema eólico con generador de inducción jaula de ardilla, teniendo en cuenta algunas de las herramientas disponibles en el campo del control?

Objetivo general

Simular el comportamiento del generador eólico con máquina asincrónica ubicado en el parque eólico de Turiguanó para futuras investigaciones y modificaciones en el control de este tipo de máquina y su sincronización con la red.

Objetivos específicos

- 1- Analizar la generación de energía eólica y otras fuentes de energías renovables.
- 2- Caracterizar el generador eólico de inducción jaula de ardilla.
- 3- Simular el generador eólico de inducción jaula de ardilla mediante el Simulink del MATLAB.
- 4- Analizar los resultados obtenidos con las simulaciones.

Hipótesis

La simulación de un sistema eólico con generador de inducción para la producción de energía eléctrica, va a permitir observar el comportamiento de las principales variables y ayudar al estudio futuro para mejorar la sincronización con la red.

Posibles resultados

En Cuba existen generadores eólicos de inducción jaula de ardilla en el parque conectado a la red en Turiguanó, Ciego de Ávila, por lo que mediante su estudio y simulación se puede observar el comportamiento de las principales variables de la máquina, tanto en estado estable como en régimen dinámico, aspecto que será de gran importancia para cualquier estudio futuro relacionado con su operación, mantenimiento y las necesarias mejoras de características como la sincronización con la red.

Organización del informe

El informe de la investigación se estructurará en capitulario, conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

Capitulario

CAPÍTULO I: Se dedicará a la realización del análisis y las principales características de la generación de energía eólica.

CAPÍTULO II: Se hace un análisis del generador de inducción jaula de ardilla y se procede a la simulación del mismo.

CAPÍTULO III: Se dedicará al análisis de los resultados que son obtenidos y se realizará la correspondiente valoración de impacto.

Conclusiones

Recomendaciones

Referencias bibliográficas

Anexos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LA ENERGÍA EÓLICA

1.1 Antecedentes.

En la actualidad, la energía eólica tiene diferentes usos y esto se confirma con el desarrollo reciente que se lleva a cabo para el aprovechamiento en la generación de energía eléctrica. A partir de la segunda guerra mundial, se construyeron varios aerogeneradores de dos y tres palas, avances que fueron incluidos posteriormente en el desarrollo de generadores asincrónicos de corriente alterna. Los primeros sistemas de generación eran bastante estables y sencillos en su operación y en caso de presentar problemas o algún tipo de falla, se desconectaba de la red, no siendo esto lo más adecuado, motivando a nuevos diseños que permitieran estabilizar la red en caso de fallas (Figueredo). Todo esto permitió el avance hacia nuevos sistemas de generación para lograr un mayor control.

Las actuales turbinas eólicas hacen uso de muy pocas aspas, aunque muy largas, para un mejor aprovechamiento del viento. Debido a que estas máquinas son grandes, su rotación es relativamente lenta, pero con el apoyo de un sistema de engranaje se le busca la adecuada solución para generar grandes cantidades de energía. La fabricación de estos sistemas recibe cada día un mayor impulso y se trabaja con perspectiva para que sean más confiables, seguros y eficientes. La nueva tecnología metalúrgica, civil y electrónica permite llevar a cabo un desarrollo de diseño de aerogeneradores de varios megawatt (MW).

En el país se han realizado un grupo de investigaciones con el fin de aprovechar parte del potencial eólico disponible y se tiene en cuenta el incremento acontecido en el empleo de los recursos energéticos renovables. De acuerdo con los estudios y evaluación del potencial eólico cubano, la zona comprendida desde Villa Clara hasta Guantánamo por la costa norte, es la región de más altas velocidades del viento, donde, al menos ocho zonas, fueron identificadas con velocidades medias anuales superiores de 5,7 m/s a 10 m de altura (Morales, 2010). Este resultado ha traído un aumento significativo del número de aerogeneradores en uso.

No obstante, el régimen de viento no es homogéneo y es fuertemente influenciado por condiciones locales, la positiva interrelación entre los vientos alisios y las brisas locales; los eventos meteorológicos estacionales, como los frentes fríos provenientes de Norteamérica, refuerzan el régimen de viento en la costa norte, fundamentalmente en la parte este. Actualmente en América, hay más de 150 000 sistemas de pequeña escala de energía renovable, y este número crece anualmente de una forma considerable (Pérez, 2006).

Se asume hoy la existencia de buenas condiciones para instalar entre 200 y 500 MW en la isla grande (de 5 a 12 %) de la capacidad de generación instalada actualmente por la SEN (Sistema Electroenergético Nacional) en dependencia del tamaño de las turbinas que se empleen.

El uso de la potencia eólica en los cayos de la costa norte, también es promisorio, existe allí excelente régimen de vientos y buenas condiciones para instalar parques eólicos. Téngase en cuenta que estas islas al no estar interconectadas con el sistema nacional, generar allí por métodos tradicionales, incrementa de manera importante los costos.

Implementación de la potencia eólica en Cuba.

En 1999, una pequeña potencia eólica fue conectada al Sistema Electroenergético Nacional. Basado en tres años de evaluación del potencial eólico (de 1993 a 1996), un soporte financiero de ONG's europeas, la UNE (Unión Eléctrica) y el apoyo de la ONG cubana CUBASOLAR, un parque eólico conectado a la red de 2 x 225 kW fue desarrollado y puesto en marcha en mayo de 1999.

La capacidad original era de 1 MW, pero las limitaciones financieras llevaron a que se instalaran dos máquinas españolas ECOTÉCNIA 28/225, con 30 m de altura de torre e incluido 1 MVA de transformador y capacidades de control remoto, que permitirán completar su capacidad original en el futuro. El parque eólico ha suministrado a la red alrededor de 998,5 MWh/año (Figueredo et al., 2010).

Con la experiencia de ingenieros de ECOTÉCNIA, un grupo de expertos cubanos desarrolló la ingeniería, la construcción, el ensamblaje en el terreno y su puesta en marcha. El grupo cubano recibió un entrenamiento básico para la correcta operación de la

instalación. Los datos operacionales de los primeros dos años muestran que las unidades se han comportado como se esperaba, en un régimen de viento con una velocidad media anual de 5,1 m/s a 10 m de altura. Con este régimen medio de viento se alcanzaron factores de capacidad mensuales de 22 %, por lo que la capacidad total instalada de turbinas eólicas en Turiguanó, Ciego de Ávila es de 0,45 MW (Isaac and Leiva, 2010).

Cada vez existen más personas de todo el mundo que están descubriendo que la energía eólica es una alternativa excelente y que económicamente, permite sustituir las extensas líneas eléctricas reduciendo las necesidades de los generadores diesel y evitando a su vez la contaminación.

1.2 Estado del arte.

Se tiene conocimiento de que la primera forma de utilización de la energía del viento para beneficio del hombre fue para impulsar los barcos en el Río Nilo hace más de 5000 años. Más tarde los europeos la usaron para la molienda de granos y para extraer agua en los siglos XVIII y XIX. El primer molino de viento para generar energía eléctrica fue instalado en Estados Unidos en 1890. Hoy en día, grandes plantas de generación eólica están compitiendo con centrales eléctricas en el suministro económico de energía limpia en muchas partes del mundo. Hasta hace poco el tamaño de las turbinas de las instalaciones eólicas eran de 300kW pero nuevas máquinas de 500kW y hasta 1MW de capacidad fueron desarrolladas y están siendo instaladas. Prototipos de turbinas eólicas de algunos cuantos MW están bajo pruebas en algunos países. El mejoramiento de los diseños de las turbinas y las plantas de utilización, han contribuido a la disminución en gran escala de los costos de generación eólica, debido a esto, la energía eólica ha llegado a ser una de las fuentes de energía más rentables (Morález, 2009).

Los nuevos generadores acoplados a las turbinas de viento se diseñan de tal forma, que se elimina la necesidad de complejos mecanismos de engranes, con esto se logra una disminución significativa en costo y peso.

La máquina de inducción se utiliza desde hace muchos años debido a las ventajas que ofrece. La confiabilidad, robustez, bajo costo, poco mantenimiento y alta capacidad para aplicaciones a la intemperie caracterizan a la misma. Este diseño tiene como inconveniente

el no poder producir potencia reactiva, por lo que se le tiene que suministrar, ya sea mediante un banco de capacitores, o directamente de la red (Sánchez, 2008).

Una de las problemáticas de utilizar un aerogenerador es que la velocidad del viento no es constante, por lo que la frecuencia y el voltaje generado tampoco lo serán y aunque se logre un cierto nivel del voltaje generado, la velocidad presente en la turbina sigue afectando la frecuencia, por lo que al transferir esta energía generada a la red o alimentar dispositivos en los cuales la variación de la frecuencia influye, es necesario convertir la frecuencia, a la que opera la línea (Morález, 2009).

Desde el punto de vista ambiental, el viento representa una fuente de energía extremadamente limpia y sustentable, ya que el único impacto ambiental negativo que se le puede atribuir es el ruido y la posible muerte de aves que chocan con las aspas del rotor, aunque estos males son menores si se les compara con otros sistemas hechos por el hombre que interactúan con el medio ambiente. Los nuevos diseños de generadores eólicos presentan menores niveles de ruido y se construyen con aspas más visibles para los pájaros.

La energía eólica se destaca como una de las más prometedoras fuentes de energía a corto plazo. Por eso, muchos países incluyendo Cuba, apuestan a su desarrollo.

1.3 Energías Renovables.

La energía renovable también conocida como energía alternativa o blanda, encierra una serie de fuentes energéticas que en teoría no se agotarían con el paso del tiempo. Entre ellas se encuentran: la energía solar, la geotérmica, la hidráulica, la derivada de la biomasa y la eólica, entre otras.

1.3.1 Energía Solar.

La energía solar es una fuente de energía renovable que se obtiene del sol y con la que se puede generar calor y electricidad (ONEI, 2012). Existen varias maneras de recoger y aprovechar los rayos del sol: la fotovoltaica (que transforma los rayos en electricidad mediante el uso de paneles solares), la fototérmica (que aprovecha el calor a través de los

colectores solares) y la termoeléctrica (que transforma el calor en energía eléctrica de forma indirecta) (Hernández, 2007).

1.3.1.1 Energía Solar fotovoltaica.

Transforma los rayos en electricidad a través de los paneles solares o de las células fotovoltaicas. Los paneles solares, que están fabricados de silicio (el segundo elemento más abundante de que disponemos, después del oxígeno) que, junto con otros materiales, y al ser excitado por la luz solar, permite que se muevan los electrones y se genere una corriente eléctrica directa. Las células fotovoltaicas, por su parte, atrapan los fotones de la luz solar liberando con ello una carga que se convierte en electricidad.

1.3.1.2 Energía Solar fototérmica.

Aprovecha el calor en sí mismo gracias a unos colectores solares que reciben el calor del sol y lo transfieren a un fluido de trabajo. El calor se utiliza entonces para calentar edificios, agua, mover turbinas, secar granos o destruir desechos peligrosos, entre otros usos.

1.3.1.3 Energía termoeléctrica.

Transforma el calor solar en energía eléctrica de una forma indirecta, ya que se trata de una combinación de las dos primeras; se aprovecha la energía solar fototérmica para obtener electricidad. Para ello, utilizan grandes sistemas de espejos móviles que concentran rayos solares en un punto específico calentando así un fluido. Ese fluido luego se aprovecha para producir electricidad mediante un generador.

1.3.2 Energía Hidráulica.

Esta energía también llamada energía hídrica aprovecha la caída de agua desde una cierta altura para generar energía eléctrica. Se aprovecha así la energía cinética de una corriente o salto de agua natural (Pérez, 2006). Para conseguir explotar esa energía se aprovechan los recursos tal y como surgen en la naturaleza (por ejemplo, cataratas, gargantas, etc.) o se

construyen presas. Las instalaciones más comunes hoy en día son las centrales hidroeléctricas.

1.3.2.1 Ventajas de la Energía Hidráulica.

Se trata de un recurso procedente del agua de la lluvia y además, esa agua empleada en el proceso puede volver a utilizarse. La larga vida útil de este tipo de instalaciones las convierte en uno de los recursos renovables más utilizados en la actualidad. Además, ayuda a disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, al servir como sustituto de otras fuentes más contaminantes para producir electricidad. Se calcula que en España una central hidroeléctrica evita la importación anual de unos siete millones de toneladas equivalentes de petróleo.

1.3.2.2 Desventajas de la Energía Hidráulica.

Estas centrales hidroeléctricas requieren de un importante desarrollo de la infraestructura que producirá la electricidad. Como cualquier otra obra civil, genera efectos negativos sobre el entorno durante el período de construcción, tanto que en ocasiones supone la desaparición bajo las aguas del embalse de poblaciones enteras. Pueden ocasionar daños al medio ambiente, ya que modifican el hábitat ecológico de la vegetación del entorno y de los peces y demás especies que viven en el agua.

1.3.3 Energía Geotérmica.

Se le llama energía geotérmica a la que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la tierra. Esta energía se manifiesta por medio de procesos geológicos como volcanes en sus fases póstumas, los géiseres que expulsan agua caliente y las aguas termales. El aprovechamiento óptimo de estos yacimientos se da en calefacción urbana e industrial, como ocurre en Islandia y otros países, en los que existen redes centralizadas de calor, alimentadas con agua de 80 a 90 °C mediante conductos de hormigón en el subsuelo, aislados con lana de vidrio u otros materiales. La conducción se consigue con pendientes

del 5 % y la ayuda de bombas y tanques de reserva para mantener la presión adecuada (Pérez, 2006).

1.3.4 Energía de la Biomasa.

Cantidad de materia viva producida en un área determinada de la superficie terrestre, o por organismos de un tipo específico. El término es utilizado con mayor frecuencia en las discusiones relativas a la energía de biomasa, es decir, al combustible energético que se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. Se conoce como biomasa a toda materia orgánica de origen vegetal o animal y a la obtenida a partir de ésta, mediante transformaciones naturales o artificiales (ONEI, 2012).

1.3.4.1 Ventajas.

- Soluciona los problemas que acarrea la destrucción incontrolada de los residuos.
- Disminuye el riesgo de incendios en los bosques.
- Su uso significa una reducción en el consumo de otras fuentes de energía no renovables, tales como el carbón o el petróleo.

1.3.4.2 Inconvenientes.

- Se corre el riesgo de que, por una falta de control, se lleven a cabo talas excesivas que agoten la masa vegetal de una zona.
- Rendimiento neto muy pequeño, 3 kg de biocombustible equivalen a 1kg de gasolina.
- El alto grado de dispersión de la biomasa da lugar a que, su aprovechamiento no resulte en ocasiones, económicamente rentable.
- El proceso de combustión de la biomasa genera dióxido de carbono, responsable principal del efecto invernadero, aunque en mucha menor medida que los combustibles fósiles.

1.3.5 Energía Eólica.

La primera y necesaria forma de aprovechamiento de la energía producida por el viento ha sido, desde los tiempos más remotos, para la navegación, la cual luego dio otros usos, tales como la molienda de cereales y el bombeo de agua.

La energía eólica es la energía obtenida de la fuerza del viento, es decir, mediante la utilización de la energía cinética generada por las corrientes de aire. Se obtiene a través de unas turbinas eólicas, las que convierten la energía cinética del viento en electricidad por medio de aspas o hélices que hacen girar un eje central, conectado a través de una serie de engranajes (la transmisión) a un generador eléctrico (Sánchez, 2004).

La energía eólica es una forma indirecta de energía solar, puesto que son las diferencias de temperatura y de presión inducidas en la atmósfera por la absorción de la radiación solar las que ponen en movimiento los vientos. Se calcula que un 2 % de la energía solar recibida por la Tierra se convierte en energía cinética de los vientos. Incluso teniendo en cuenta que solo el 10 % de esta energía se encuentra disponible cerca del suelo, el potencial sigue siendo considerable. Por mucho tiempo las aplicaciones de la energía eólica se limitaron a utilidades locales, en regiones aisladas a un nivel de potencia de algunos kW, a algunas decenas de kW, o bien, a un papel de fuente complementaria en la alimentación de las redes eléctricas con niveles de potencia de hasta algunos MW (Sánchez, 2008). Las zonas más favorables para la implantación de grandes generadores eólicos son las regiones costeras y las grandes estepas, donde vientos constantes soplan regularmente.

La energía eólica para la producción de energía eléctrica en sistemas conectados a la red, representa en la actualidad, una fuente energética tecnológicamente madura, de bajo impacto medioambiental y con unos costos de generación totalmente competitivos con las actuales fuentes de producción de energía que configuran la estructura energética.

1.3.5.1 Tipos de aerogeneradores.

Por lo general los aerogeneradores se clasifican en dos grupos, según sea el eje horizontal o vertical. Dentro del primer grupo se pueden distinguir ejes paralelos a la dirección del viento, como los aerogeneradores convencionales (molinos) y perpendiculares a dicha

dirección. En el primer caso, caben dos alternativas según el rotor sea dispuesto en la parte anterior del eje (posición a barlovento) o en la posterior (posición a sotavento). Los de eje vertical se clasifican en rotores por resistencia o por sustentación (Johnson, 2001). En el primer grupo la fuerza motriz utilizada tiene la dirección del viento y en el segundo es perpendicular a la misma.

1.3.5.1.1 Aerogeneradores de eje horizontal.

Estos están compuestos por un rotor, que transmite un movimiento rotacional y un torque que acciona un generador eléctrico. Este grupo ofrece un grupo de ventajas con respecto a las de eje vertical, las cuales son:

- El rendimiento (coeficiente de potencia) es mayor que el rendimiento de los de eje vertical.
- La superficie de la pala es menor que en los modelos de eje vertical para una misma área barrida.
- La velocidad de rotación es más elevada que la de los aerogeneradores Darrieus (eje vertical), por lo que requieren cajas de engranajes con menor relación de multiplicación.
- Las máquinas son más ligeras, soportan esfuerzos menores y son más fáciles de conectar a la red eléctrica, lo que las hace más utilizadas en la generación de energía eléctrica.

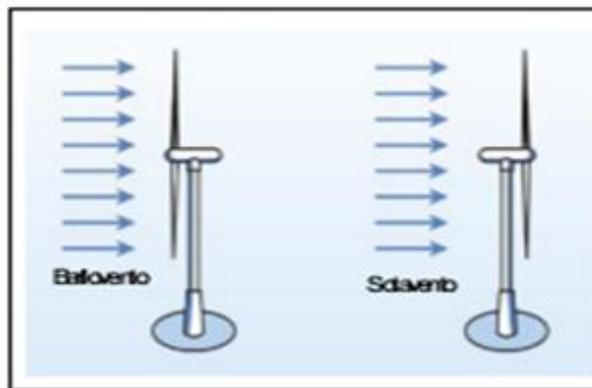


Figura 1.1. Aerogeneradores de eje horizontal.

1.3.5.1.2 Aerogeneradores de eje vertical.

Algunas características de los aerogeneradores de eje vertical son:

- Su simetría vertical hace innecesario el uso de un sistema de orientación.
- La mayoría de las partes de la turbina que requieren mantenimiento están localizados a nivel del suelo.
- No requieren mecanismo para cambio de paso en aplicaciones a velocidad constante.

Dentro de los aerogeneradores de eje vertical se pueden encontrar los de tipos Savonius y los de tipo Darrieus, los cuales se muestran en la Figura 1.2.

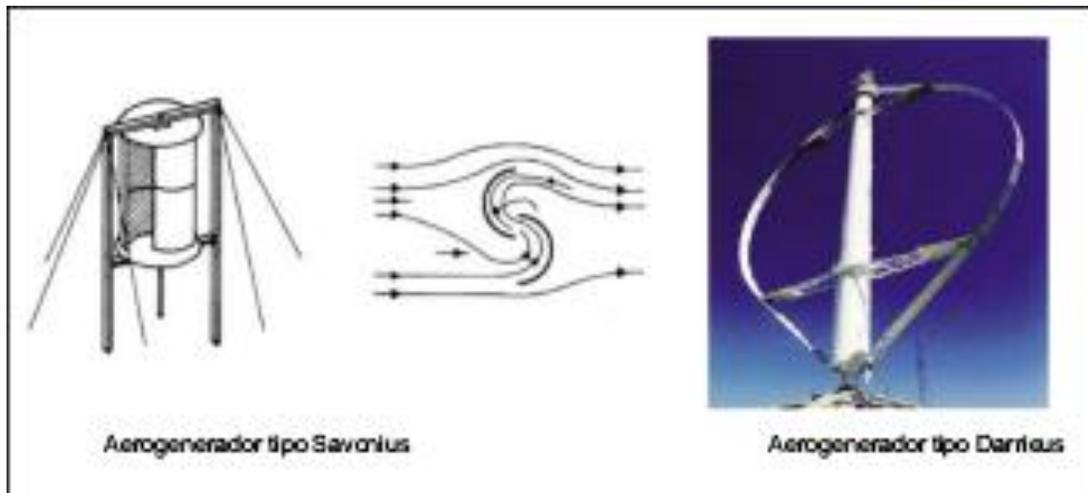


Figura 1.2. Aerogeneradores de eje vertical.

1.3.5.2 Aerogeneradores convencionales de eje horizontal.

Un aerogenerador es un generador eléctrico movido por una turbina accionada por el viento (turbina eólica). Sus precedentes directos son los molinos de viento que se empleaban para la molienda y obtención de harina. En este caso, la energía eólica, en realidad la energía cinética del aire en movimiento, proporciona energía mecánica a un rotor hélice que, a través de un sistema de transmisión mecánico, hace girar el rotor de un generador, normalmente un alternador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica (Cristancho, 2007).

Existen diferentes tipos de aerogeneradores, dependiendo de su potencia, la disposición de su eje de rotación, el tipo de generador, etc. Los aerogeneradores pueden trabajar de manera aislada o agrupados en parques eólicos o plantas de generación eólica, distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de las palas.

Para aportar energía a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sistema de sincronización para que la frecuencia de la corriente generada se mantenga perfectamente sincronizada con la frecuencia de la red. Ya en la primera mitad del siglo XX, la generación de energía eléctrica con rotores eólicos fue bastante popular en casas aisladas situadas en zonas rurales.

En Europa se distingue claramente un modelo centro-europeo, donde los aerogeneradores llegan a ubicarse en pequeñas agrupaciones en las cercanías de las ciudades alemanas y danesas; además un modelo español, donde los aerogeneradores forman agrupaciones (a veces de gran tamaño) en las zonas montañosas donde el viento es frecuente, normalmente alejadas de los núcleos de población.

La energía eólica se está volviendo más popular en la actualidad, al haber demostrado la viabilidad industrial, nació como búsqueda de una diversificación en el abanico de generación eléctrica ante un crecimiento de la demanda y una situación geopolítica cada vez más complicada en el ámbito de los combustibles tradicionales (Burton et al., 2001).

1.3.5.2.1 Funcionamiento de un aerogenerador.

El aerogenerador consta de varias partes:

Palas del rotor: Es donde se produce el movimiento rotatorio debido al viento.

Eje: Encargado de transmitir el movimiento rotatorio.

Caja de engranajes o Multiplicadores: Encargados de cambiar la frecuencia de giro del eje a otra menor o mayor según dependa el caso para entregarle al generador una frecuencia apropiada para que este funcione.

Generador: Es donde el movimiento mecánico del rotor se transforma en energía eléctrica.

Además de estos componentes básicos se requieren otros componentes para el funcionamiento eficiente y correcto del aerogenerador en base a la calidad de servicio de la energía eléctrica, alguno de ellos son:

Controlador electrónico: Permite el control de la correcta orientación de las palas del rotor, también en caso de cualquier contingencia como sobrecalentamiento del aerogenerador, lo detiene.

Unidad de refrigeración: Encargada de mantener al generador a una temperatura prudente.

Anemómetro y la Veleta: Cuya función está dedicada a calcular la velocidad del viento y la dirección de este respectivamente. Están conectadas al controlador electrónico quien procesa estas señales adecuadamente.



Figura 1.3. Partes de un aerogenerador.

1.3.5.3 Velocidad de operación de los aerogeneradores.

Los aerogeneradores utilizados en los sistemas eléctricos de potencia pueden ser divididos en dos grandes grupos: de velocidad fija y de velocidad variable (Blaabjerg and Chen).

1.3.5.3.1 Aerogenerador de velocidad fija.

Estas máquinas están equipadas con motores de inducción (jaula de ardilla o rotor bobinado) y están directamente conectados a la red a través de un arrancador y un banco de capacitores para mejorar el factor de potencia.

Están diseñadas para obtener la máxima eficiencia para una velocidad de viento determinada. Con la intención de incrementar la potencia estos generadores generalmente se diseñan con devanados de diferentes números de polos, uno para operar a bajas velocidades (típicamente 8 polos) y el otro para medias y altas velocidades (típicamente 4-6 polos).

Estos diseños tienen como ventaja su simplicidad, robustez y fiabilidad, sin embargo presentan desventajas de pulsaciones de la potencia provocada por el gradiente del viento y el consumo de potencia reactiva del generador de inducción.

1.3.5.3.2 Aerogenerador de velocidad variable.

Durante los últimos años la potencia que se instala con este tipo de tecnología ha tenido el dominio sobre los de velocidad fija. Estos aerogeneradores están diseñados para obtener la máxima eficiencia aerodinámica dentro de la zona de control.

La solución más adecuada para la operación a velocidad variable, consiste en el uso de un cambiador de frecuencia entre el generador eléctrico y la red. El avance de los semiconductores de potencia, ha contribuido enormemente al desarrollo eólico de los sistemas de velocidad variable. Los generadores eléctricos que se utilizan habitualmente son: generador de inducción con rotor bobinado o jaula de ardilla y generador sincrónico con devanado de excitación o de imanes permanentes. Todos ellos requieren del uso de un convertidor electrónico de potencia apropiado pudiéndose incluso utilizar diferentes topologías en una misma máquina. No obstante el más utilizado en la actualidad es el generador de inducción de doble alimentación con convertidor de frecuencia rotórico y el generador sincrónico, bien con devanado de excitación o con imanes permanentes, con convertidor de frecuencia total.

1.4 Sistemas de Generación Eólica.

La generación eólica es un sistema complicado que para su estudio y realización incluye especialidades en Ingeniería Mecánica, Aerodinámica, Eléctrica, Electrónica y Control. Actualmente se utilizan un grupo de aerogeneradores que para su operación utilizan un generador de CD (corriente directa), un generador síncrono y un generador de inducción jaula de ardilla.

1.4.1 Generador de CD.

El generador clásico de CD consiste de un devanado denominado de armadura en el rotor, en donde se induce un voltaje por efecto del movimiento, y del devanado de campo que está en el estator y se excita con CD (Hernández, 2007).

Una de las ventajas de la máquina de CD es que se puede trabajar como generador y como motor sin hacer ninguna modificación, lo cual implica que la construcción es la misma, es decir que la única diferencia es la dirección del flujo de potencia.

Este tipo de generador basa su funcionamiento en el principio de inducción electromagnética de Faraday, la cual establece que si hacemos girar una espira en un campo magnético se produce una fem inducida en sus conductores. Conforme gira la espira se produce una fem en los terminales de la misma, esta tensión aparece entre las escobillas y por consecuencia se transmite a la carga. Existen dos tipos de generadores de CD empleados en aerogeneradores, uno utiliza imanes permanentes para generar el campo y el otro utiliza un devanado de excitación. Los últimos necesitan energía de corriente directa para el flujo de campo de excitación. Por otra parte, los imanes permanentes no consumen potencia para generar el flujo del campo. Para el mismo tamaño de armadura, un generador de imanes permanentes es más eficiente que un generador con devanado de campo. Si el devanado de campo es conectado a través de los terminales de salida de la armadura, se le conoce como excitación en paralelo. Si la corriente de campo es controlada separadamente del voltaje de armadura, es llamado de excitación separada (Morález, 2009).

1.4.2 Generador Síncrono.

Es un tipo de máquina eléctrica rotativa capaz de transformar energía mecánica (en forma de rotación) en energía eléctrica. Su principio de funcionamiento consiste en la excitación de flujo en el rotor. El generador síncrono está compuesto principalmente de una parte móvil o rotor y de una parte fija o estator (Hernández, 2007).

En el generador síncrono el devanado de campo se excita con corriente directa, a través de las escobillas, que descansan sobre los anillos deslizantes o colectores. El flujo del campo puede ser suministrado por imanes permanentes (Hansen et al., 2001).

Cuando un generador síncrono suministra energía eléctrica a una carga la corriente de la armadura crea una onda de flujo magnético en el entrehierro, que gira a velocidad síncrona. Este flujo reacciona con el flujo creado por la corriente del campo y se provoca un par electromagnético. En el caso del generador este par se opone al giro, el rotor y el impulso de las turbinas debe suministrar el par mecánico. Este par electromecánico es el mecanismo mediante el cual el generador síncrono convierte la energía mecánica en energía eléctrica (Sánchez, 2001).

La característica fundamental de las máquinas síncronas es que en estado estable la velocidad del rotor es siempre proporcional a la velocidad de la frecuencia de inducción. Si la máquina síncrona opera como generador, la frecuencia es determinada por la velocidad del rotor. Si la red incluye otros generadores, la red será mucho más fuerte, y forzará por lo tanto al generador síncrono a girar a la velocidad síncrona de la red. Cambios en la carga causarán que el rotor de la máquina síncrona se adelante o se retrase respecto al campo magnético del estator. Si una turbina eólica usa un generador síncrono al conectarse directamente a la red, esta turbina necesariamente se volverá una máquina de velocidad constante (Longatt, 2008).

1.4.3 Generador de inducción.

La forma más simple del generador de CA (corriente alterna) frecuentemente utilizado en las turbinas eólicas es el generador de inducción. El generador de inducción depende de una fuente externa de voltaje para producir un campo magnético en el estator, lo que significa

que este dispositivo consume potencia reactiva para producir potencia activa. La corriente en el rotor es inducida por la velocidad diferencial de los devanados del rotor con respecto al giro del campo del estator. La forma más simple del generador de inducción es el de jaula de ardilla, en el cual el rotor está formado por barras de cobre soldadas, o fundidas en cobre, y empotradas en un rotor cilíndrico de hierro suave. Existen además generadores de inducción con rotores devanados, en donde las corrientes del rotor son inducidas en los devanados de aluminio o cobre. Cuando los devanados del rotor son accesibles a través de anillos deslizantes, una resistencia variable puede ser insertada. Esto puede controlar el par eléctrico y el porcentaje de deslizamiento. Alternativamente, la resistencia externa puede ser sustituida por un módulo de electrónica de potencia, permitiendo así la inyección de corrientes de la frecuencia apropiada en los devanados del rotor (Acevedo, 2008).

Existen tres tipos de generadores eólicos de inducción:

Generador de inducción convencional jaula de ardilla conectado directamente a la red

Estas máquinas tienen un sistema de engranajes para combinar la velocidad rotacional de las aspas con la del generador. La potencia mecánica puede ser regulada a través del comportamiento aerodinámico de las aspas o con el control del ángulo de posición de las mismas.

Generador de inducción de rotor devanado

En estas máquinas el sistema de engranajes acopla el generador eléctrico con el eje de la turbina. Solo tienen control del grado de inclinación de las aspas para maximizar la captura de energía y el control de la velocidad de la turbina, dentro del rango del generador y del pequeño rango de operación de la velocidad variable (por ejemplo 10 % de la velocidad del generador síncrono).

Generador de inducción doblemente alimentado

Es esencialmente una máquina de inducción de rotor devanado y con excitación de frecuencia variable en el circuito del rotor, incorporando el control de la corriente del rotor a través de convertidores de potencia. El convertidor de potencia del circuito del rotor puede estar en el cuarto cuadrante, permitiendo un control independiente del flujo real y reactivo en cualquier dirección (del rotor a la red o de la red al rotor), o limitando el flujo de potencia real (de la red al rotor).

1.5 Desarrollo de la Energía Eólica en el mundo.

La energía eólica es desde hace años la fuente de energía con el crecimiento más dinámico del mundo, tendencia que se fortalece. En el 2005, la nueva capacidad instalada en todo el mundo fue de 11 769 MW, lo cual representa un 43,4% de crecimiento con respecto a los 8 207 MW emplazados el año anterior, estableciendo una nueva marca. El valor de los nuevos equipos instalados supera los doce mil millones de euros. Al final del 2005 la capacidad total instalada de generación de electricidad eólica a nivel mundial llegó a 59 322 MW, lo que representó un incremento del 25% en solo un año (Cubasolar, 2007).

El líder en términos de nuevas instalaciones durante el 2005 fue Estados Unidos, con 2 431 MW, seguido de cinco países con gran desarrollo eólico: Alemania (1 808 MW), España (1 764 MW), India (1 430 MW), Portugal (500 MW) y China (498 MW).

Los países con las más altas capacidades totales instaladas son Alemania, España, Estados Unidos, India y Dinamarca. Por tanto, la India ha desplazado a Dinamarca del cuarto lugar en el mercado eólico mundial. Otro grupo de países, que incluye a Italia, el Reino Unido, los Países Bajos, China, Japón y Portugal, ha rebasado ya los 1 000 MW de capacidad instalada cada uno.

Alemania es el país líder del mundo en energía eólica con 20 062 MW instalados, datos que fueron establecidos a partir del 2007. El desarrollo que posee la energía eólica en Latinoamérica está en sus comienzos, por lo que se está logrando un aumento considerable en la capacidad instalada por varios países (Morález, 2009).

Al cierre del 2005, Europa es el continente de mayor capacidad instalada, con 40 500 MW y 69% del total mundial. En este año la capacidad europea de energía eólica creció en 18%, de modo que ese continente recibe ahora de la fuente eólica casi 3% de la electricidad que consume, con lo que ha alcanzado, con cinco años de adelanto, la meta de 40 000 MW de energía eólica prevista para el 2010 por la Comisión Europea. Para ese año, el aporte de la energía eólica en la reducción de las emisiones europeas de gases de efecto invernadero cubrió un tercio de los compromisos de la Unión Europea con el Protocolo de Kyoto (Amenedo et al., 2003).

Tabla 1.1. Comparación entre diferentes países que aprovechan la energía eólica.

Ranking 2007	País	Total de capacidad instalada a final de 2007 [MW]	Capacidad adicional en 2007 (Diferencia entre 2007-2006) [MW]	Promedio de crecimiento 2007 [%]	Ranking 2006
1	Alemania	22.247,4	1625,4	7,9	1
2	USA	16.818,8	5215,8	45,0	3
3	España	15.145,1	3515,1	30,2	2
4	India	7.850,0	1580,0	25,2	4
5	China	5.899,0	3300,0	127,0	6
6	Dinamarca	3.125,0	-11,0	-0,4	5
7	Italia	2.726,1	602,7	28,4	7
8	Francia	2.455,0	888,0	56,7	10
9	Reino Unido	2.389,0	426,2	21,7	8
10	Portugal	2.130,0	414,0	24,1	9
11	Canadá	1.846,0	386,0	26,4	12
12	Holanda	1.747,0	188,0	12,1	11
13	Japón	1.538,0	229,0	17,5	13
14	Austria	981,5	17,0	1,8	14
15	Grecia	873,3	115,7	15,3	16
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31	México	86,5	0,0	0,0	27
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	Total	93.836,1	19682,8	26,5	

Para finales del 2005 casi un cuarto de la nueva capacidad instalada correspondió a Norteamérica, que creció 37% durante el 2005. En ese período el crecimiento de los Estados Unidos fue el mayor del mundo y el de Canadá alcanzó la impresionante cifra de 53%. Asia también ha experimentado un fuerte crecimiento de la capacidad instalada, con

49%, y cuenta ahora con 7 135 MW de origen eólico. El mayor incremento lo registró la India, actualmente con un total de 4 430 MW. El mercado chino duplicó su crecimiento durante el 2005 con respecto al año anterior mediante la instalación de 500 MW. Esto llevó la capacidad total de China a 1 260 MW. La nueva Ley de Energía Renovable, que entró en vigor en enero de 2006, debe darle un impulso aún mayor al crecimiento de la energía eólica China quien desde el 2010 alcanzó una capacidad instalada de 5 000 MW (Patel, 1999).

El mercado australiano casi se duplicó en el 2005 con 328 MW de nueva capacidad instalada, lo que elevó el total hasta 708 MW. Se espera que los incentivos establecidos por el gobierno nacional y los gobiernos estatales impulsen aún más este crecimiento. Por el contrario, Nueva Zelanda y las islas del Pacífico no aumentaron sus instalaciones de energía eólica de manera significativa.

El aún incipiente mercado de África y el Medio Oriente duplicó la cifra de nueva capacidad instalada con respecto al 2004. Egipto, que creció de 145 a 230 MW; y Marruecos, de 54 a 64 MW, fueron los países responsables del crecimiento en el continente.

Durante el 2004 en Latinoamérica y el Caribe se instalaron 49 MW; sin embargo, el crecimiento de la capacidad instalada en la región fue muy bajo durante el 2005. A los 230 MW instalados hasta el 2004 solo se le sumaron 6 MW, para un incremento inferior a 3%, el menor de todas las regiones del mundo.

Durante años, los parques eólicos se construyeron tierra adentro o en lugares cercanos a la costa, pero sin embargo, el primer parque eólico costa afuera fue instalado en 1991 en aguas de 3 a 5 m de profundidad, a 1,5 km de las costas de Dinamarca. Este parque consta de once máquinas de 450 kW, fijadas al fondo por cimentaciones de gravedad que se mantienen en posición solo por su propio peso. Desde entonces han sido instalados parques eólicos costa afuera en Holanda, Dinamarca, Suecia, Reino Unido e Irlanda. Si a finales del 2001 solo se habían instalado 80 MW costa afuera en todo el mundo, en el 2005 esa cifra alcanzó los 774 MW, y se esperaba para el 2006 más de 1 800 MW (Hernández, 2007).

Dinamarca se propone instalar 4 000 MW en este tipo de parques antes del 2030, lo que le permitirá proveerse de la mitad de la energía eléctrica necesaria a partir de fuentes renovables. Este tipo de desarrollo se ve favorecido por la escasez de terrenos disponibles

para nuevos parques eólicos en muchas áreas del densamente poblado norte de Europa, así como por el mínimo impacto visual y el poco ruido que los parques costa afuera producen en las zonas habitadas. Otro aspecto favorable es el incremento prácticamente ilimitado de las potencias de los aerogeneradores que se pueden instalar, además de su mayor rendimiento, pues allí los vientos son más sostenidos y menos turbulentos. Todo ello debe compensar a largo plazo sus mayores costos de inversión y mantenimiento, unas dos veces superiores a los de los parques instalados en tierra. La subregión del Caribe, donde numerosos países tienen pequeñas extensiones territoriales y elevadas densidades de población, podría ser una zona de interés para un estudio exploratorio con vistas al desarrollo de parques eólicos costa afuera (Patel, 1999). Se piensa que la energía eólica podría suministrar dentro de 20 años más del 10% de la electricidad mundial, y a largo plazo puede superar a la energía hidráulica, que actualmente suministra el 23% de la electricidad mundial.

1.6 Desarrollo de la Energía Eólica en Cuba.

En Cuba a partir de la Revolución Energética se dieron pasos firmes para el desarrollo de energía eólica y se tiene el propósito de generar para el año 2030, al menos un 10 % de energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

La isla en los últimos años apuesta por el desarrollo eólico y las energías renovables en general, por lo que se pretende aumentar el uso de la potencia eólica, que de menos de 0,5 MW de capacidad instalada en el año 2005 alcanzó en el 2010 la cifra de casi 12 MW (Cubasolar, 2007).

De acuerdo con la Asociación Mundial de Energía Eólica, Cuba ocupaba al finalizar 2007, el lugar 61 en potencia eólica instalada. El primer parque eólico cubano se yergue como firme demostración de las potencialidades del viento en el archipiélago para producir electricidad. Este primer parque eólico instalado en Cuba fue en el año 1999 en el pueblo de Turiguanó perteneciente al municipio Morón de la provincia de Ciego de Ávila, con potencia nominal total de 0.45 MW, está compuesto por 2 máquinas ECOTÉCNIA 28/225 con tres palas de paso fijo, con potencia nominal de 225 kW cada una.

El segundo parque eólico fue instalado en la región de Los Canarreos perteneciente al Municipio Especial de la Isla de la Juventud. Este parque con potencia nominal total de 1.65 MW, está compuesto por 6 aerogeneradores de potencial nominal unitaria de 275 kW, fabricados en Francia por la Compañía VERGNET. Este parque comenzó su funcionamiento en febrero del 2007.

El tercer parque eólico instalado fue Gibara-1 en la región de Gibara, perteneciente a la provincia de Holguín, con potencia nominal total de 5.1 MW. Está compuesto por 6 máquinas tripalas de paso variable con potencia nominal unitaria de 850 kW, fabricados en España por la Compañía GAMESA Eólica. Este parque entró en funcionamiento en febrero del año 2008.

Se avanza rápidamente en los estudios previos de prospección del viento para conocer su real potencialidad, así como en la instalación de parques eólicos para probar en una escala limitada las más importantes tecnologías de aerogeneradores que hoy se conocen. Uno de los logros iniciales de este programa es la confección del primer mapa eólico de Cuba con fines energéticos. Los resultados que se obtengan de la medición del viento, más las experiencias que se adquieran en esos primeros parques abrirán el camino hacia un desarrollo superior. Ya se instalan con fines de prospección eólica cien estaciones anemométricas a 50 m de altura en diferentes puntos del país, lo cual en breve tiempo permitirá conocer las posibilidades reales de instalación de parques eólicos en esos lugares. Se trabaja también en la preparación de personal técnico y de operación, por medio de cursos desarrollados al efecto e impartidos por especialistas nacionales.

Cada vez se encuentra más activo el avance hacia el desarrollo sostenible. Pero llegar a esa meta requerirá de transformaciones globales que garanticen el acceso de todos los seres humanos a fuentes y tecnologías energéticas, pero siempre considerando el respeto ambiental.

1.7 Ventajas y desventajas de la Energía Eólica.

El uso de la energía eólica trae consigo un grupo de ventajas pero también ciertas desventajas las cuales se describen a continuación.

1.7.1 Ventajas.

- ✚ Es un tipo de energía renovable ya que tiene su origen en procesos atmosféricos debidos a la energía que llega a la Tierra procedente del Sol.
- ✚ Es una energía limpia ya que no produce emisiones atmosféricas ni residuos contaminantes.
- ✚ No requiere una combustión que produzca dióxido de carbono (CO₂), por lo que no contribuye al incremento del efecto invernadero ni al cambio climático.
- ✚ Puede instalarse en espacios no aptos para otros fines, por ejemplo en zonas desérticas, próximas a la costa, en laderas áridas y muy empinadas para ser cultivables.
- ✚ Puede convivir con otros usos del suelo, por ejemplo prados para uso ganadero o cultivos bajos.
- ✚ Se trata de instalaciones móviles, su desmantelación permite recuperar totalmente la zona.
- ✚ Su instalación es rápida, entre 6 meses y un año.
- ✚ Su utilización combinada con otros tipos de energía, habitualmente la solar, permite la auto-alimentación de viviendas, terminando así con la necesidad de conectarse a redes de suministro, pudiendo lograrse autonomías superiores a las 82 horas, sin alimentación desde ninguno de los 2 sistemas.
- ✚ La situación actual permite cubrir la demanda de energía debido a la múltiple situación de los parques eólicos, compensando la baja producción de unos por falta de viento con la alta producción en las zonas de viento.
- ✚ Posibilidad de construir parques eólicos en el mar, donde el viento es más fuerte, más constante y el impacto social es menor, aunque aumentan los costos de instalación y mantenimiento.

1.7.2 Desventajas.

- ❖ Para evacuar la electricidad producida por cada parque eólico (que suelen estar situados además en parajes naturales apartados) es necesario construir unas líneas de alta tensión que sean capaces de conducir el máximo de electricidad que pueda producir la instalación.
- ❖ Impacto visual: su instalación genera una alta modificación del paisaje.
- ❖ Impacto sobre la avifauna: principalmente por el choque de las aves contra las palas, efectos desconocidos sobre la modificación de los comportamientos habituales de migración y anidación.
- ❖ Impacto sonoro: el roce de las palas con el aire produce un ruido constante, la casa más cercana deberá estar al menos a 200 m.

1.8 Conclusiones parciales del capítulo.

El estudio realizado permite asegurar que la energía producida por los aerogeneradores compite con las fuentes convencionales en la generación de electricidad. Los parques eólicos son capaces de ofrecer una mayor fiabilidad para sistemas alejados de la red eléctrica, por tanto se hace viable aprovechar estos recursos en función del mejoramiento del bienestar de la comunidad. Como parte del desarrollo de las energías renovables en nuestro país, se intensifican los estudios y se realizan nuevas inversiones lo que permitirá incrementar la potencia instalada de manera considerable. Las energías renovables son capaces de ofrecer un aporte importante al sistema energético del país, por eso Cuba apuesta al uso acelerado de la energía eólica, además de que el empleo de estas fuentes de energías, da cumplimiento a algunos de los lineamientos de la política económica establecida por el país para los próximos años.

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA

2.1 Introducción al capítulo.

Existen principalmente dos máquinas de corriente alterna: las máquinas sincrónicas y las asincrónicas (inducción). Las máquinas sincrónicas son motores y generadores cuya corriente de campo magnético se suministra por medio de una fuente de corriente directa externa, mientras que las máquinas de inducción son motores y generadores cuya corriente de campo magnético se suministra por medio de inducción magnética (acción transformadora) en sus devanados de campo.

Uno de los fundamentos de las máquinas de corriente alterna establece que, si por los devanados de la armadura circula un sistema trifásico de corrientes de igual magnitud y desfasados 120° , se producirá un campo magnético giratorio de magnitud constante. En las máquinas de corriente alterna el campo magnético creado por los conductores del rotor es giratorio e induce en los devanados de la armadura, que se encuentran en el estator, un sistema trifásico de voltajes de corriente alterna. Mutuamente, un sistema trifásico de corrientes que circula por los arrollamientos de armadura produce un campo magnético giratorio, el cual interactúa con el campo magnético del rotor y se produce un par en el eje de la máquina (Sánchez, 2008). Estos efectos corresponden respectivamente, a la acción generadora y motora.

Una máquina eléctrica puede trabajar como motor y como generador. Un generador es una máquina que transforma potencia mecánica en potencia eléctrica. La máquina de inducción bajo ciertas condiciones trabaja como generador, es decir, la potencia mecánica que hace girar a su rotor se transforma en potencia eléctrica.

2.2 Par producido en un motor de inducción.

Si se aplica al estator un sistema trifásico de voltajes de igual magnitud y desfasados 120° , por sus devanados circulará un sistema trifásico de corrientes. Estas corrientes producen un

campo magnético en el estator B_s , cuya velocidad de rotación está dada por (Chapman, 2000):

$$n_{sinc} = \frac{120f_1}{P} \quad (2.1)$$

donde f_1 es la frecuencia del sistema de alimentación en Hz, P es el número de polos, n_{sinc} es la velocidad de rotación del campo magnético en rpm, o velocidad síncrona como también se le conoce. Este campo magnético alcanzará a las barras del rotor e inducirá un voltaje en ellas, el voltaje inducido en las barras del rotor está dado por:

$$e_{ind} = v * B * l \quad (2.2)$$

donde v = velocidad de la barra, relativa al campo magnético.

B = vector de densidad del flujo magnético.

l = longitud del conductor en el campo magnético.

Este voltaje inducido genera una corriente que circula por los devanados del rotor y la corriente de los devanados del rotor produce un campo magnético B_R en el mismo. La interacción de estos campos magnéticos produce el par electromagnético de la máquina. El par producido en la máquina está dado por:

$$\tau_{ind} = k B_R * B_s \quad (2.3)$$

donde k es una constante que depende de la construcción de la máquina y como resultado del par producido, la máquina girará y se acelerará.

La velocidad del motor tiene un límite finito, si el rotor del motor de inducción llegara a girar a la velocidad síncrona, sus barras estarían estacionarias con respecto al campo magnético y no se induciría voltaje. Si e_{ind} fuera igual a cero, no habría corriente en el rotor y por lo tanto, tampoco habría campo magnético, por lo que sin campo magnético en el rotor el par producido sería cero y por la fricción el rotor se frenaría. En fin un motor de inducción puede girar a velocidades cercanas a la síncrona, pero nunca alcanzará exactamente esta velocidad (Chapman, 2000).

2.3 Deslizamiento del rotor.

El voltaje inducido en los devanados del rotor depende de la velocidad relativa del rotor con respecto a los campos magnéticos. Como el comportamiento de la máquina de inducción depende de los voltajes y las corrientes del rotor, es útil hablar en términos de la velocidad relativa entre el rotor y los campos magnéticos, en general se utilizan dos términos para esto: la velocidad de deslizamiento y el deslizamiento (Cortéz and Gutiérrez, 2011).

La velocidad de deslizamiento es la diferencia entre la velocidad síncrona y la velocidad del rotor:

$$\omega_{des} = \omega_{sinc} - \omega_m \quad (3.1)$$

y para el deslizamiento:

$$S = \frac{\omega_{des}}{\omega_{sinc}} * 100\% = \frac{\omega_{sinc} - \omega_m}{\omega_{sinc}} * 100\% \quad (3.2)$$

donde ω_{des} es la velocidad de deslizamiento en rad/s, ω_{sinc} es la velocidad del campo magnético en rad/s y ω_m es la velocidad del rotor en rad/s.

Es posible expresar la velocidad mecánica del eje del rotor en función de la velocidad síncrona y el deslizamiento como:

$$\omega_m = 1 - s \omega_{sinc} \quad (3.3)$$

La frecuencia del rotor es directamente proporcional a la diferencia de la velocidad del campo magnético del estator ω_{sinc} y la velocidad del rotor ω_m . La frecuencia del rotor está dada por:

$$f_2 = s f_1 \quad (3.4)$$

2.4 Generador eólico de inducción de velocidad fija.

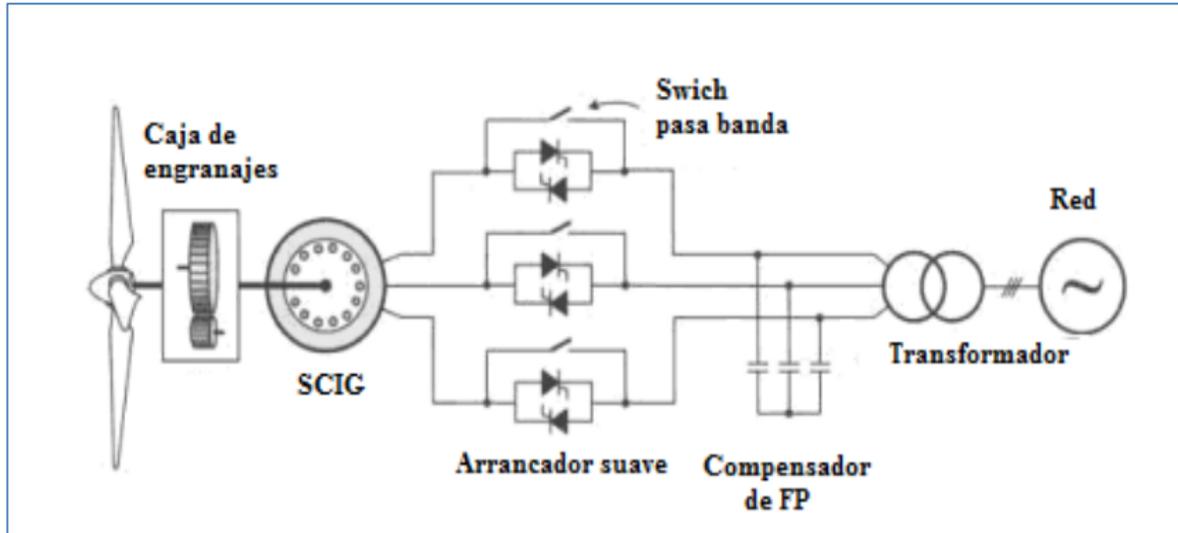


Figura 2.1. Configuración de un generador de velocidad fija.

Una configuración típica que usa un generador de inducción es la de velocidad fija la cual se puede ver en la Figura 2.1. La turbina es de eje horizontal y para limitar la corriente de inrush (corriente de arranque, hasta 10 veces la corriente nominal), se usa un arrancador suave. El arrancador suave es un control de voltaje trifásico. El control está compuesto por tres pares de tiristores bidireccionales, y el ángulo de disparo de los tiristores se ajusta gradualmente, de forma que los voltajes inyectados al generador eleven el voltaje hasta el valor nominal de la red eléctrica. Una vez que el voltaje del generador es igual al de la red, el generador se conecta directamente a la red eléctrica.

Este tipo de máquina se encuentra conectada directamente a la red a través de un sistema de caja de engranajes (amplificadora) entre los sistemas de ejes de alta y baja velocidad. Como el generador de inducción no tiene un circuito independiente para su excitación, no puede producir potencia reactiva, de hecho, él consume potencia reactiva y para mantener el campo magnético de su estator necesita estar conectado permanentemente a una fuente exterior de potencia reactiva y esta fuente debe también controlar el voltaje en los terminales del generador. La gran ventaja que posee el generador de inducción es su simplicidad, ya que este no necesita un circuito de campo separado y no debe estar trabajando continuamente a una velocidad fija. El hecho de que no requiera de una

regulación precisa, hace de este generador una buena elección para molinos de viento (Rodríguez et al., 2012).

2.4.1 Formas de operación.

Las máquinas de inducción pueden operar de tres maneras distintas, ya sea como freno, como motor o como generador. La siguiente figura muestra la curva Par-Velocidad de la máquina de inducción. Esta indica hasta el punto de par máximo que es proporcional al deslizamiento, es decir, a medida que disminuye el deslizamiento disminuye el par. Cuando el deslizamiento es cero, a la velocidad síncrona, el par es cero (Cortéz and Gutiérrez, 2011).

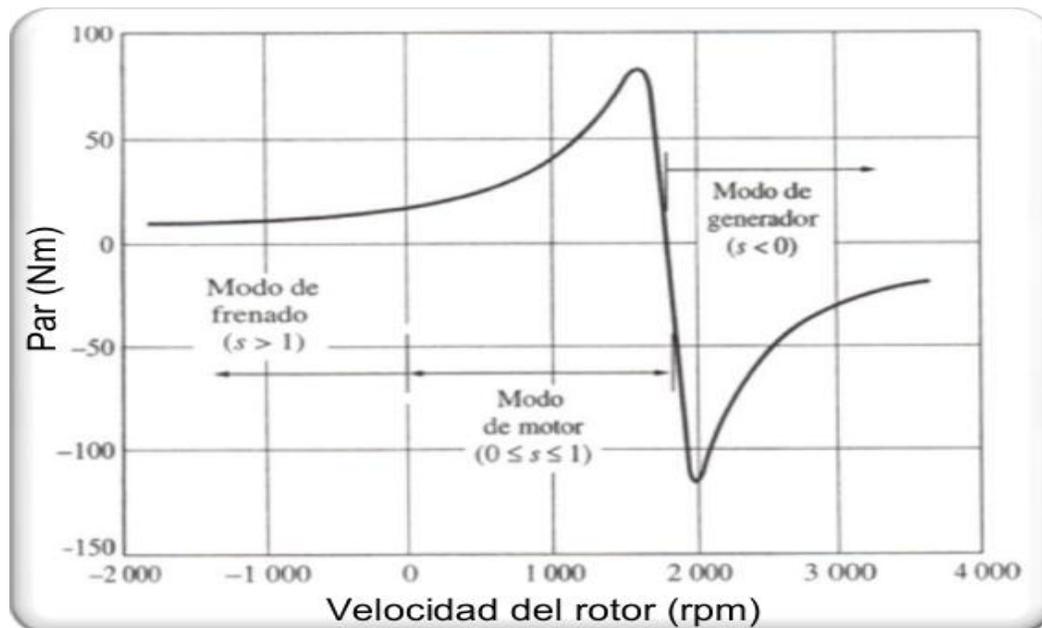


Figura 2.2. Curva Par-Velocidad de la máquina de inducción.

Si una máquina de inducción se impulsa a una velocidad superior a la síncrona, es decir, un deslizamiento negativo, el motor recibe potencia mecánica en lugar de entregarla y se tiene la operación de generador. La transición del modo motor al modo generador es función del deslizamiento.

2.4.1.1 Operación en modo de frenado electromagnético.

Este tipo de operación se produce para deslizamientos superiores a uno como se aprecia en la Figura 2.2, lo que indica que la velocidad del rotor es negativa o contraria a la de sincronismo. En esta condición el rotor gira en sentido contrario al campo giratorio recibiendo energía de la red y energía mecánica por el eje (Fraile, 2008). Esto trae consigo que la potencia mecánica interna sea negativa y la potencia de entrehierro sea positiva. Por lo que en el entrehierro el flujo de potencia es como en un motor, positiva del estator hacia el rotor; pero la potencia mecánica interna es negativa o contraria a como es en un motor, la potencia viene del eje hacia el rotor tal como sucede con un generador. El resultado de que en parte funcione como motor absorbiendo potencia eléctrica del estator y como generador absorbiendo potencia mecánica por el eje trae como consecuencia que al sumarse las potencias, la energía se disipe en forma de pérdidas por efecto Joule (Pozueta, 2008). En la parte superior de la zona de freno en la Figura 2.2 se puede apreciar que el sentido de las velocidades en la máquina es contrario.

2.4.1.2 Operación en modo de motor.

Este régimen de operación es el más característico de las máquinas de inducción, ocurre cuando el deslizamiento se encuentra en un intervalo entre uno y cero; lo que indica que la velocidad del rotor se encuentra entre cero y la de sincronismo. Por lo tanto funcionando como motor, la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y menor que ésta a su vez; esto se puede observar claramente en la Figura 2.2 (Pozueta, 2008), (Fraile, 2008).

Por convención en el balance de potencias se adopta el criterio de signos positivos para cuando la máquina opera en el régimen de motor. Por ello la potencia mecánica interna y la potencia de entrehierro son positivas, lo que quiere decir que la potencia eléctrica se absorbe del estator y pasa por el entrehierro en dirección al rotor convirtiéndose en energía mecánica.

2.4.1.3 Operación en modo de generador.

En esta zona de operación la máquina de inducción tiene velocidades en el rotor superiores a la de sincronismo, por lo que se comporta con deslizamientos negativos. El sentido de operación es contrario al que se presenta en el régimen motor, dando lugar a que la potencia mecánica interna y la potencia de entrehierro sean negativas, es decir, que lleven una dirección del rotor al estator. Esto significa un cambio de sentido de la fem inducida provocando un cambio de sentido en las corrientes y una inversión en el par. En este punto el par se convierte en un par de frenado por lo que necesita una fuente externa que abastezca de energía mecánica al eje logrando mantener una velocidad mayor a la síncrona y entregando energía eléctrica en los terminales del estator. En la Figura 2.2 en la zona de generador se observa que las velocidades van en el mismo sentido pero la velocidad del rotor es mayor que la síncrona (Pozueta, 2008).

2.5 Circuito equivalente del motor y generador de inducción trifásico.

Para estudiar el comportamiento de la máquina de inducción, se requiere obtener su circuito equivalente, de esta manera es más fácil ver los parámetros que influyen en su operación y cómo es que interviene cada uno en su conducta desde el arranque hasta que se estabiliza (Freris and Infield, 2008).

Para obtener el diagrama eléctrico del motor asíncrono primero se deben tomar en cuenta las condiciones del estator para obtener su circuito equivalente (Figura 2.3) y posteriormente agregar el circuito del rotor. La tensión que toma el motor de la red inyecta las corrientes que crean el campo magnético giratorio en el entrehierro y éste a su vez genera en las fases del estator fuerzas contraelectromotrices \vec{E}_2 balanceadas que difieren de la tensión en los terminales \vec{V}_1 debido a la caída de tensión por la impedancia de su devanado.

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_2 + \vec{I}_1 (R_1 + j x_1) \quad (5.1)$$

La corriente del estator \vec{I}_1 se divide en dos componentes, una corriente de excitación \vec{I}_ψ y una corriente de carga o de rotor en estado estacionario \vec{I}_2 . La corriente de excitación pasa por una rama en derivación la cual tiene una resistencia R_c que indica las pérdidas en el

núcleo conectada en paralelo con una reactancia X_m que indica la magnetización del núcleo y por las cuales circula respectivamente una corriente \vec{I}_c que se encuentra en fase con \vec{E}_2 e \vec{I}_m que se encuentra retrasada 90° respecto a \vec{E}_2 .

Esta representación de las pérdidas en el núcleo es de alta resistencia y muy baja reactancia, por lo que la impedancia equivalente al estar en paralelo, es de un valor mucho menor que la reactancia de magnetización; por lo anterior generalmente esta rama se considera despreciable.

La corriente del rotor aparece en él por la interacción de los flujos magnéticos en el entrehierro que afectan a las barras de la jaula generando una fem y con ello se origina la corriente mencionada.

Hasta este punto se ha analizado el estator completo y se tiene conocimiento de la corriente que llega al rotor; por lo que ahora resta analizar e incorporar el circuito del rotor para obtener el circuito equivalente del motor de inducción.

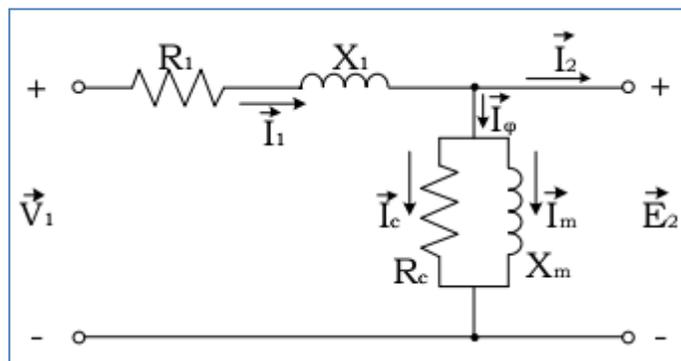


Figura 2.3. Circuito equivalente del estator.

Visto desde el estator, el rotor en estado estacionario se representa mediante una impedancia Z_2 compuesta por la reactancia de dispersión del devanado X_2 en serie con la resistencia de la jaula o devanado R_2 que también por ley Ohm es:

$$Z_2 = \vec{E}_2 / \vec{I}_2 \quad (5.2)$$

Para determinar las corrientes y las tensiones en el rotor, éste se puede cambiar por otro equivalente que tenga el mismo número de fases y vueltas que el estator y que genere la misma fuerza magnetomotriz (fmm) y flujo en el entrehierro para que las condiciones vistas

desde el estator no cambien. Así mismo, al referir el rotor hacia el estator, se debe considerar el deslizamiento entre ellos para que las tensiones y corrientes a frecuencia de deslizamiento del rotor real, se encuentren inmersas en el rotor equivalente estacionario a frecuencia del estator.

Para ello se deben obtener los parámetros del rotor real a frecuencia de deslizamiento. Partiendo de que antes que el motor arranque ambas partes (estator y rotor) de la máquina poseen las mismas frecuencias, se tiene que la reactancia de dispersión del rotor es:

$$X_2 = 2\pi f_1 L_2 \quad (5.3)$$

Para obtener esta reactancia a frecuencia de deslizamiento se hace una consideración donde la ecuación (3.4) se sustituye en (5.3) para obtener finalmente la reactancia de dispersión del rotor referido a la frecuencia de deslizamiento X_{2s} .

$$X_{2s} = sX_2 \quad (5.4)$$

De esta manera la impedancia de dispersión del rotor a frecuencia de deslizamiento Z_{2s} es:

$$Z_{2s} = R_2 + jsX_2 = \vec{E}_{2s} / \vec{I}_{2s} \quad (5.5)$$

La corriente del rotor a frecuencia de deslizamiento \vec{I}_{2s} es igual en magnitud a la corriente del estator ya que la corriente \vec{I}_{2s} es la corriente en un rotor equivalente que tiene el mismo número de vueltas por fase que el estator. La onda de fmm resultante en el entrehierro se debe a los flujos mutuos creados por las corrientes en el estator y por las corrientes en el rotor. Tomando en cuenta que la onda de fmm resultante en el entrehierro se compone de la suma fasorial de la corriente del estator y la corriente del rotor equivalente, estas corrientes son iguales en fase en sus respectivas frecuencias. Por tanto se puede decir que:

$$\vec{I}_{2s} = \vec{I}_2 \quad (5.6)$$

Puesto que la interacción de flujos en el entrehierro genera tanto una fem \vec{E}_{2s} en el rotor como una fuerza contraelectromotriz \vec{E}_2 en el estator, existe una diferencia entre estas tensiones. La diferencia radica en el efecto de la velocidad; así que para que estos potenciales sean iguales, la fuerza contraelectromotriz se puede multiplicar por el deslizamiento.

$$\vec{E}_{2s} = s\vec{E}_2 \quad (5.7)$$

Por lo que ahora se tiene una nueva expresión para la impedancia del rotor a frecuencia de deslizamiento.

$$Z_{2s} = sE_2/I_2 \quad (5.8)$$

Si se divide (5.5) entre el deslizamiento se obtiene la impedancia del rotor equivalente.

$$Z_2 = (R_2/s) + jX_2 \quad (5.9)$$

Finalmente se considera el efecto de la carga en el eje del motor a través de una factorización en la ecuación (5.9).

$$Z_2 = R_2 + jsX_2 + R_2 (1-s /s) \quad (5.10)$$

$$Z_2 = R_2 + jsX_2 + R_L \quad (5.11)$$

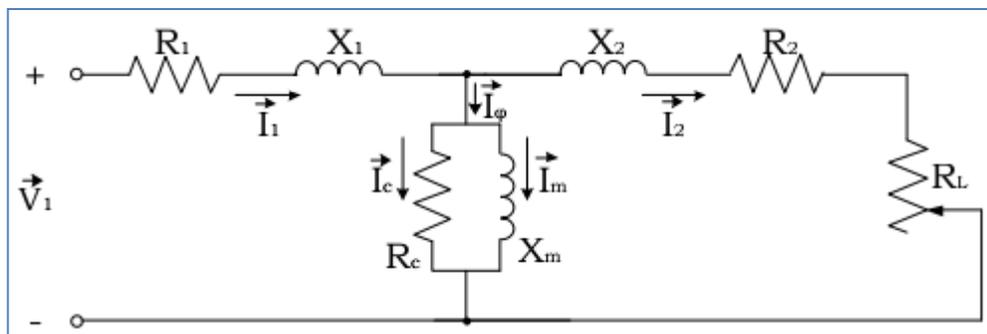


Figura 2.4. Circuito equivalente del motor de inducción.

En la ecuación (5.11) se observa que aparece una resistencia denominada R_L que no afecta a la impedancia del rotor; sin embargo esta resistencia representa la carga mecánica del motor a través del deslizamiento. En la Figura 2.4 se muestra el circuito equivalente del motor de inducción.

Circuito equivalente del generador de inducción trifásico

El circuito equivalente del generador de inducción es muy fácil de explicar una vez que se ha determinado ya el circuito equivalente del motor de inducción, esto se debe a que el diagrama es prácticamente el mismo como se puede apreciar en la Figura 2.5; con la diferencia de que para su análisis, en la ecuación (5.9) que determina la impedancia del

rotor la parte real es de valor negativo, lo que indica que ahora la corriente fluye del rotor al estator.

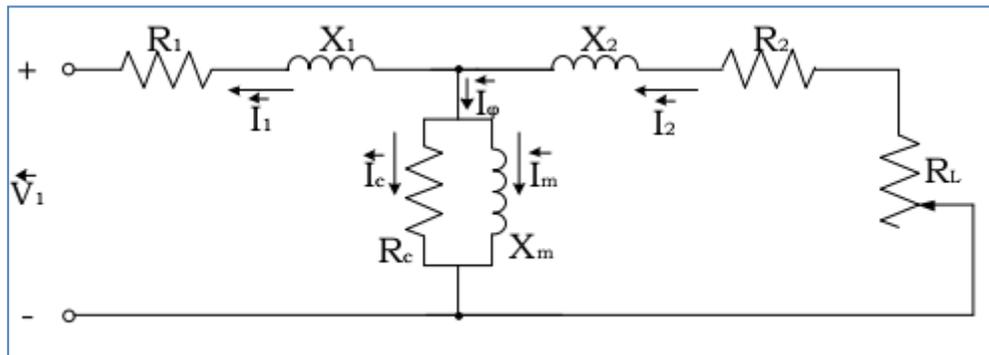


Figura 2.5. Circuito equivalente del generador de inducción.

El signo (-) indica que la potencia va del rotor al estator. La razón por la que R_2/s de la ecuación (5.9) es de valor negativo se debe al hecho de que la máquina ahora opera en el régimen generador, y por ello el deslizamiento es negativo (Cortéz and Gutiérrez, 2011).

2.6 Software empleado.

Para hallar los valores y para evaluar el comportamiento del sistema de generación de energía eólica con interconexión a la red, se utilizaron las herramientas, Simulink y SimPowerSystems, los cuales son proporcionados por MATLAB. Los fabricantes de estos productos es The Mathworks Inc. de los Estados Unidos.

2.6.1 MATLAB.

En los medios universitarios MATLAB se ha convertido en una herramienta básica, tanto para los profesionales e investigadores de centros docentes, como una importante herramienta para el dictado de cursos universitarios, tales como sistemas e ingeniería de control, álgebra lineal, proceso digital de imagen, señal, etc. En el mundo industrial, MATLAB está siendo utilizado como herramienta de investigación para la resolución de complejos problemas planteados en la realización y aplicación de modelos matemáticos en ingeniería. Los usos más característicos de la herramienta los encontramos en áreas de

computación y cálculo numérico tradicional, teoría de control automático, estadística, análisis de series temporales para el procesamiento digital de señales, etc. (Reyes and Rivera, 2011).

Además se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes), las cuales constituyen una familia de soluciones a aplicaciones específicas de acoplamiento rápido. La elección de MATLAB obedece a que cumple los requerimientos necesarios que facilitan significativamente el trabajo del diseñador:

- ✓ Entorno muy utilizado y fácil de obtener.
- ✓ Su uso es simple.
- ✓ Permite conjuntar circuitos y control en la misma simulación.
- ✓ Es posible aproximar el sistema simulado al sistema real.
- ✓ Incorpora librerías de componentes de potencia.
- ✓ Las simulaciones se realizan en un tiempo relativamente corto (entre algunos segundos y pocos minutos).

2.6.1.1 Simulink.

Simulink, es una herramienta gráfica donde sistemas dinámicos complejos se pueden modelar y simular. Proporciona un entorno gráfico interactivo y un conjunto de librerías de bloques que permiten diseñar, simular, implementar y probar una variedad de sistemas variantes en el tiempo, incluidas las comunicaciones, control, procesamiento de señal, procesamiento de video y procesamiento de imagen.

2.6.1.2 SimPowerSystems.

Es una herramienta dedicada a realizar diseños eléctricos en el entorno de Simulink. SimPowerSystems es una librería, la cual contiene modelos de los típicos equipos de potencia como transformadores, líneas, máquinas y dispositivos de electrónica de potencia. Los modelos se han basado en la teoría y probado su validez en el laboratorio de simulación y pruebas de sistemas de potencia de Hydro-Québec y también en École de

Technologie Supérieure and Université Laval. De esta librería se usarán la máquina asincrónica de inducción, transformadores, bloque de falla, entre otros.

2.7 Simulación en MATLAB.

En este epígrafe se realiza el diagrama que rige el comportamiento de la máquina de inducción para ejecutarlo en Simulink de MATLAB. Se simula la máquina de inducción operando en régimen generador.

En el trabajo, los datos para realizar la simulación fueron dados por los compañeros que atienden el parque eólico, estas características se muestran en la tabla 2.1. La utilización de las mismas, permite el acercamiento al comportamiento real que pudiera tener el sistema.

Tabla 2.1. Características técnicas del parque eólico demostrativo de Turiguanó.

Características	
Potencia nominal instalada	0.45 MW
Aerogeneradores	2-ECOTÉCNIA 28/225
Potencia nominal unitaria	225 kW
Generadores	2
Principal	1200rpm
Secundario	900rpm
Velocidad de arranque	4m/s
Velocidad nominal	14m/s
Frecuencia	60 Hz
Polos	4

En la Figura 2.6 se observa la primera parte de la implementación en MATLAB del sistema considerado, el cual toma como referencia el demo que posee el propio software sobre la máquina asincrónica, al cual se le insertan algunos de los parámetros anteriormente mencionados en la tabla 2.1.

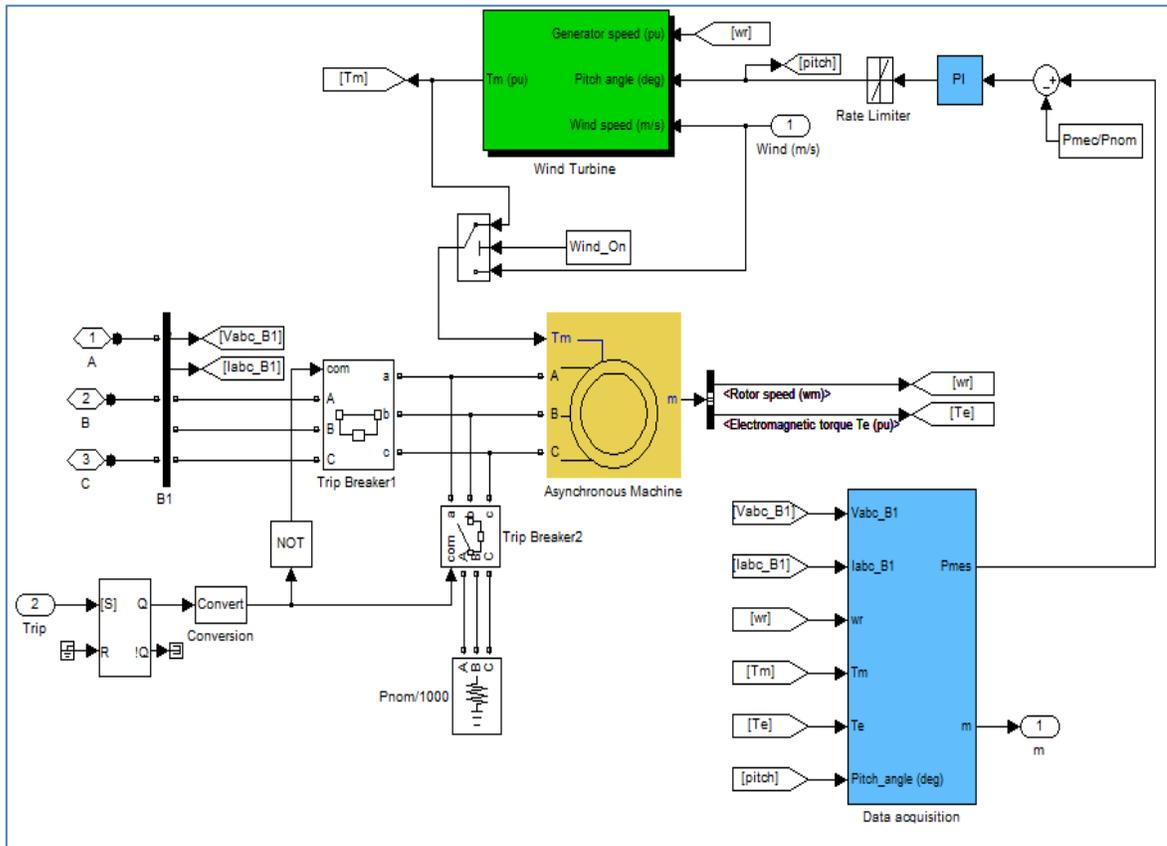


Figura 2.6. La máquina de inducción como generador.

2.7.1 Sistema de generación.

El sistema de generación incorpora un grupo de bloques que facilitan su simulación. Entre estos, podemos mencionar el generador, falla trifásica, transformador y el bloque que se encarga de compensar la potencia reactiva del sistema.

Para establecer la potencia reactiva del sistema son utilizados bancos de condensadores, los cuales según informes, se calcularon para mantener el factor de potencia en 0.9. La capacitancia de los condensadores depende del consumo de reactivo, por lo que el cálculo se realizó para tres pasos y los resultados se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Pasos de los bancos de condensadores.

Potencia activa generado (MW)	Potencia reactiva consumida (Mvar)	Banco de condensadores (kvar)
Hasta 1	Hasta 0.43	200
Desde 1 hasta 1.3	Desde 0.43 hasta 0.61	300
Desde 1.3	Desde 0.61	400

En la figura 2.7 se muestra el sistema de generación, el cual presenta sus dos generadores de inducción de 225 kW, además de los diferentes bloques asociados a él.

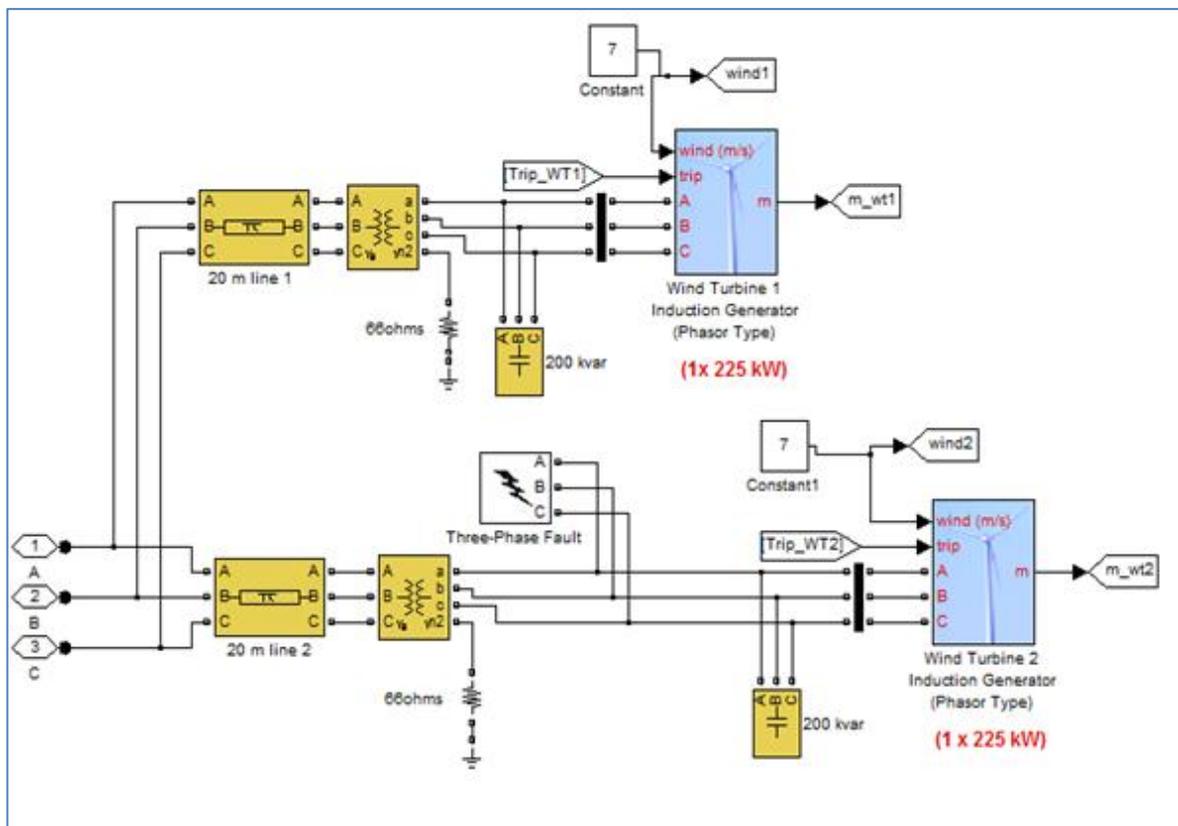


Figura 2.7. Sistema de generación conformado por sus dos máquinas.

El anterior sistema recibe como entrada la velocidad del viento y luego de realizada la configuración necesaria, se incluye en un subsistema al cual se le agregan los demás bloques que conforman el panel general para proceder a la simulación.

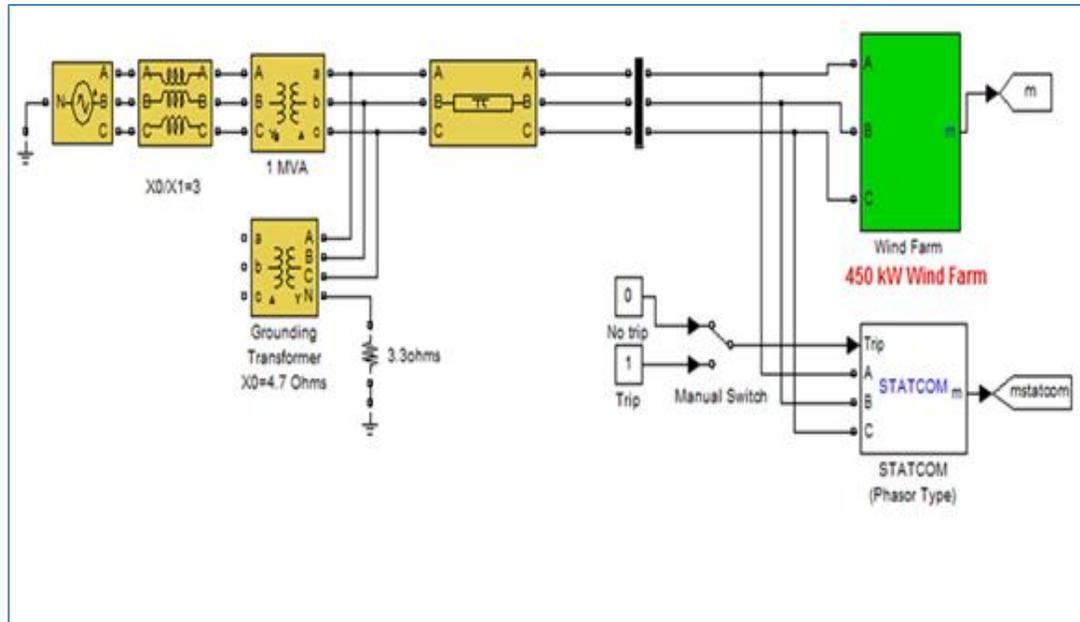


Figura 2.8. Esquema general de simulación.

2.8 Conclusiones parciales del capítulo.

En el capítulo se realiza el análisis de la máquina asíncrona que permite conocer mediante sus formas de operación, el comportamiento del generador de inducción. Además se propone para simular el software MATLAB. Su estudio detallado permite simplificar de manera apreciable la cantidad de bloques necesarios para la representación de estos importantes sistemas de potencia. Mediante el uso de las herramientas disponibles que incluye este software se procedió a simular el parque eólico de Turiguanó.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Introducción.

En este capítulo se describe el resultado obtenido con la simulación del parque eólico en estudio, que consta de dos generadores de inducción con rotor jaula de ardilla y se encuentra implementado en Turiguanó Ciego de Ávila. Para ello, en los siguientes epígrafes se presentan los resultados experimentales del sistema de generación que fueron divididos por sus respectivas configuraciones.

3.2 Resultado de la simulación de velocidad del generador de velocidad fija.

En este epígrafe se presentan los resultados de la simulación suponiendo una velocidad fija de 7m/s y 14m/s (velocidad nominal de viento para este sistema). La Figura 3.1 y 3.2 muestran la velocidad a la que gira el generador asincrónico, la cual se puede observar que es mayor de 1 pu (por unidad) en ambos casos, lo que indica la correcta operación de la máquina eléctrica en el régimen generador. En este modo el rotor de la máquina de inducción gira a una velocidad mayor que la del campo magnético giratorio.

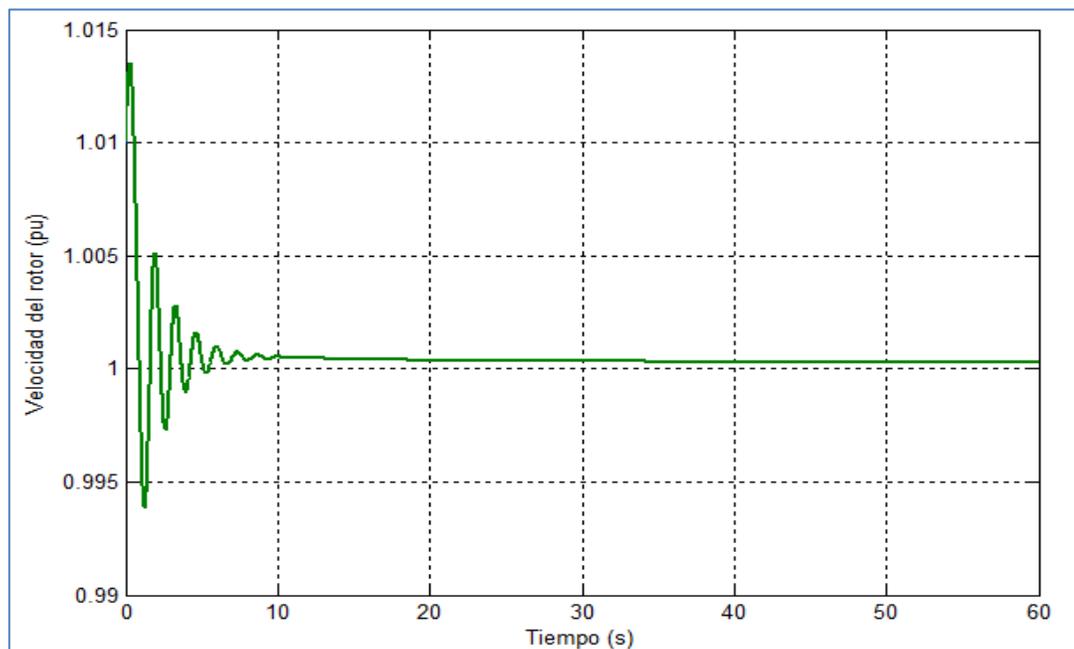


Figura 3.1. Comportamiento de la máquina ante una velocidad de 7m/s.

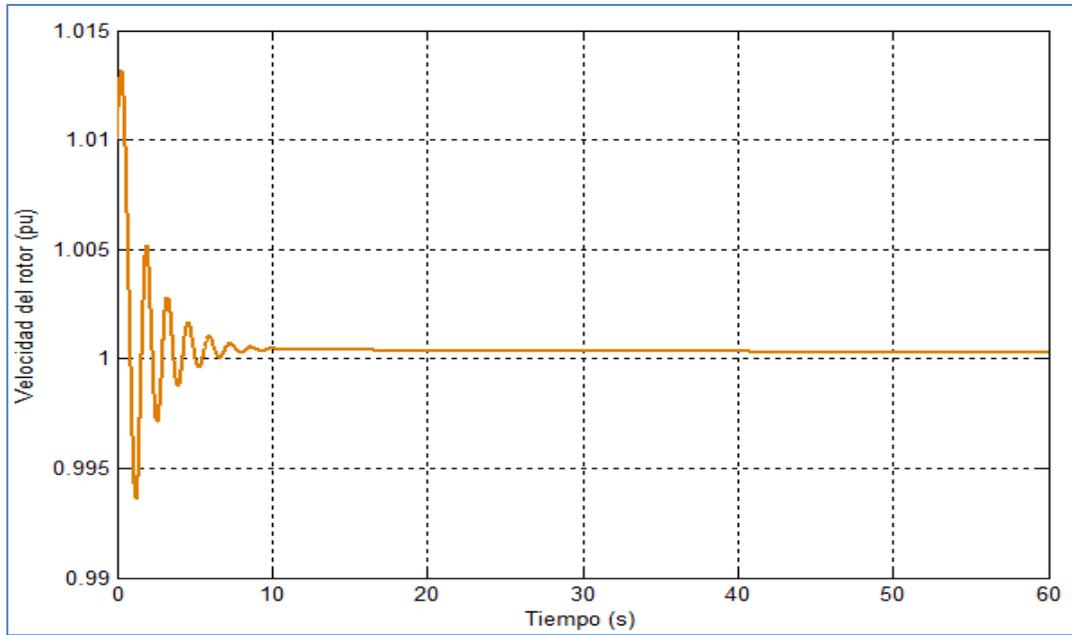


Figura 3.2. Comportamiento ante una velocidad de 14m/s (velocidad nominal).

3.3 Resultado del comportamiento de la potencia reactiva.

Este tipo de generadores necesitan para su funcionamiento la potencia reactiva. En la Figura 3.3 se muestra la potencia reactiva generada por el sistema para su excitación.

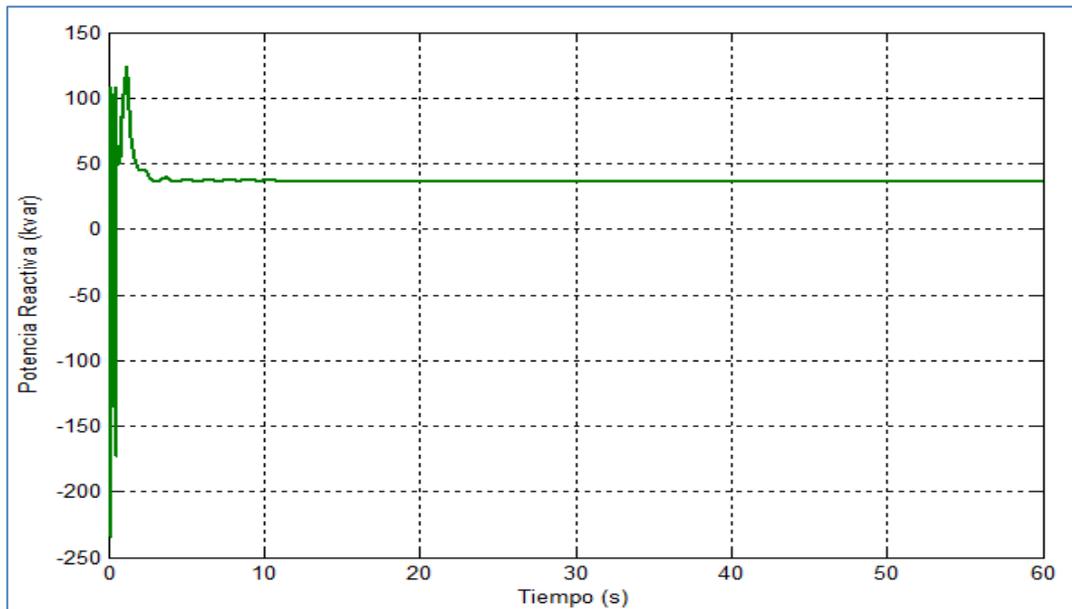


Figura 3.3. Potencia reactiva generada por el aerogenerador.

3.4 Resultado del comportamiento de la potencia activa.

En la Figura 3.4 se muestra la entrega de potencia del parque ante una velocidad nominal de viento de 14 m/s, en la cual los generadores trabajan de forma óptima en su entrega de potencia.

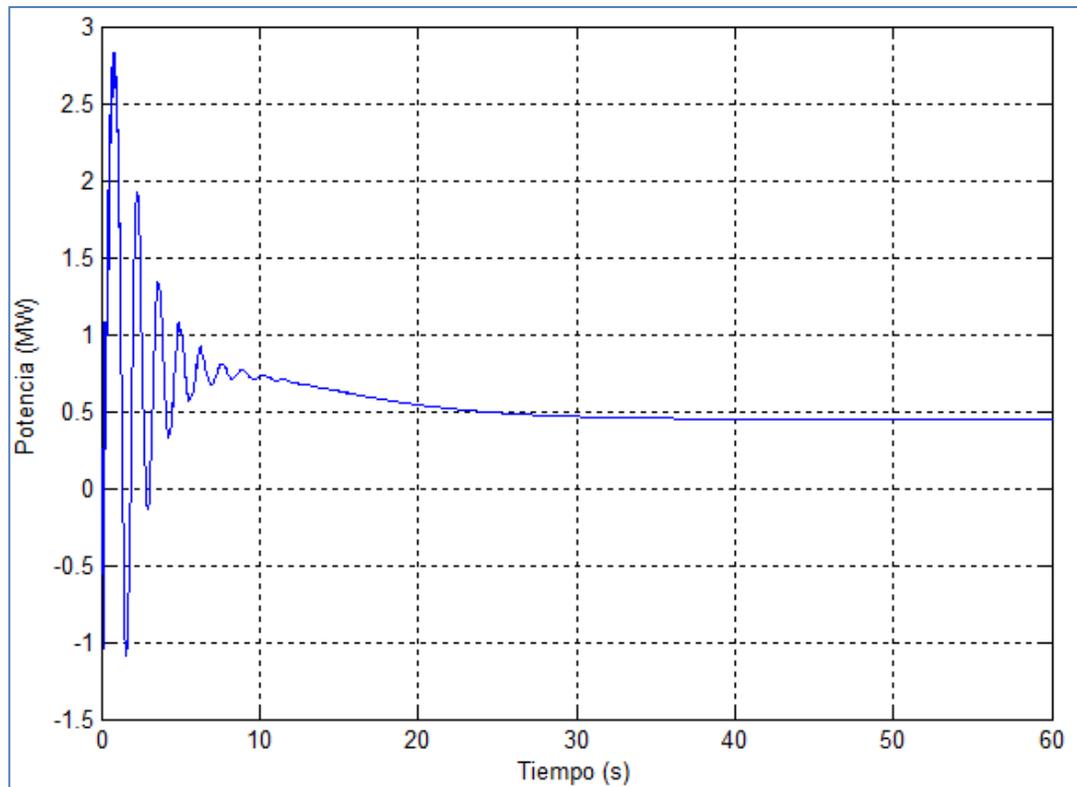


Figura 3.4. Potencia producida por el parque.

3.5 Resultado del comportamiento del voltaje trifásico.

En la Figura 3.5 se muestra el comportamiento que presenta el voltaje trifásico del sistema, el cual se encuentra en correcto funcionamiento, ya que el valor de aproximadamente 1 pu de la gráfica significa un voltaje normalizado, lo que demuestra una buena regulación de voltaje.

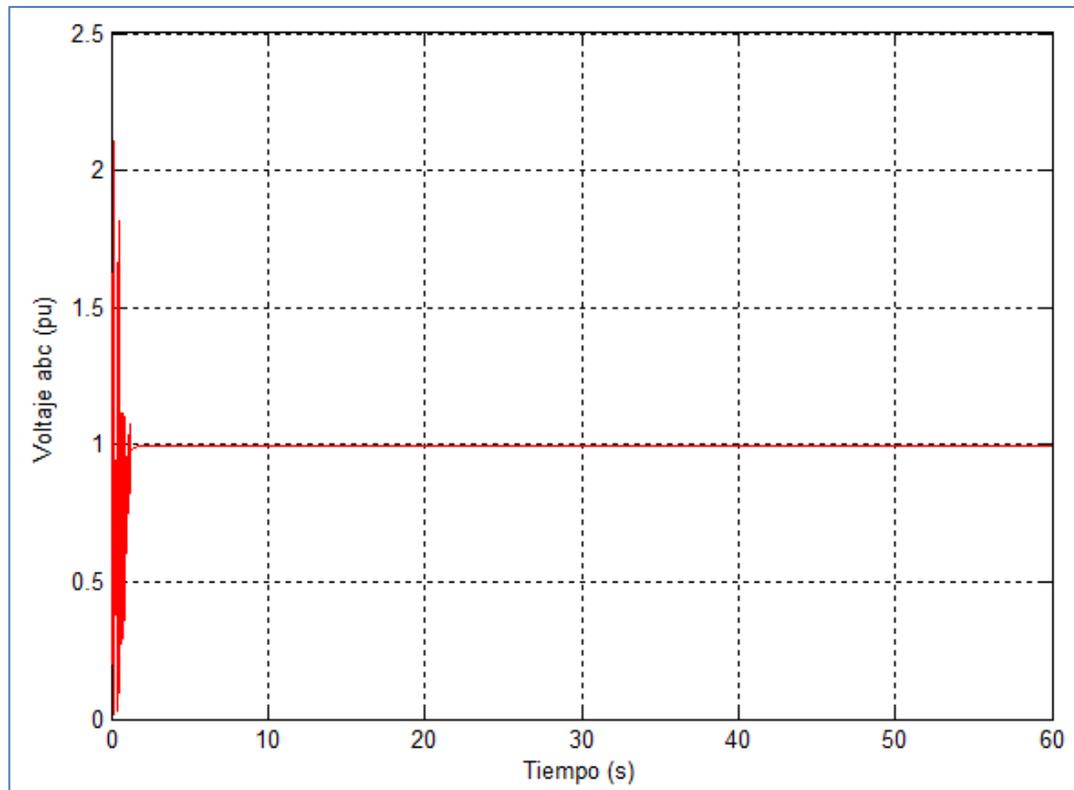


Figura 3.5. Comportamiento del voltaje trifásico.

3.6 Resultado del sistema ante una falla.

En los sistemas eléctricos de potencia pueden ocurrir fenómenos indeseados que son producidos por diversas causas y provocan caídas bruscas en la tensión, por lo que a los 15 segundos se simula una avería en la línea a y b del segundo aerogenerador mediante el bloque de falla a tierra, y los resultados son mostrados en las siguientes figuras.

3.6.1 Comportamiento de la velocidad de los aerogeneradores.

Al producirse una falla en la red y bajar la tensión en los terminales del generador dañado, se produce una aceleración del rotor, debido a la reducción del par a causa del hueco de tensión. Este tipo de configuración de velocidad fija es la menos recomendable, ya que la velocidad de giro de las palas de la turbina aumenta considerablemente y se pueden disparar las protecciones de sobrevelocidad.

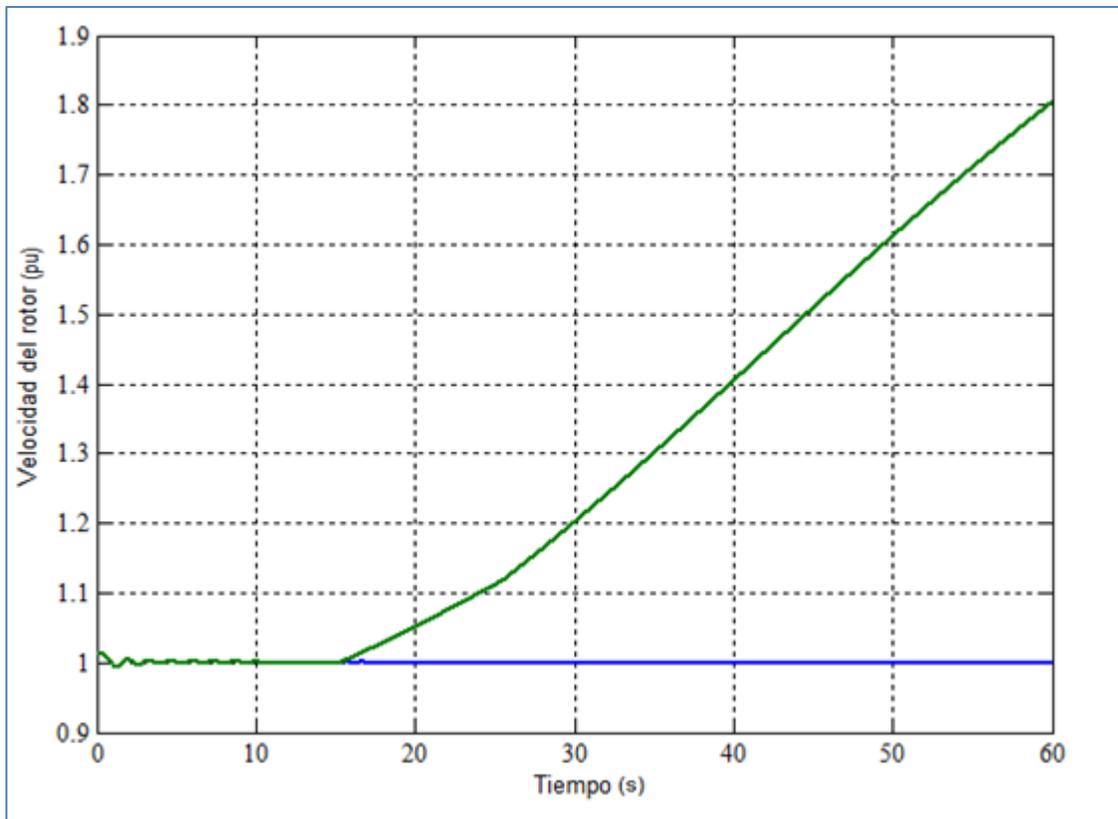


Figura 3.6. Velocidad del rotor ante una falla.

3.6.2 Comportamiento de la potencia del sistema.

La reducción de la tensión que es provocada por la falla en los terminales del segundo generador de inducción con rotor jaula de ardilla, hace que la potencia activa que está generando el sistema caiga hasta alcanzar el valor que se encuentra produciendo solamente la máquina que no sufrió la avería. Cuando la falla es despejada, como la velocidad de la máquina se incrementó, la potencia activa tiende a ser mayor que el valor antes de la falla. Esto requiere altas corrientes también, lo que produce caídas de tensión en las líneas y transformadores, debido a esto, la tensión en los terminales de la máquina no se recupera inmediatamente a su valor antes de la avería.

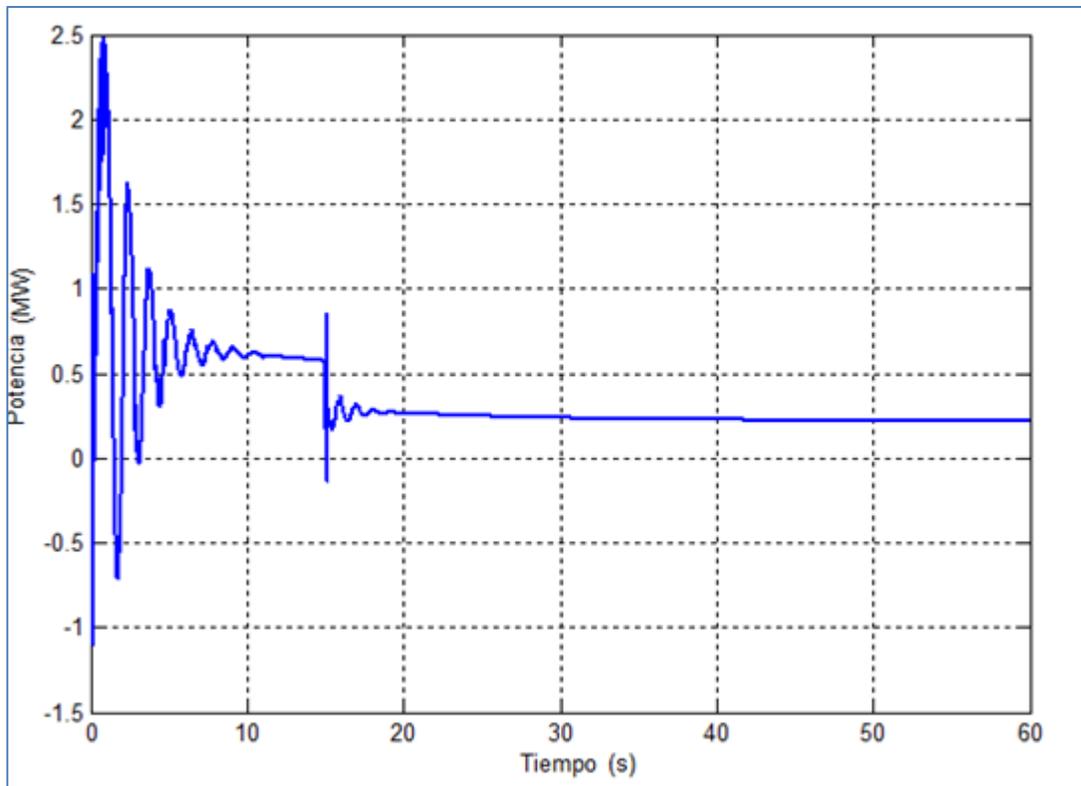


Figura 3.7. Potencia del sistema ante una falla.

3.6.3 Comportamiento de la potencia reactiva de los aerogeneradores.

El generador de inducción siempre se encuentra absorbiendo potencia reactiva, nunca es igual a cero, sin embargo en la Figura 3.7 se ve cómo se comporta el sistema ante esta avería.

Estos sistemas constan con un grupo de protecciones las cuales son las encargadas de despejar cualquier falla existente en el sistema y una vez despejada la falla por estas protecciones, el parque vuelve a recuperarse. Para retomar la tensión de la red, la máquina absorbe una gran cantidad de potencia reactiva, lo que dificulta el período de recuperación de la tensión.

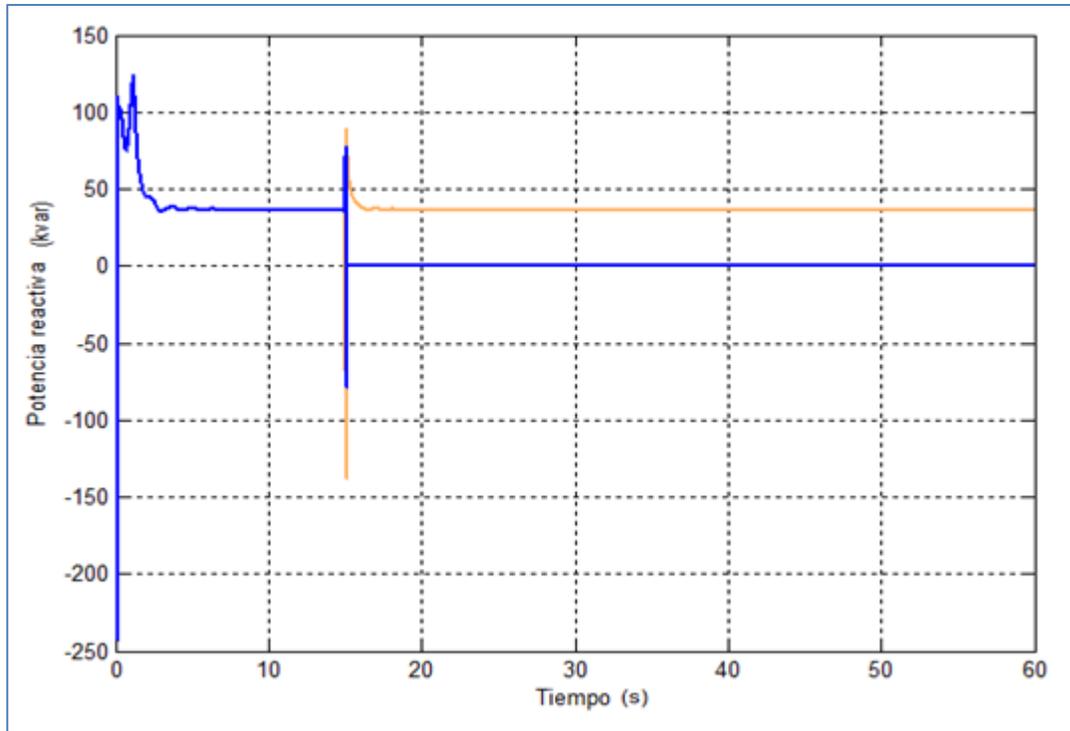


Figura 3.8. Potencia reactiva ante una falla.

3.6.4 Comportamiento del voltaje trifásico ante la falla.

Cuando ocurre una falla en la línea a los 15 segundos, el parque presenta inconvenientes como los anteriormente mostrados, aunque además existe un aumento en el valor del voltaje en pu como el mostrado en la Figura 3.9, pues esto ocurre hasta que el sistema no se recupere mediante sus protecciones.

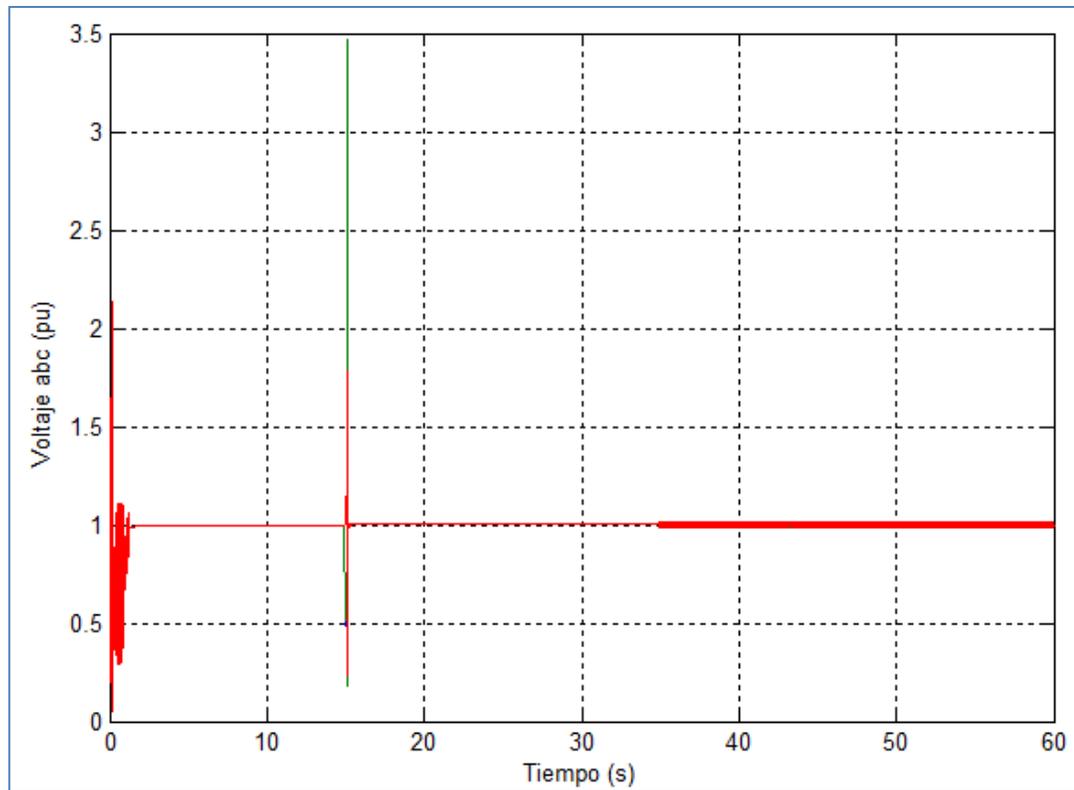


Figura 3.9. Voltaje trifásico ante la falla.

La red a la que están conectados los parques eólicos sufren cortocircuitos con relativa frecuencia y su aparición provoca huecos de tensión más o menos severos en los nudos de interconexión. Los sistemas de protección que poseen los parques se pueden activar cuando se producen los huecos y pueden dejar de operar en condiciones aceptables para el operador de red. Desde el punto de vista de la continuidad de suministro, la configuración menos recomendable es la de velocidad fija, por lo que mediante estos resultados obtenidos se pudiera profundizar en las mejoras de este tipo de generador.

3.7 Conclusiones parciales del capítulo.

En este capítulo se realizaron distintas simulaciones para determinadas velocidades del viento, las cuales se tomaron como valores constantes. Adicionalmente se presenta el aporte de potencia reactiva a la red y la potencia activa producida por el parque eólico, así como los cambios producidos en el sistema ante una falla.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

- 1 Se realizó el análisis de las energías renovables y en particular la generación eólica para el posterior trabajo con la simulación del parque eólico.
- 2 Mediante el estudio pertinente, se logró caracterizar el generador eólico de inducción con rotor jaula de ardilla como núcleo principal del trabajo y se utilizó como aplicación en una planta de generación eléctrica.
- 3 El software MATLAB contiene herramientas eficientes para el estudio y simulación de los sistemas eólicos.
- 4 A partir de los datos obtenidos del parque eólico de Turiguanó se logró realizar la simulación del sistema.
- 5 Mediante la simulación realizada se logró conocer el comportamiento de algunas de las variables más importantes involucradas en estos sistemas.

Recomendaciones.

- 1 Comprobar el comportamiento del parque eólico mediante la aplicación de un modelo del viento aún más cercano al comportamiento verdadero.
- 2 Estudiar otros parques eólicos que existen en Cuba para comparar el funcionamiento de los sistemas de velocidad variable con los de velocidad fija.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEVEDO, H. G. 2008. *Modelado, simulación y control de un sistema de generación eólico*. Universidad Industrial de Santander.
- AMENEDO, J. L. R., GÓMEZ, S. A. & DÍAZ, J. C. B. 2003. *Sistemas Eólicos de producción de energía eléctrica*. Madrid.
- BLAABJERG, F. & CHEN, Z. *POWER ELECTRONICS FOR MODERN WIND TURBINES*. Denmark: Mor gan&Claypool.
- BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N. & BOSSANYI, E. 2001. *WIND ENERGY HANDBOOK*. England: John Wiley & Sons.
- CORTÉZ, J. S. & GUTIÉRREZ, O. H. 2011. *ANÁLISIS ELECTROMECAÁNICO DE UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN CON ROTOR JAULA DE ARDILLA EMPLEANDO UN MODELO DIGITAL*. INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
- CRISTANCHO, O. G. U. 2007. *Modelado y simulación del sistema mecánico de un generador eólico de eje horizontal con tres palas*. Universidad Industrial de Santander.
- CUBASOLAR 2007. *Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica. Diez preguntas y respuestas sobre energía eólica*.
- CHAPMAN, S. J. 2000. *Máquinas Eléctricas*. 3 ed.: McGraw Hill.
- FIGUEREDO, C. M. *Producción de electricidad con energía eólica* [Online].
- FIGUEREDO, C. M., VIAMONTE, G. L. & VELUNZA, L. M. 2010. *Estado actual y desarrollo de la energía eólica en Cuba* [Online]. Cuba.
- FRAILE, M. J. 2008. *Máquinas Eléctricas*.
- FRERIS, L. & INFIELD, D. 2008. *Renewable Energy in Power Systems*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- HANSEN, L. H., HELLE, L., BLAABJERG, F., RITCHIE, E., MUNK-NIELSEN, S., BINDNER, H., SORENSEN, P. & BAK-JENSEN, B. 2001. *Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines*. Dinamarca.
- HERNÁNDEZ, N. D. G. 2007. *Generadores Eólicos de jaula de ardilla en Sistemas Eléctricos de Potencia*
- ISAAC, J. & LEIVA, G. 2010. *Parques Eólicos Cubanos: Resultados Operacionales durante el 2010*. *Renovable.cu*, 1.
- JOHNSON, G. L. 2001. *Wind Energy System*. Manhattan.
- LONGATT, F. G. 2008. *Comportamiento de turbinas de viento a velocidad constante accionando generador de inducción de rotor tipo jaula de ardilla*. 9.
- MORALES, R. S. 2010. *Resultados de la prospección y evaluación del recurso eólico cubano*. *Renovable.cu*, 2.
- MORÁLEZ, M. A. 2009. *Energía eólica y diseño de voltaje y frecuencia*.

- ONEI 2012. Energía renovable. Cuba 2011. Cuba
- PATEL, M. R. 1999. Wind and Solar Power Systems. New York.
- PÉREZ, I. L. M. 2006. *Diseño de un sistema eólico - fotovoltaico*. Martha Abreu.
- POZUETA, M. A. R. 2008. *Máquinas Asíncronas*. Universidad de Cantabria.
- REYES, G. P. S. & RIVERA, O. M. V. 2011. *Modelado de una turbina eólica de velocidad variable con control de ángulo de calaje*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- RODRÍGUEZ, E. C., ARJONA, M. A. & HERNÁNDEZ, C. 2012. Modelado y Simulación de un Generador de Inducción de Jaula de Ardilla.
- SÁNCHEZ, A. M. H. 2008. *Análisis, modelado y simulación de la operación de sistemas de generación Eoloeléctrica Basados en generadores de Inducción Tipo Jaula de Ardilla*.
- SÁNCHEZ, M. C. 2001. *Control de un sistema de generación eólica de velocidad con generador síncrono multipolar de imanes permanentes acoplados a red*. Universidad Carlos III de Madrid.
- SÁNCHEZ, P. L. R. 2004. *Avances en el Control de Generadores Eólicos y su Conexión a Red mediante Convertidores Electrónicos de Potencia*. UNIVERSIDAD DE CASTILLA-LA MANCHA.

ANEXOS**Anexo I Parque eólico de Turiguanó.**