

**Modelamiento matemático para el
generador de inducción doblemente
alimentado trabajando con
saturación en sistemas de
generación eólica**

García Saquicela, Marcelo Rodrigo
Arroyo Quintero, Liliana Janeth
Murillo Oviedo, Jorge Patricio

Modelamiento matemático para el generador de inducción doblemente alimentado trabajando con saturación en sistemas de generación eólica

**García Saquicela, Marcelo Rodrigo
Arroyo Quintero, Liliana Janeth
Murillo Oviedo, Jorge Patricio**

**Modelamiento matemático para el
generador de inducción doblemente
alimentado trabajando con
saturación en sistemas de
generación eólica**

Título original: Modelamiento matemático para el
generador de inducción doblemente
alimentado trabajando con
saturación en sistemas de
generación eólica
Primera edición: febrero 2020

© 2020, Universidad Técnica Estatal de Quevedo
García Saquicela, Marcelo Rodrigo
Arroyo Quintero, Liliana Janeth
Murillo Oviedo, Jorge Patricio
Publicado por acuerdo con los autores.
© 2020, Editorial Grupo Compás.
Segundo Congreso Internacional de Sociedad y Tecnología
de la información en la Educación Superior
Guayaquil-Ecuador

Grupo Compás apoya la protección del copyright, cada uno de sus
textos han sido sometido a un proceso de evaluación por pares
externos con base en la normativa del editorial.

El copyright estimula la creatividad, defiende la diversidad en el
ámbito de las ideas y el conocimiento, promueve la libre expresión y
favorece una cultura viva. Quedan rigurosamente prohibidas, bajo las
sanciones en las leyes, la producción o almacenamiento total o
parcial de la presente publicación, incluyendo el diseño de la
portada, así como la transmisión de la misma por cualquiera de sus
medios, tanto si es electrónico, como químico, mecánico, óptico, de
grabación o bien de fotocopia, sin la autorización de los titulares del
copyright.

Editado en Guayaquil - Ecuador

ISBN: 978-9942-33-197-7

Cita.

M. García, L. Arroyo (2020) Modelamiento matemático para el generador de inducción doblemente alimentado trabajando con saturación en sistemas de generación eólica, Editorial Grupo Compás, Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Guayaquil Ecuador, 83 pag

Prólogo

El libro, exhibe aspectos significativos de las nuevas tecnologías empleadas para la producción de energía renovable a base del viento, sin duda alguna se ha evidenciado grandes cambios aplicados a esta forma de producción de energía en los últimos años, permitiendo de cierta forma desplazar o reemplazar aquellos sistemas de generación caros y no amigables con el medio ambiente. Básicamente la finalidad de esta investigación es exponer al lector las características de un sistema de generación eólica con DFIG, así como la importancia que tiene la incorporación de la saturación magnética que suele presentarse en este tipo de generadores, para determinar el comportamiento real de estos, puesto que en condiciones normales o nominales estas máquinas operan sin entrar en saturación, sin embargo, en condiciones determinadas de operación considerar el modelo como lineal no es adecuado. Para el estudio se tomó el modelo desarrollado en [1] con el cual se trabajó en el análisis de los efectos provocados en la máquina a causa de la incorporación de la saturación, así como los efectos ante la aparición de los huecos de tensión, sobretensiones y las variaciones en el comportamiento cuando esta opera con y sin saturación, estas condiciones acompañadas de técnicas de simulación en Matlab/simulink contribuirán en la obtención de un modelo más estricto que represente el

correcto funcionamiento de la máquina en determinadas condiciones; para ello se hará uso de la identificación de sistemas como método para la obtención del modelo matemático que permita representar el comportamiento del sistema.

Índice

Prólogo.....	2
Índice	4
Introducción.....	5
Capítulo 1	8
Energía eólica.	11
Turbinas eólicas.....	13
Componentes y topología.....	13
Turbinas eólicas de velocidad variable.....	15
Turbina eólica de velocidad constante.....	16
Turbinas eólicas controladas por inclinación.....	18
Turbinas de viento con control de paro.....	18
Turbinas de viento controladas por parada activa.....	19
Turbinas de viento con velocidad variable limitada.....	19
Esquema de protección de fallas y clasificación de apartamentos.....	20
Calidad de potencia.....	21
Generadores de inducción aislados y conectados a la red existente.....	24
Generadores conectados a la red y su acoplamiento.....	25
Estimación de los parámetros del modelo matemático.....	26
Pruebas de corto circuito.....	26
Pruebas de rechazo de carga.....	27
Pruebas de respuesta en frecuencia.....	28
Respuesta en circuito abierto.....	28
Pruebas usando perturbaciones.....	28
Descripción matemática de una máquina síncrona.....	29
Circuitos simples.....	30
Ecuaciones básicas de una máquina síncrona.....	32
Transformada de Park o dq0.....	34
Incorporación de la saturación en los parámetros del modelo constante.....	50
Identificación lineal de sistemas.....	56
Identificación no lineal de sistemas.....	60
Incorporación de la saturación al modelo DFIG.....	66
Comportamiento del modelo con saturación y sin saturación.....	67
Referencias bibliográficas.....	86

Introducción

La energía eólica ha tomado mayor importancia a nivel mundial como fuente de generación energética, su imponente desarrollo se puede constatar en la construcción de parques eólicos en la mayor parte del mundo, con instalaciones en alta mar y en tierra. Los constantes avances tecnológicos han permitido el desarrollo de este tipo de generación a gran escala, sin embargo, existe en el mercado diversos tipos de aerogeneradores y cada uno de ellos interactúa de forma diferente con el sistema [2].

Con las respectivas investigaciones se determina el tipo y modelo de turbina las cuales comúnmente se encuentran ubicadas en terrenos altos para que el potencial eólico pueda ser explotado a su máxima capacidad [3]. Se requiere que las turbinas eólicas cuenten con capacidad de conducción de bajo voltaje, lo que significa que los generadores eólicos deben mantenerse conectados a la red y proporcionar energía eléctrica durante las contingencias externas que presente la red [4].

Técnicamente se conoce que el objetivo fundamental de un sistema de potencia es suministrar energía de calidad y de forma continua a los usuarios es decir, suplir la demanda en cada instante de tiempo, ahora si la energía eólica se introduce en el sistema de potencia o red eléctrica el objetivo del sistema de energía todavía debe ser cumplido, el desafío al cual se enfrentan los sistemas con la integración de este tipo de energía se debe a la naturaleza fluctuante del viento así como la diversidad de generadores existentes en el mercado [5].

El desafío básico con respecto a la integración de la generación eólica a la red eléctrica convencional está determinada por aspectos como: mantener el nivel de voltaje adecuado a fin de que los usuarios no presenten problemas por fluctuaciones de voltajes que puedan derivar en daños a sus artefactos, y mantener el equilibrio de potencia en el sistema a fin de que este pueda abastecer la demanda existente en todo momento [5].

Considerando este aspecto los generadores de inducción doblemente alimentados cuentan con la capacidad de solución a este inconveniente, este tipo de generador actualmente es uno de los modelos más utilizados en aerogeneradores para el aprovechamiento del recurso eólico debido a las diversas ventajas que presenta [4].

Sin embargo, los modelos actuales del DFIG no incorpora las características de no linealidad magnética de la inductancia, introducida por la saturación magnética, lo cual pone en riesgo el funcionamiento de la máquina, así como la estabilidad del sistema eléctrico de potencia al cual se encuentre conectado [3].

Este aspecto debe ser muy considerado, puesto que los parques eólicos deben contribuir en el soporte y operación de la red eléctrica al igual que las plantas de generación convencional que utilizan generadores síncronos para su funcionamiento, se debe conocer a cabalidad los modelos dinámicos de generación eólica así como las capacidades de control y la interacción con el sistema de energía [3].

En base a lo planteado la investigación presenta el estudio de un modelo del generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) que incorpora las características de la no linealidad saturación en el estudio. Esto con el fin de desarrollar el modelamiento matemático que permita verificar el comportamiento de la máquina cuando se vea enfrentada a trabajar bajo estos parámetros, y a su vez, poder llevar a cabo el análisis comparativo de un modelo con y sin saturación.

Capítulo 1

Los Generadores de Inducción Doblemente Alimentados, GIDA, continúan siendo objeto de estudio en lo relativo al modelado, identificación y control. Por otra parte, varios trabajos analizan el comportamiento de estas máquinas en diferentes condiciones relacionadas principalmente con los voltajes de operación (disturbios, fallos, etc.). Prácticamente todos estos estudios son realizados considerando puntos de operación del sistema, en los cuales los generadores trabajan en la parte lineal de la característica saturación y sin tener en cuenta la histéresis y saturación presente en el mismo.

La saturación magnética constituye una de las no linealidades de frecuente presencia en estas máquinas eléctricas en determinadas condiciones de operación, fenómeno que ocurre producto del grado de magnetización del material ferro-magnético que se presenta a partir de un determinado valor del campo o fuerza magnetizadora resultante de la corriente de magnetización aplicada.

Por esta razón se ha considerado la inductancia magnética (denominada L_m) como el elemento que caracteriza el modelado, en lo referente a considerar o no la presencia del fenómeno saturación en la operación de la máquina de inducción. Si L_m es considerado constante, resulta por tanto un modelo lineal, mientras que considerar el mismo como variante con la corriente, implica considerarlo como un elemento no lineal.

Generalmente en el modelado de las máquinas de inducción parte de la hipótesis de linealidad, o sea L_m

constante. Aunque esta hipótesis generalmente da buenos resultados pueden producirse altas corrientes cuando se presenta la saturación, en lo cual el punto de operación del flujo magnético esté por encima del codo de la curva de magnetización, esta situación provoca entonces la presencia de armónicos.

Esto se resume en que a pesar que la alimentación de tensión sea senoidal, la corriente no lo sería debido a la no linealidad entre el flujo y el campo magnético provocada por la saturación. En situación de L_m variando, que corresponde a considerar diferentes zonas de operación, se presenta entonces la necesidad del cálculo permanentemente del valor de L_m . Esto introduce una complejidad adicional en los modelos a considerar. Sin embargo, todo el modelado de esta característica cambiante en L_m está bien fundamentada en la literatura técnica.

Actualmente existen diversos tipos de aerogeneradores en el mercado y aunque el generador de inducción doblemente alimentado cumple enormes expectativas en cuanto a su funcionamiento en el sistema eólico, en este no se ha integrado la histéresis y saturación, lo cual constituye una de las no linealidades de frecuente presencia en estas máquinas eléctricas. Se llevará a cabo el desarrollo del modelamiento matemático para el generador de inducción doblemente alimentado en el cual se incluya la saturación magnética.

Habitualmente en diversas ramas de las ciencias se hace necesario realizar estudios sobre el comportamiento de un

sistema bajo condiciones específicas, para lo cual en muchas ocasiones es más conveniente el empleo de modelos que representen a dichos sistemas. Los modelos pueden ser de muy diversos tipos y una de las vías para obtenerlos es conocida como la "Identificación de Sistemas".

La Identificación de Sistemas constituye entonces una vía para la obtención, de forma experimental, de un modelo que reproduzca con suficiente exactitud, para los fines deseados, las características dinámicas de un sistema bajo estudio. El modelo se obtiene a partir de datos recopilados de la propia operación normal del sistema o por procedimientos experimentales expresamente realizados con este objetivo.

Dichos datos en su forma más simple corresponden a datos de entradas y salidas del propio sistema. El mejoramiento de las técnicas de procesamiento de datos experimentales para la identificación de sistemas es un objetivo permanente en esta área del saber. La teoría de sistemas es útil para obtener modelos sencillos, mientras que técnicas computacionales son requeridas en caso de modelos complejos dando buenos resultados, como una disminución significativa del tiempo y costo de realización de métodos numéricos y un aumento en la calidad de las predicciones y diagnósticos realizados en el comportamiento de estos sistemas.

Son variadas las causas que normalmente atentan contra una correcta aplicación de las técnicas de identificación. Entre ellas las incertidumbres, dinámicas impredecibles y otros fenómenos desconocidos que no pueden ser

modelados por vía directa. Los modelos a obtener usualmente dependen de un número de parámetros cuyos valores no son conocidos o solo parcialmente conocidos. En ocasiones incluso, es posible medir solo una parte de la dinámica del sistema a identificar.

Una de las características más importante de los sistemas no lineales es la dependencia en el comportamiento de la respuesta del sistema con la magnitud y tipo de entrada. De lo anterior se deduce que las no linealidades complejizan la tarea de extracción de información de un sistema, o sea la identificación de sus propiedades estáticas y dinámicas a partir de los datos experimentales obtenidos. Existen dificultades reales en la identificación del modelo de un proceso no lineal, especialmente en presencia de no linealidades severas.

Energía eólica.

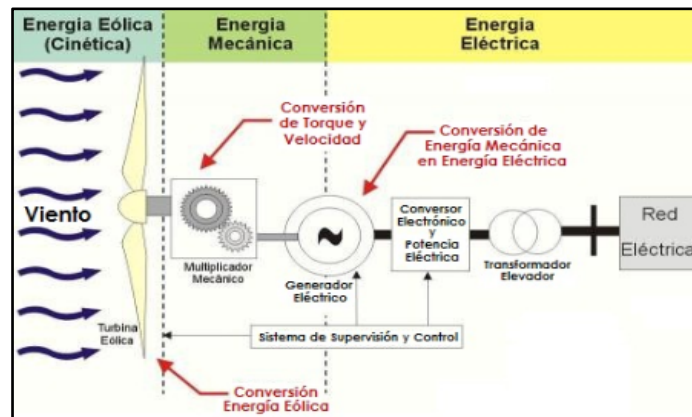
La generación de energía a través de la energía eólica es una de las tecnologías que han crecido considerablemente en los últimos años, la importancia que se le asigna a este tipo de generación se debe a las reducidas emisiones de gases contaminantes, la rapidez de la construcción de los parques eólicos a diferencia de los diversos sistemas de generación de energía eléctrica que tardan un poco más en ser construidas [6], [7].

Sin embargo, este también presenta desventajas como la densidad baja de los vientos esto depende del lugar donde se esté geográficamente ubicado ya que se presentan velocidades variables en el recurso eólico, para

considerar aprovechable este recurso es necesario que su densidad sea mayor o igual a los $500 \frac{w}{m^2}$ a una altura de 50m, lo que requiere una velocidad mínima del viento de 7 a 8m/s [6], [7].

Con el estudio previo de sitios candidatos, del potencial eólico y demás características del parque a implementarse, debe considerarse a todos en conjunto y verificar los efectos que pudiera producirse en el sistema de transmisión a razón de su implementación, es decir verificar el comportamiento de la corriente, voltaje, frecuencia y el estado de los elementos del sistema, esto con el fin de evitar contingencias en el SEP [8].

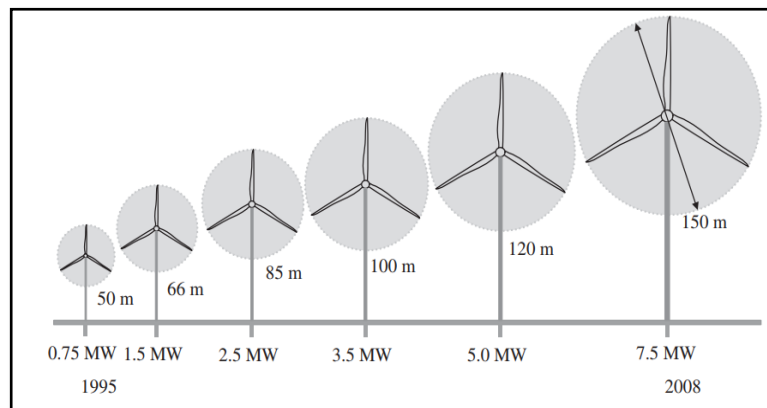
Fig. 0.1 Componentes de un sistema de generación de energía eólica [36].



Turbinas eólicas.

Las turbinas eólicas son dispositivos muy utilizados actualmente, su constante desarrollo ha permitido el uso de esta para satisfacer necesidades humanas e industriales; la innovación de las tecnologías aplicadas en su diseño ha permitido emplear esta para convertir la energía cinética contenida en el viento en energía

Fig. 0.1 Evolución de las turbinas eólicas según su dimensión [3].



mecánica, de manera que se produzca una rotación en el rotor, misma que es usada para generar energía eléctrica en aerogeneradores [9].

Cabe recalcar que estas turbinas han sido diseñadas para producir energía eléctrica a costos bajos, es decir, lo más barato posible de tal manera que son diseñadas para que produzcan el máximo rendimiento [10], [11].

Componentes y topología.

Para la operación de un sistema eólico es posible trabajar u optar por el uso de varias tecnologías dependiendo las características, componentes y topología de la red entre estas tecnologías podemos citar la turbina que trabaja con velocidad fija y en su mismo caso turbinas que trabajan con velocidad variable las mismas que serán

controladas según las necesidades, entre estas tenemos las controladas por inclinación y las controladas por pérdidas [9], [12].

Fig. 0.1 Efectos del viento sobre un elemento de pala [13].

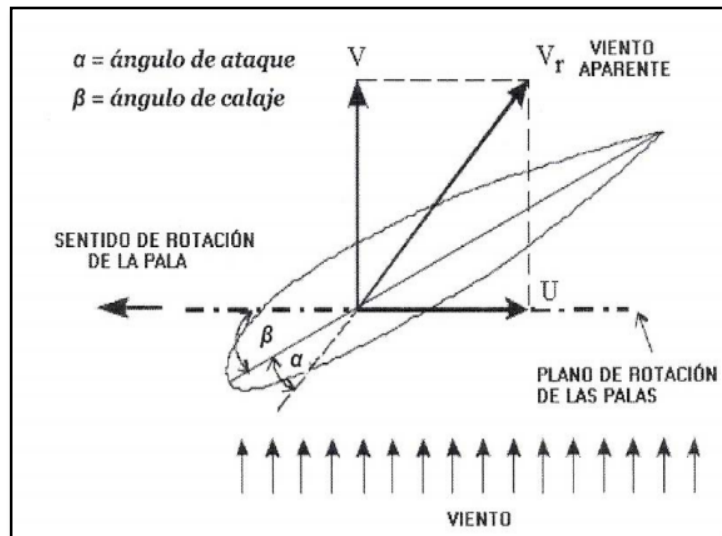
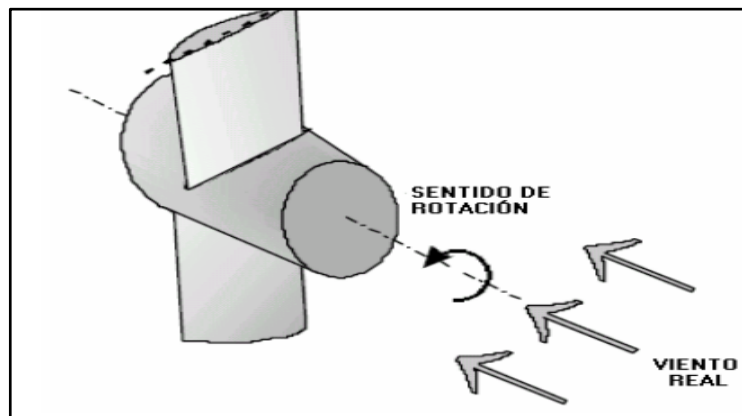


Fig. 0.2 Viento aparente [13].



$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

$$C_p = \frac{P_{turbina\ eolica}}{P_{air}} \quad (2.2)$$

$$P_{turbina\ eolica} = C_p P_{air} = C_p \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.3)$$

El valor máximo del C_p está definido por el límite de Betz que establece que una turbina nunca puede extraer más del 59.3% de la potencia de una corriente de aire, los rotores de las turbinas eólicas están comprendidas para valores máximo de C_p o coeficiente de potencia entre el rango de 25 – 45% [3].

También es convencional definir una relación de velocidad de punta λ como [3]:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (2.4)$$

La relación de velocidad de punta λ y el coeficiente de potencia C_p son adimensionales y por ende se puede utilizar para describir el rendimiento de cualquier tamaño de rotor de una turbina eólica [3].

Turbinas eólicas de velocidad variable.

Su diseño permite una máxima eficiencia aerodinámica sobre un ancho rango de velocidades del viento ya que permite adaptar de forma continua la velocidad de rotación de la turbina con respecto a la velocidad del viento, es decir, este sistema permite que el par del generador se mantenga lo más constante posible y las variaciones de la velocidad del viento sean absorbidas por cambios en la velocidad del generador [8], [9].

Ventajas [8], [9]

- Mayor captación de energía
- Se puede controlar de forma independiente la potencia activa y reactiva que se suministre a la red eléctrica
- Es accesible controlar el flujo de potencia entre el estator y rotor
- Mejor calidad de energía y reducción del estrés mecánico.

Desventajas [8], [9]

- Mayor costo para su aplicación a diferencia de la velocidad fija
- Se requiere de una caja multiplicadora
- Es necesaria la conexión eléctrica entre un sistema fijo y uno giratorio de manera que sea accesible controlar la potencia del rotor a través del convertidor de potencia
- Perdidas en el convertidor electrónico
- Mayor cantidad de componentes.

Turbina eólica de velocidad constante.

La velocidad en este tipo de turbinas es fija, es decir indistintamente a las características que proporcione el viento en condiciones y tiempos determinados esta es adaptada para que la velocidad de su rotor sea constante y este en concordancia con la frecuencia del sistema eléctrico de potencia con el cual se encuentra operando, el generador empleado en este tipo de sistema es de inducción jaula de ardilla conectado directamente

a la sistema o red eléctrica a través de un arrancador y de un banco de capacitores para compensación de potencia reactiva [8], [9], [12].

Ventajas [8], [9], [12]

- Su diseño es realizado de tal forma que esta aproveche la máxima eficiencia con velocidades regulares del viento, la finalidad de ello es el incremento en la producción de energía eléctrica generada
- Confiables, simples, robustez simple y los costos de las partes eléctricas son bajos
- No necesita conexión eléctrica entre el sistema fijo y el rotor.

Desventajas [8], [9], [12]

- El control de velocidad es limitado ya que esta puede variar en un rango estrecho
- No proporciona un soporte de voltaje al sistema eléctrico debido a que su comportamiento en la red es semejante al de una carga inductiva cuyo valor no puede ser controlado
- El consumo de potencia reactiva es elevado
- Agotamiento mecánico y control limitado de calidad de la energía
- Las variaciones de la velocidad del viento son transmitidas como fluctuaciones en el par mecánico y por consiguiente como fluctuaciones en la potencia eléctrica

- Cuando la red eléctrica es débil se pueden producir fluctuaciones en el voltaje mismas que reflejaran pérdidas significativas en la línea de transmisión
- Necesita una caja de engranajes multiplicadora.

Turbinas eólicas controladas por inclinación.

En este tipo de turbinas el controlador electrónico verifica la potencia de salida de la turbina varias veces por segundo, si esta potencia es demasiado alta envía un mensaje u orden a la cuchilla o mecanismo de inclinación el cual tras la recepción de la orden gira de forma inmediata las palas del rotor ligeramente fuera del viento cada que este cae; estas palas deben poder girar alrededor de su eje, el mecanismo de inclinación generalmente se opera mediante accionamientos eléctricos u hidráulicos la ventaja de este tipo de control es que permite controlar la potencia el arranque y paradas de emergencia [9], [11].

Turbinas de viento con control de paro.

Tienen las palas atornilladas al cubo en un ángulo fijo, este bloqueo funciona aumentando el ángulo del viento relativo cuando golpea las palas, reduciendo la resistencia inducida; cuando el alabe de la turbina se para tienen un lado plano en dirección al viento, a medida que la hoja se desplaza a lo largo de su eje longitudinal se encontrará ligeramente torcida de forma que si el rotor se apaga lo haga paulatinamente en lugar de abruptamente cuando la velocidad del viento llegue a valores críticos, una de las ventajas de este tipo de turbinas es que evita las piezas móviles en el rotor y un complejo sistema de control [9], [11].

Turbinas de viento controladas por parada activa

Es un mecanismo de control que técnicamente se asemeja al mecanismo de las maquinas con control de inclinación, para tener un par de torsión razonablemente grande a bajas velocidades del viento, suelen estar programadas para inclinar mucho sus palas, sin embargo, cuando la turbina alcanza su potencia nominal se evidenciaran cambios producidos en la misma, de igual manera, si el generador se encuentra sobrecargado sus alabes se moverán en dirección opuesta es decir aumentará el ángulo de las palas del rotor mecanismo que ayudara a desperdiciar el exceso de energía existente la desventaja de este tipo de control es el alto costo de implementación debido a su mecanismo de inclinación [9], [11].

Turbinas de viento con velocidad variable limitada.

Usa un generador de inducción de rotor devanado, mismo que posee una resistencia variable en su rotor, su conexión con la red se da de forma directa y es indispensable el uso de un banco de capacitores para compensar la potencia reactiva. La resistencia ubicada en el rotor permite controlar el deslizamiento de tal manera que el control de la potencia que se entregara al sistema puede ser controlada [9], [11].

Esquema de protección de fallas y clasificación de apartamentos.

En un sistema convencional de generación eléctrica se suelen presentar corrientes de fallas, lo mismo ocurre con la generación eólica; la contribución de estas turbinas eólicas a la corriente de falla depende mucho del tipo de tecnología del generador a usarse, las turbinas que usualmente representan más contribuciones a la corriente de falla de la red son las de velocidad fija [3].

Sin embargo, el uso de generadores inducción contribuye a que solo suelen originarse sub-transitorios, corrientes de falla que su orden de duración se encuentra por debajo de los 200 ms a fallas trifásicas balanceadas pero puede suministrar corrientes de fallas sostenida a fallas desequilibradas. Los generadores de inducción doblemente alimentados también contribuyen a la corriente de falla de la red, con el control de los convertidores de potencia que esta tecnología posee es posible la detección de la falla de forma inmediata por la sensibilidad de la electrónica de potencia ante la presencia de sobrecorrientes [3].

Este tipo de aerogenerador tiene la capacidad de desconectarse rápido de la red eléctrica y la palanca activada para cortocircuitar los devanados del rotor del devanado del generador de inducción a menos que se tomen las debidas precauciones para garantizar el código de seguridad de la red [3].

Calidad de potencia.

Se pueden considerar dos aspectos en la calidad de la energía que suministra un sistema eólico como son [3]:

- El voltaje
- La distorsión armónica y el parpadeo

La distorsión armónica está asociada principalmente con los aerogeneradores de velocidad variable porque contienen convertidores electrónicos de potencia que son una fuente importante de corrientes armónicas de alta frecuencia [3].

En los parques eólicos de grandes extensiones este aspecto es muy preocupante ya que las redes de cables pueden conducir a altas resonancias armónicas causada por tensiones armónicas existentes en el sistema de alimentación o por los convertidores de los aerogeneradores. En aerogeneradores que usan velocidad fija las fluctuaciones causadas por el viento dan lugar a fluctuaciones en la potencia de salida debido a que no existe un búfer de energía entre la entrada mecánica y la salida eléctrica [3].

2.1.1. Impactos en todo el sistema.

Según [3], la energía eólica a más de los impactos locales generados también suele generar una serie de impactos en todo el sistema, por ejemplo:

1) Estabilidad y dinámica del sistema de potencia.

Los generadores de inducción de jaula de ardilla utilizados en turbinas con velocidad fija pueden causar daños locales, como el colapso de tensión cuando la velocidad del rotor está fuera de control, durante una falla, se acelera debido al desequilibrio que se genera a razón de la variación entre la potencia mecánica del viento y la potencia eléctrica suministrada a la red eléctrica [3], [13].

Cuando la falla es eliminada absorben la potencia reactiva afectando el voltaje de la red, si el voltaje no es recuperado de forma inmediata los aerogeneradores seguirán acelerándose y por ende seguirán consumiendo grandes cantidades de reactivos. Esto conlleva a la inestabilidad del voltaje y de la velocidad del rotor [3], [13].

A diferencia de los generadores síncronos cuyos excitadores aumentan la salida de la potencia reactiva durante el decremento del voltaje de la red y, por ende, admiten la recuperación del voltaje después de una falla. Los generadores de jaula de ardilla tienden a impedir la recuperación del voltaje [3], [13].

En aerogeneradores de tecnología variable la sensibilidad de la electrónica de potencia a las sobrecorrientes originadas por las depresiones de voltaje de la red puede generar graves consecuencias para la estabilidad del SEP,

si el nivel de penetración de los aerogeneradores de velocidad variable en el sistema es alto y se desconectan con reducciones de voltaje relativamente pequeñas, una caída de voltaje en un área geográfica amplia puede generar un gran déficit de generación [3], [13].

Esta caída de tensión podría darse a causa de una falla en la red de transmisión para evitar este inconveniente las compañías de la red y los operadores del sistema de transmisión requieren que los aerogeneradores dispongan de una capacidad camino por la falla (*Fault ride through*) y sean capaces de soportar caídas de voltajes de ciertas magnitudes y duraciones. Esto evita la desconexión de una gran cantidad de energía eólica en caso de una falla de red remota [3], [13].

2) Potencia reactiva y soporte de voltaje.

La tensión de una red de transmisión está determinada por la interacción de los flujos de potencia reactiva con la inductancia reactiva de la red, los generadores de inducción de velocidad fija absorben la potencia reactiva para mantener su campo magnético y no tienen control directo sobre su flujo de potencia reactiva, en el caso de los generadores de velocidad fija, la única manera de soportar el voltaje de la red es reducir la potencia reactiva extraída de la red por el uso de compensadores shunt [3], [13].

Los aerogeneradores de velocidad variable tienen la capacidad de control de potencia reactiva, además tienen la capacidad de soportar el voltaje de la red a la cual se encuentran conectados [3], [13]. En muchas ocasiones el control de voltaje y potencia reactiva en el punto de conexión del parque se logra mediante el uso de equipos compensadores de reactivos como compensadores (SVCs) o (STATCOMs) [3], [13].

3) Soporte de frecuencia.

Para proporcionar soporte de frecuencia desde una unidad de generación, la potencia del generador debe aumentar o disminuir a medida que cambia la frecuencia del sistema [3], [13]. Por ende, para responder al decremento de frecuencia de la red, es necesario descargar la turbina eólica dejando un margen para el aumento de potencia, una turbina eólica de velocidad fija puede descargarse si el ángulo de inclinación se controla de manera que una fracción de la potencia que podría ser extraída del viento se derrame. Se puede descargar una turbina eólica de velocidad variable operándola lejos de la curva de extracción de potencia máxima, dejando un margen para el control de la frecuencia [3], [13].

Generadores de inducción aislados y conectados a la red existente.

Los generadores pueden encontrarse conectados o aislados del sistema eléctrico de potencia, sin embargo, en caso de estar aislados es necesario que la maquina se encuentre conectada con capacitores de tal forma que estos suministren la potencia reactiva requeridas por el generador y las cargas ingresadas [14].

Generadores conectados la red y su acoplamiento

Existen diversos tipos de acoplamiento para generadores que se encuentran conectados al sistema eléctrico de potencia, entre ellos tenemos los siguientes:

Acoplado directamente a la red.

Este tipo de acoplamiento gira a una velocidad fija dada por la frecuencia de la red, este acoplamiento es usado en generadores de baja potencia y su principal desventaja es que al producirse algún fallo o perturbación el sistema se verá directamente afectado [14], [15].

Acoplado a la red a través de un sistema rectificador – inversor.

En este tipo de acoplamiento el generador se conecta a un rectificador luego hay un sistema de corriente continua, por último, a un inversor para que la corriente suministrada al sistema sea alterna, a diferencia del acoplamiento directo este acoplamiento es más costoso y menos usado, sin embargo, este transfiere menos perturbaciones a la red eléctrica [14], [15].

Acoplado con deslizamiento mecánico.

En este se emplea un rotor del tipo bobinado haciendo uso de la electrónica de potencia es posible manipular o variar su resistencia lo que permite el cambio de velocidad de giro en la máquina, debido a esto se ve alterada la eficiencia del generador; por ello su uso debe considerar este efecto [14], [15].

Doblemente alimentado o doblemente acoplado.

En este acoplamiento los devanados del estator se conectan de forma tradicional a la red trifásica, mientras que los del rotor se conectan a un sistema conversor-inversor. Esta conversión permite la modificación de la magnitud y el ángulo de voltaje del rotor de tal forma que se puede controlar tanto la potencia activa como la reactiva [14], [15].

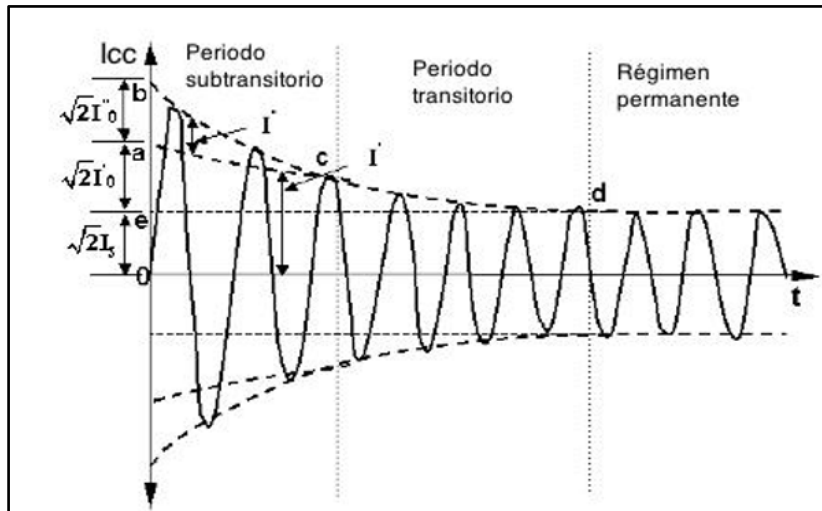
Estimación de los parámetros del modelo matemático.

Pruebas de corto circuito.

Se aplica un corto-circuito en los terminales de la máquina mientras esta se opera a velocidad nominal y en circuito abierto o vacío, cuando se aplica esta prueba se generan corrientes en el estator que contienen componentes simétricas y asimétricas. A esos registros se les determina su envolvente y se identifican regiones conforme al tiempo de respuesta, la importancia de esta radica en que permite la identificación de características del circuito a medir [14], [16], [17].

En la figura 5 se puede observar el comportamiento de los valores de la corriente estos decaen con una envolvente que termina en un valor de corriente de estado estacionario; como conclusión tenemos que esta prueba no proporciona parámetros del eje q con precisión y a su vez esta expone a la máquina a esfuerzos eléctricos y mecánicos muy drásticos [16], [17].

Fig. 0.1 Corriente del estator después de aplicado el cortocircuito [21].



Pruebas de rechazo de carga.

Se lleva a la máquina síncrona a determinados procesos de operación de tal manera que el comportamiento transitorio tras la apertura del interruptor se mantiene solo en el eje que se está estudiando sea el eje directo o en cuadratura. Luego de definir estas condiciones iniciales se provoca el rechazo de carga de la unidad y se registra la evolución temporal de la corriente y tensión de campo del generador, así como la tensión en los bornes de esta [16]–[18].

Al momento de realizar esta prueba se debe constatar que el eje directo de la máquina se encuentre conectado con la red con un valor de cero potencias activas y entregando potencia reactiva de tal forma que el flujo solo exista en el eje directo lo que supone que $I_q = 0$, y la corriente se encuentre alineada con este. Se debe verificar que el generador no opere en la zona saturada lo que implica una condición ligeramente sub-excitada [16]–[18].

Luego de estas condiciones se abre súbitamente el interruptor del generador y se registra la tensión en los terminales del generador [16]–[18]. Para determinar los parámetros del eje de cuadratura, se debe operar el generador de tal forma que toda la corriente en el estator quede alineada al eje de cuadratura de manera que, $I_d = 0$. Esto se obtiene ajustando la potencia reactiva de manera que el ángulo de carga coincida con el ángulo entre la tensión y la corriente de los terminales, este es el punto donde se realiza el rechazo de carga [18], [19].

Pruebas de respuesta en frecuencia.

En esta prueba la máquina está libre de conexiones en el estator y el campo aquí se mide la respuesta a la frecuencia entre los devanados de campo y del estator cuando el rotor se encuentra parado. Se aplica una señal de corriente entre dos terminales del estator, con el campo abierto o en cortocircuito y se analiza la función de transferencia entre el voltaje y la corriente [16], [20].

Respuesta en circuito abierto.

En esta prueba la unidad trabaja en circuito abierto a voltaje reducido. El campo es excitado a varias frecuencias de esta manera se puede medir la respuesta a la frecuencia en el voltaje del estator, la importancia de esta prueba radica en que al aplicarle diversos niveles de tensión se obtendrán datos acerca de los efectos de la saturación [20].

Pruebas usando perturbaciones.

En esta se registra el comportamiento transitorio del generador al aplicarle perturbaciones en el campo. Se

usan perturbaciones especiales llamadas PRBS (pseudo Random Bynary Sequence), consiste en señales binarias aleatorias que se inyectan con un generador de señales a través de la tensión de referencia del AVR (Automatic Voltage Regulator).

Como conclusión a lo expuesto por los autores [16], [18], [20] la estimación de los parámetros del modelo matemático de la máquina (generador), son requerimientos necesarios para determinar las características, condiciones y funcionamiento de esta ante las eventualidades que pueda llegar a afectar el correcto funcionamiento de la máquina. La finalidad de este proceso de pruebas es encontrar el conjunto óptimo de parámetros que mejor reproduzca el comportamiento dinámico del generador.

Descripción matemática de una máquina síncrona.

En lo expuesto por [20] indica que para desarrollar las ecuaciones matemáticas de la máquina síncrona se hacen las siguientes suposiciones:

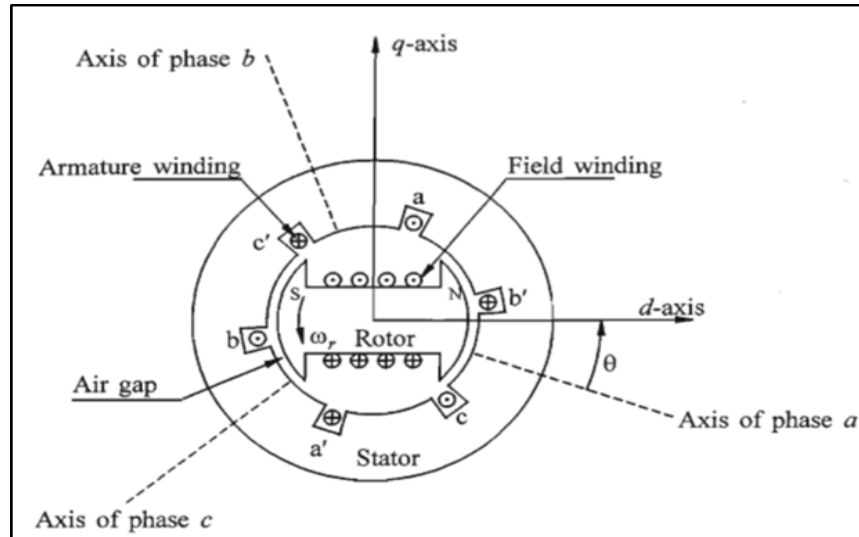
2. Los devanados del estator están distribuidos de forma sinusoidal
3. Las ranuras del estator no causan una variación apreciable de las inductancias del rotor con la posición del rotor
4. Se desprecia la histéresis magnética
5. Los efectos de la saturación magnética son despreciables.

El supuesto 4 es importante ya que, si descuidamos la saturación magnética, estamos obligados a trabajar con circuitos lineales, sin embargo, es importante considerar los efectos causados por la saturación, por ende, las ecuaciones de la máquina se desarrollarán como primera instancia bajo el supuesto de que existen flujos de corriente lineales, luego se realizara por separado las ecuaciones considerando los efectos de la saturación magnética [20].

Circuitos simples

Los circuitos del estator consisten en devanados de inducido trifásicos que transportan corriente alterna, los circuitos del rotor comprenden bobinados de campo y de amortizador y el devanado de campo se encuentra conectado a una fuente de corriente continua; Para determinación del análisis se puede suponer que las corrientes en el amortizador fluyen en dos conjuntos de circuitos cerrados, un conjunto en el cual el flujo está en línea con el de campo a lo largo del eje **d** y el otro conjunto cuyo flujo está en ángulos rectos al eje de campo o eje **q** [20].

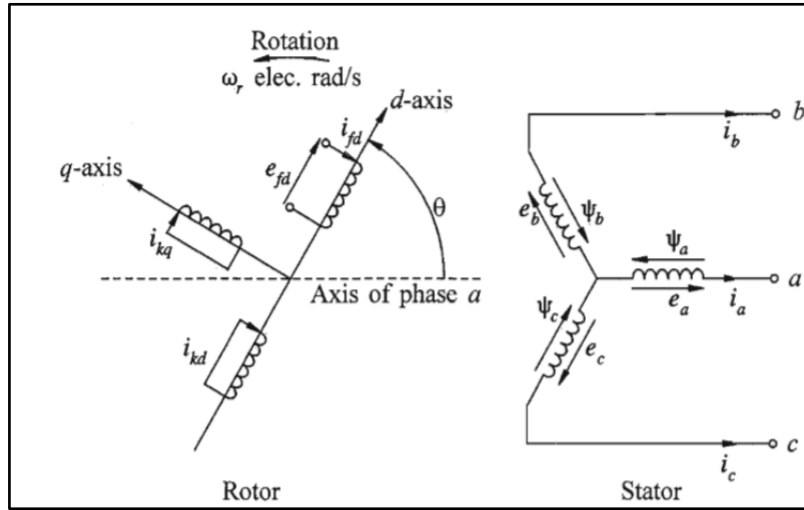
Fig. 0.1 diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica [25].



En la figura 6 y 7 θ se define como el ángulo por el cual el eje **d** dirige la línea central de un devanado de fase en la dirección de rotación. Debido a que el rotor se encuentra girando con respecto al estator el ángulo θ está aumentando continuamente y está relacionado con la velocidad angular ω_r del rotor o el tiempo t [20].

$$\theta = \omega_r t \quad (2.5)$$

Fig. 0.2 Circuitos equivalentes del estator y rotor de una máquina síncrona [25].



Ecuaciones básicas de una máquina síncrona.

Las ecuaciones de voltaje de las tres fases están expresadas de la siguiente forma [20]:

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a = P\psi_a - R_a i_a \quad (2.6)$$

$$e_b = P\psi_b - R_a i_b \quad (2.7)$$

$$e_c = P\psi_c - R_a i_c \quad (2.8)$$

El enlace de flujo o flujo en la fase de un bobinado en cualquier instante está determinado por:

$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} + l_{akd}i_{kd} + l_{akq}i_{kq} \quad (2.9)$$

Se aplican similares expresiones para los enlaces de flujo de los devanados **b** y **c**, para ello las unidades utilizadas

son webers, amperios y henrios. El signo negativo asociado con las corrientes de bobinado del estator se debe a su dirección [20].

- **Inductancia mutua entre los devanados del estator y rotor**

$$l_{afd} = L_{afd} \cos \theta \quad (2.10)$$

$$l_{akd} = L_{akd} \cos \theta \quad (2.11)$$

$$l_{akq} = L_{akq} \cos \left(2\theta + \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.12)$$

Ecuaciones del circuito del rotor.

Las ecuaciones de voltaje en el circuito del rotor son [20]:

$$e_{fd} = P\psi_{fd} + R_{fd}i_{fd} \quad (2.13)$$

$$0 = P\psi_{kd} + R_{kd}i_{kd} \quad (2.14)$$

$$0 = P\psi_{kq} + R_{kq}i_{kq} \quad (2.15)$$

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{afd}i_{fd} [i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)] \quad (2.16)$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{akd}i_{fd} [i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)] \quad (2.17)$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} + L_{akq} [i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right)] \quad (2.18)$$

Transformada de Park o dq0.

Las ecuaciones asociadas con el circuito del estator y del rotor describen el rendimiento de una máquina asíncrona, sin embargo, estas ecuaciones contienen términos de inductancias que varían con el ángulo θ que, a su vez varía con el tiempo, por ello se hace la transformación a una imagen física más clara misma que se obtiene mediante la transformación de las variables del estator [20].

En condiciones balanceadas [20]:

$$i_a = i_m \sin \omega_s t \quad (2.19)$$

$$i_b = I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.20)$$

$$i_c = I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.21)$$

$$i_d = \frac{2}{3} I_m \sin(\omega_s t + \theta) \quad (2.22)$$

Las constantes k_d y k son arbitrarias y sus valores se pueden elegir para simplificar los coeficientes numéricos en las ecuaciones de rendimiento. Para que el valor pico de i_d sea igual al de I_m , k_d debe ser igual a $\frac{2}{3}$.

$$i_q = -k_q \frac{3}{2} I_m \cos(\omega_s t - \theta)$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c) \quad (2.23)$$

En condiciones balanceadas $i_a, i_b, i_c = 0$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

La inversa está dada por:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

- **Enlaces de flujo del estator en componentes dq0**

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{afd} i_{fd} + L_{akd} i_{kd} \quad (2.26)$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{akq} i_{kq} \quad (2.27)$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0 \quad (2.28)$$

- **Acoplamiento del flujo del rotor en componentes dq0**

$$\psi_{fd} = L_{ffd} i_{fd} + L_{fkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{afd} i_d \quad (2.29)$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd} i_{fd} + L_{kkd} i_{kd} - \frac{3}{2} L_{akd} i_d \quad (2.30)$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq} i_{kq} - \frac{3}{2} L_{akq} i_q \quad (2.31)$$

- **Voltajes en el estator**

$$e_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d \quad (2.32)$$

$$e_q = p\psi_q + \psi_d p\theta - R_a i_q \quad (2.33)$$

$$e_0 = p\psi_0 - R_a i_0 \quad (2.34)$$

La transformación de las ecuaciones anteriores son el resultado de la conversión de un marco de referencia estacionario a uno de rotación estas representan el hecho de que una onda de flujo que gira en sincronismo con el rotor creará voltajes en la bobina del inducido estacionario. Los términos $\psi_q p\theta$ y $\psi_d p\theta$ se conocen como voltajes de velocidad debido a su variabilidad en el espacio y los términos $p\psi_d$ y $p\psi_q$ como voltajes en el transformador debido al cambio de flujo en el tiempo [3], [20].

- **Potencia eléctrica y par**

$$P_t = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q + 2e_0 i_0) \quad (2.35)$$

En condiciones equilibradas $e_0 = i_0 = 0$ y la expresión de la potencia está determinada por [20]:

$$P_t = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q) \quad (2.36)$$

$$Q = \frac{3}{2}(e_q i_d + e_d i_q) \quad (2.36)$$

$$T_e = \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{\omega_r}{\omega_{mec}}$$

$$= \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{P_f}{2} \quad (2.37)$$

Representación en por unidad.

- **Voltaje del estator en pu**

$$\bar{e}_{ds} = \bar{P}\bar{\psi}_{ds} - \bar{\psi}_{qs}\bar{\omega}_s - \bar{R}_a\bar{i}_d \quad (2.38)$$

$$\bar{e}_{ds} = -\bar{\psi}_{qs}\bar{\omega}_s - \bar{R}_s\bar{i}_{ds} \quad (2.39)$$

$$\bar{e}_{qs} = \bar{P}\bar{\psi}_{qs} - \bar{\psi}_{ds}\bar{\omega}_s - \bar{R}_a\bar{i}_q \quad (2.40)$$

$$\bar{e}_{qs} = \bar{\psi}_{ds}\bar{\omega}_s - \bar{R}_s\bar{i}_{qs} \quad (2.41)$$

$$\bar{e}_0 = \bar{P}\bar{\psi}_0 - \bar{R}_a\bar{i}_0 \quad (2.42)$$

La derivada de unidad de tiempo \bar{P} que aparece en las ecuaciones está determinada por [20]:

$$\bar{P} = \frac{d}{d\bar{t}} = \frac{1}{\omega_{base}} \frac{d}{dt} = \frac{1}{\omega_{base}} P \quad (2.43)$$

- **Voltaje de rotor en pu**

$$\bar{e}_{fd} = \bar{P}\bar{\psi}_{fd} + \bar{R}_{fd}\bar{i}_{fd} \quad (2.44)$$

$$0 = \bar{P}\bar{\psi}_{kd} + \bar{R}_{kd}\bar{i}_{kd} \quad (2.45)$$

$$0 = \bar{P}\bar{\psi}_{kq} + \bar{R}_{kq}\bar{i}_{kq} \quad (2.46)$$

$$\bar{e}_f = \bar{R}_f\bar{i}_f \quad (2.47)$$

- **Flujo del estator en pu**

$$\bar{\psi}_{ds} = -\bar{L}_d \bar{i}_d + \bar{L}_{afd} \bar{i}_{fd} + \bar{L}_{akd} \bar{i}_{kd} \quad (2.48)$$

$$\bar{\psi}_{ds} = -\bar{L}_{ds} \bar{i}_{ds} + \bar{L}_{md} \bar{i}_f \quad (2.49)$$

$$\bar{\psi}_{qs} = -\bar{L}_q \bar{i}_q + \bar{L}_{akq} \bar{i}_{kq} \quad (2.50)$$

$$\bar{\psi}_{qs} = -\bar{L}_{qs} \bar{i}_{qs} \quad (2.51)$$

$$\bar{\psi}_0 = -\bar{L}_0 \bar{i}_0 \quad (2.52)$$

- **Flujo del rotor en pu**

$$\bar{\psi}_{fd} = \bar{L}_l \bar{i}_f - \bar{L}_{md} \bar{i}_{ds} \quad (2.53)$$

$$\bar{\psi}_{kd} = \bar{L}_{kfd} \bar{i}_{fd} + \bar{L}_{kkd} \bar{i}_{kd} - \bar{L}_{kda} \bar{i}_d \quad (2.54)$$

$$\bar{\psi}_{kq} = \bar{L}_{kk} \bar{i}_{kq} - \bar{L}_{kqa} \bar{i}_q \quad (2.55)$$

- **Torque en pu**

$$T_e = \bar{\psi}_{ds} \bar{i}_{qs} - \bar{\psi}_{qs} \bar{i}_{ds} \quad (2.56)$$

Sustituyendo los términos de flujo en las ecuaciones (2.39), (2.41), (2.49), (2.50), obtenemos [3]:

$$\bar{e}_{ds} = \bar{\omega}_s \bar{L}_{qs} \bar{i}_{qs} - \bar{R}_s \bar{i}_{ds} = \bar{X}_{qs} \bar{i}_{qs} - \bar{R}_s \bar{i}_{ds} \quad (2.57)$$

$$\begin{aligned} \bar{e}_{qs} &= -\bar{\omega}_s \bar{L}_{ds} \bar{i}_{ds} - \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_s \bar{L}_{md} \bar{i}_f \\ &= -\bar{X}_{ds} \bar{i}_{ds} - \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{\omega}_s \bar{L}_{md} \bar{i}_f \end{aligned} \quad (2.58)$$

$\bar{X}_{ds} = \bar{\omega}_s \bar{L}_{ds}$ y $\bar{X}_{qs} = \bar{\omega}_s \bar{L}_{qs}$, mientras tanto de las ecuaciones (2.47) y (2.58) pueden ser reemplazada por \bar{e}_f / \bar{r}_f y con la definición de $\bar{E}_{fd} = \bar{\omega}_s \bar{L}_{md} \bar{e}_f / \bar{r}_f$ obtenemos [3], [20]:

$$\bar{e}_{qs} = -\bar{X}_{ds} i_{ds} - \bar{R}_s \bar{i}_{qs} + \bar{E}_{fd} \quad (2.59)$$

El voltaje en el terminal del inducido se expresa como $\bar{E}_t = -\bar{v}_{ds} + j\bar{v}_{qs}$ de las ecuaciones (2.57) y (2.59) tenemos [3], [20]:

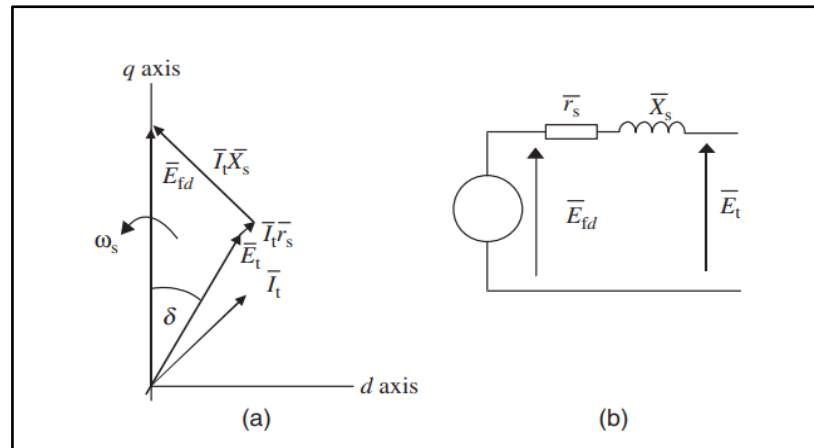
$$\begin{aligned} \bar{E}_t &= -\bar{v}_{ds} + j\bar{v}_{qs} \\ &= -\bar{r}_s (\bar{i}_{ds} + j\bar{i}_{qs}) + (\bar{X}_{qs} \bar{i}_{qs} - j\bar{X}_{ds} i_{ds}) \\ &\quad + j\bar{E}_{fd} \quad (2.60) \end{aligned}$$

Reemplazando $\bar{X}_{qs} = \bar{X}_{ds} = \bar{X}_s$ y $\bar{I}_t = \bar{i}_{ds} + j\bar{i}_{qs}$ la ecuación (2.60) se reduce a [3], [20]:

$$\bar{E}_t = -(\bar{r}_s + j\bar{X}_s) \bar{I}_t + j\bar{E}_{fd} \quad (2.60)$$

Esta ecuación define el estado estable de la maquina síncrona se puede representar mediante el diagrama de fasores de la Figura 8 con su respectivo circuito equivalente:

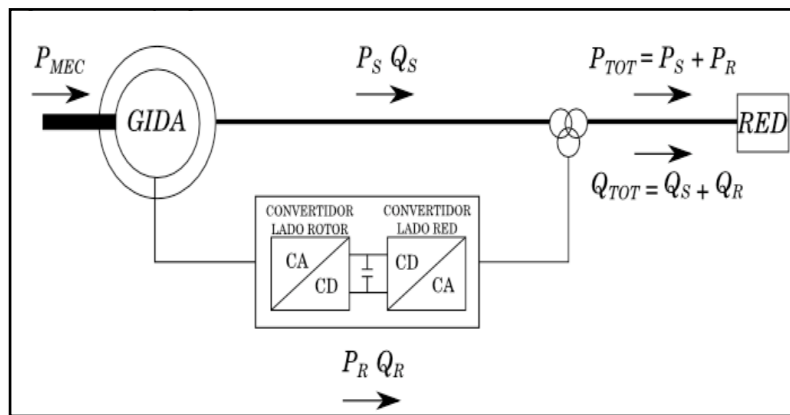
Fig. 0.1 Diagrama fasorial circuito equivalente de la maquina síncrona operando en estado estable [3].



Generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).

El DFIG (Doubly fed induction generator), básicamente es una máquina de inducción de rotor bobinado con los devanados del estator conectados directamente a la red trifásica y los bobinados del rotor conectados a un convertidor de frecuencia de escala parcial de espalda con espalda o convertidor Back to back[4], [21].

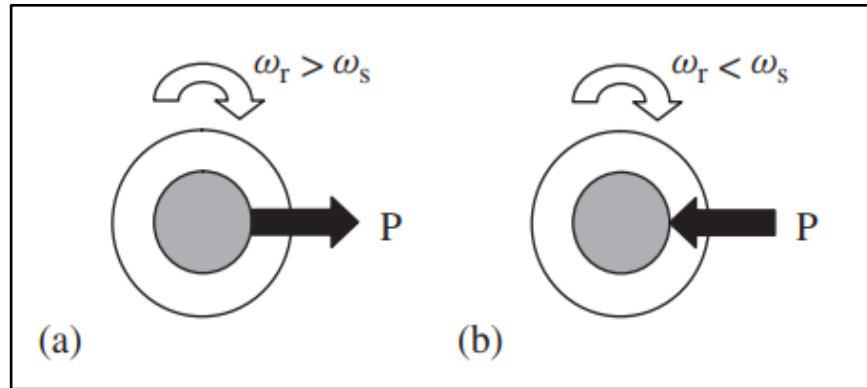
Fig. 0.1 Flujo de potencia en el generador de inducción doblemente alimentado [7].



El generador de inducción de doble alimentación se rige por estos convertidores y sus controladores, tanto en condiciones normales como de fallas, estos convertidores controlan la tensión del rotor en magnitud y ángulo de fase y por lo tanto son usados para el control de la potencia activa como la reactiva que se suministrará a la red [4], [21].

Este generador puede transmitir energía a la red a través del estator y de sus convertidores, cuando este funciona en estado súper-síncrono, la energía es entregada desde el rotor a través de los convertidores a la red, cuando está en modo sub-síncrono, el rotor absorberá la energía de la red a través de los convertidores [3].

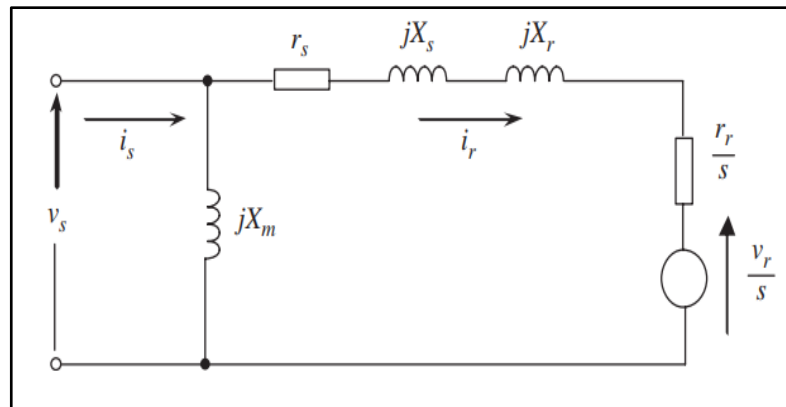
Fig. 0.2 a) modo súper-síncrono b) modo sub-síncrono [3].



Características del DFIG en estado estable.

El modelo del DFIG en estado estable se puede describir utilizando el modelo del circuito equivalente de la Fig. 2.6.3 donde se usa la conversión del motor donde v_r y v_s son los voltajes respectivos del rotor y del estator, i_s e i_r son las corrientes del estator y la del rotor, r_s y r_r son las resistencias por fase del estator y rotor, x_s y x_r son las reactancias de fuga del estator y rotor, x_m es la reactancia magnetizante y s es el deslizamiento [3].

Fig. 0.3 Circuito equivalente del DFIG cuando se inyecta voltaje en el rotor [3].



Donde s es igual a:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (2.61)$$

Las curvas de torsión y deslizamiento para el DFIG se pueden calcular a partir de del modelo del circuito equivalente aproximado de la Fig. 2.6.3 utilizando las siguientes ecuaciones donde la corriente del rotor viene dada por la siguiente expresión [3]:

$$T_e = \left(I_r^2 \frac{r_r}{s} \right) + \frac{P_r}{s} \quad (2.62)$$

El torque eléctrico de la maquina en condiciones balanceadas puede ser calculado por:

$$I_r = \frac{V_s - \left(\frac{V_r}{s} \right)}{\left(r_s + \frac{r_r}{s} \right) + j(X_s + X_r)} \quad (2.63)$$

Las potencias del estator y rotor de la red están determinadas por:

$$P_s = P_m - P_r \quad (2.64)$$

$$P_r = -T(\omega_s - \omega_r) \quad (2.65)$$

$$P_m = (1 - s)P_s \quad (2.66)$$

$$P_g = P_s + P_r \quad (2.67)$$

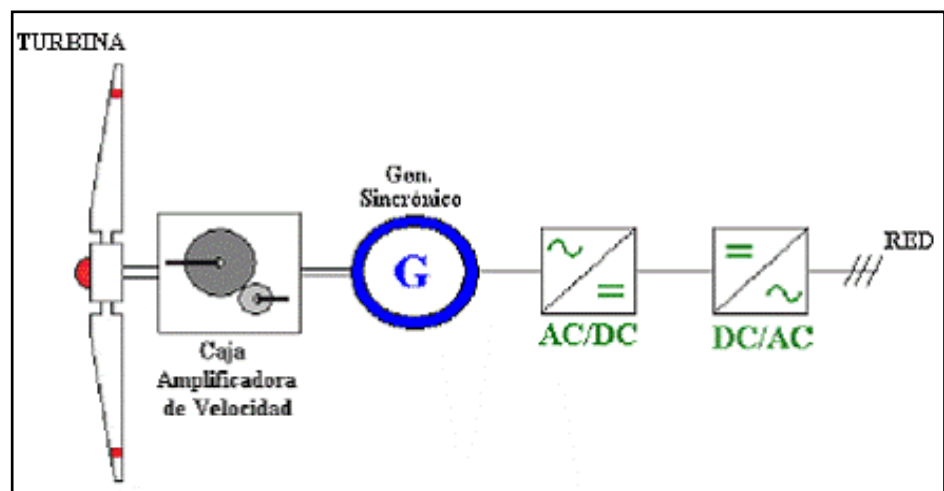
El rango controlable de s determina el tamaño de los convertidores para el DFIG. Las restricciones mecánicas limitan el deslizamiento máximo y un rango de velocidad práctico puede estar entre 0.7 y 0.2 pu [3].

DFIG utilizado en sistemas de generación eólica.

Actualmente en la generación de energía eólica se hace el uso de generadores de inducción doblemente alimentados debido a los grandes beneficios que aporta al sistema eléctrico de potencia, para la generación de energía eléctrica en aerogeneradores se tienen dos tecnologías [22]:

- **Velocidad constante:** en este tipo la energía generada es conectada directamente a la red eléctrica o SEP [22].

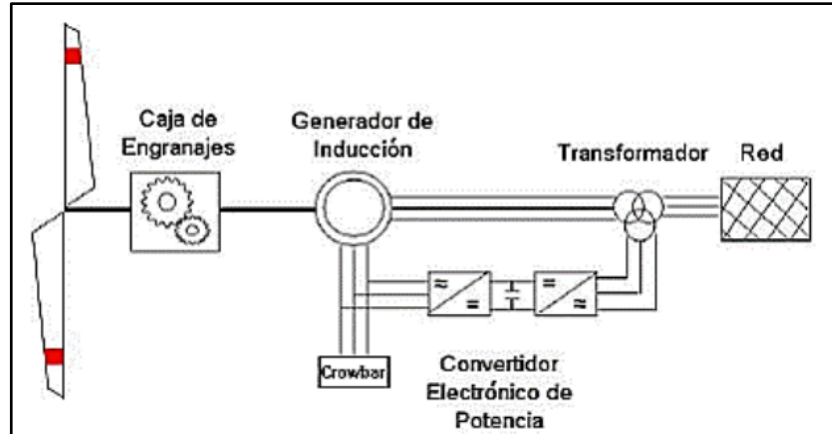
Fig. 0.4 Tecnología de velocidad constante [13].



- **Velocidad variable:** permite el uso óptimo de la energía generada ya que se puede adaptar al generador conforme a la mejor situación de aprovechamiento del

viento, el objetivo principal del convertidor es compensar la diferencia entre la velocidad el rotor y la velocidad síncrona con el control de deslizamiento [11], [22].

Fig. 0.5 Tecnología que usa velocidad variable DFIG [13].



En el modelo del generador doblemente alimentado no importa la velocidad del rotor del generador, por lo tanto, no afecta la velocidad del viento. Al controlar la amplitud y frecuencia de la corriente de CA que ingresan a los devanados del rotor del generador, es posible mantener constantes la amplitud y la frecuencia de los voltajes en el estator producidos por el generador de inducción, a pesar de la variación de velocidad que se presente en el rotor del aerogenerador a causa de fluctuaciones en la velocidad del viento [22].

Esto es muy importante porque a su vez va a permitir que no existan variaciones bruscas de par en el rotor de la turbina eólica disminuyendo de cierta forma la tensión impuesta sobre los componentes mecánicos de la turbina

eólica y suavizando las fluctuaciones de energía eléctrica producidas por el generador [22].

Como conclusión a lo expresado por los autores [4], [21], [22], el uso de los generadores doblemente alimentados es de gran beneficio en los sistemas de generación eólica ya que permite aprovechar de forma eficiente las variaciones del viento sin afectar el estado normal de funcionamiento de la red eléctrica, también es importante recalcar el hecho de que con el uso de este se puede controlar la potencia reactiva que se absorberá o entregará a la red además del control accesible en la amplitud de voltaje y frecuencia del estator del generador.

Características del generador doblemente alimentado utilizado en sistemas de generación eólica.

- Es utilizado para producir una secuencia de tres fases con una secuencia constante.
- Cuando la maquina se encuentra en funcionamiento sub-síncrono el rotor absorbe energía de la red y el estator entrega.
- El convertidor de frecuencia, constituido por dos convertidores back to back y en medio unido por una conexión DC que permitirá regular la tensión, los dispositivos conmutables son IGBT de tal forma que se posibilita el paso de energía en ambos sentidos.

- La energía se puede entregar a la red a través de los circuitos estáticos y rotatorios.
- Cuando la velocidad del generador está por encima del sincronismo el rotor produce energía de la tal forma que los circuitos estáticos y rotatorios entregan energía a la red.
- El sistema de control permite controlar individualmente la potencia activa como reactiva entregada a la red (par y corriente de excitación del rotor).

Ventajas y desventajas del generador doblemente alimentado versus el simple.

A. Ventajas [8], [11], [22], [24]

- Operación a velocidad variable del rotor mientras la amplitud y frecuencia de los voltajes generados permanecen constantes, es decir sin que afecte la velocidad del viento que sopla en el rotor del aerogenerador.
- Control independiente de P (potencia activa) y Q (potencia reactiva) suministrado a la red.
- El flujo de potencia del rotor y el estator puede ser controlado, además la velocidad del rotor es ajustable a las condiciones del viento.
- Optimización de la cantidad de energía generada en función del viento disponible hasta la potencia de salida nominal del generador de la turbina eólica.

- Permite eliminar de forma virtual las variaciones repentinas en el par del rotor y la potencia de salida del generador.
- Permiten el control del factor de potencia.
- El costo del convertidor del DFIG es relativamente más bajo que otros tipos de sistemas.
- La distorsión armónica total es muy baja (THG<3%).

B. Desventajas [8], [11], [22], [24]

- Se requiere de caja multiplicadora.
- Es necesaria la conexión eléctrica entre un sistema giratorio y uno fijo de manera que la potencia del rotor pueda ser controlada por el convertidor de potencia.
- Es indispensable el uso de electrónica de potencia.
- El convertidor electrónico es muy frágil y susceptible a sobrecorrientes.
- Se requiere refrigerado por aire o agua para reducir el tamaño de los gabinetes.
- El voltaje DC del bus es máximo de 1000V.

Efectos de la saturación del flujo magnético principal.

Los efectos de la saturación en el rendimiento de las máquinas de inducción no han sido considerados en diversos estudios realizados a estas máquinas, las

inductancias que caracterizan a la máquina normalmente son consideradas como constantes en los modelos convencionales [25], [26]. En muchos casos, el modelado de las máquinas de corriente alterna bajo los efectos de la saturación se basan en una pequeña linealización de señal alrededor de un punto operativo; existen investigaciones donde se utiliza el concepto de reorientar el eje **d-q** para incorporar los efectos de la saturación especialmente dependiente en la trayectoria del flujo principal [27].

Sin embargo, estas inductancias pueden variar ampliamente dependiendo del estado de flujo en diferentes partes de la máquina; estos niveles de flujo a su vez están determinados por corrientes de la máquina que dependen de los modos de operación lo cual requiere que la máquina esté representada por ecuaciones diferenciales con parámetros no lineales y variables en el tiempo [25], [26].

Si bien los efectos del modelado del flujo principal basado en el componente fundamental de la fuerza magnetomotriz **F_{mm}** han recibido especial atención lo contrario ocurre en la generación de armónicos de flujos más altos debido a la saturación [27]. Los parámetros no lineales que varían en el tiempo caracterizan los modos saturados e insaturados de la operación de las máquinas. El grado de saturación de la inductancia se expresa mediante algunas funciones no lineales en términos de corrientes excitantes [26], [27].

Cuando el sistema se encuentra en estado normal de operación la saturación del flujo magnético principal se puede considerar mediante una curva magnética linealizada alrededor del punto de operación, debido a que el flujo magnético básicamente permanece constante, sin embargo, cuando se produce una gran perturbación las corrientes de estator y rotor aumentarán, ocasionando que el flujo magnético se sature de manera no lineal [28].

En los modelos tradicionales del DFIG se descuida la saturación magnética, transitorios electromagnéticos y otros factores no lineales que pudieran presentarse afectando de cierta forma el control de conducción de bajo voltaje y de igual forma a las protecciones instaladas. Por ende, es de gran importancia la selección de un modelo DFIG que integre los efectos de saturación magnética durante el proceso de análisis de fallas y la operación LVRT¹ [4], [21].

Incorporación de la saturación en los parámetros del modelo constante.

Para el análisis se considera una máquina de CA conectada en estrella cuando se suministra desde una fuente de alimentación sinusoidal, en este caso, la máquina no tendrá componentes armónicas de secuencia cero en la corriente del estator. El flujo de espacio de aire por otro lado, tendrá un contenido armónico que es una función de la saturación de la máquina, luego se deben distinguir los efectos de

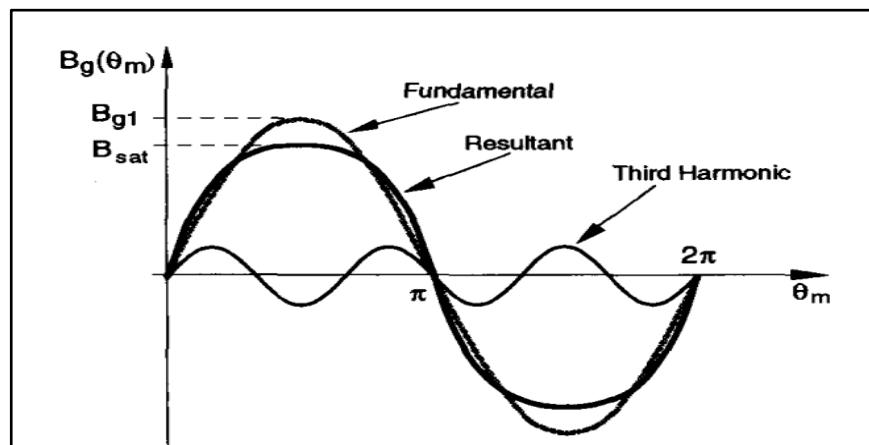
¹ LVRT “Low Voltage Ride Through” demanda que los aerogeneradores se mantengan conectados a la red cuando ocurra un hueco de tensión para determinadas condiciones, de tal manera que ayude a soportar la tensión del sistema entre otros requerimientos [39].

saturación según el lugar donde se produce la saturación [27], [29].

Cuando se produce la saturación en los dientes del estator y del rotor, el flujo de espacio de aire resultante toma una forma sinusoidal aplanada con un valor B pico como se ilustra en la Fig. 2.8.1 [27], [29].

Tiene un contenido armónico que incluye todos los componentes armónicos impares, sin embargo, una expansión de la serie de Fourier del flujo de espacio de aire indica que el tercer armónico es el componente armónico dominante en todos los niveles de saturación [30], [32]. La saturación también puede ocurrir en los núcleos del estator y del rotor, lo que también ocasiona la aparición o introducción de componentes de armónicos en el flujo del espacio de aire [30].

Fig. 0.1 Distribución de densidad de flujo de espacio de aire para una saturación en los dientes del rotor/estator [30].



La saturación del flujo magnético principal se considera mediante una curva no linealizada de la inductancia de magnetización L_m frente a la corriente de magnetización I_{m_0} [28]. La inductancia de magnetización está determinada por su zona de operación su valor depende de manera no lineal del valor de la corriente de magnetización I_m , lo cual se puede expresar mediante:

$$\psi_m(c) = L_m(i_m)i_m \quad (2.68)$$

La corriente de magnetización se calcula mediante:

$$i_m = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (2.69)$$

Las expresiones para el voltaje de salida en cada fase en el controlador:

$$v_a(t) = R_l i_a(t) + L_l \frac{di_a}{dt} + e_a(t) \quad (2.70)$$

$$v_b(t) = R_l i_b(t) + L_l \frac{di_b}{dt} + e_b(t) \quad (2.71)$$

$$v_c(t) = R_l i_c(t) + L_l \frac{di_c}{dt} + e_c(t) \quad (2.72)$$

Mismas que se pueden representar de forma vectorial en los ejes **dq**:

$$v(t) = R_l i_g(t) + L_l \frac{di_g(t)}{dt} + j\omega_l L_l i_l + e_g(t) \quad (2.73)$$

$$v_q(t) = R_l i_q(t) + L_l \frac{di_q(t)}{dt} + w_l L_l i_d(t) + e_q(t) \quad (2.74)$$

$$v_d(t) = R_l i_d(t) + L_l \frac{di_d(t)}{dt} - w_l L_l i_q(t) + e_d(t) \quad (2.75)$$

Con las expresiones planteadas se puede determinar la potencia activa y reactiva respectivamente:

$$P = \frac{3}{2} = R_e \{\vec{v} \vec{l}^*\} = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad (2.76)$$

$$Q = \frac{3}{2} = I_m \{\vec{v} \vec{l}^*\} = \frac{3}{2} (v_q i_d + v_d i_q) \quad (2.77)$$

Si el vector de tensión del sistema de potencia se usa orientado de acuerdo a la posición del sistema dq, entonces el vector tensión puede ser alineado con el eje d. pudiéndose expresar las potencias activa y reactiva como [30]:

$$P = \frac{3}{2} (v_d i_d) \quad (2.78)$$

$$Q = \frac{3}{2} (v_q i_d) \quad (2.79)$$

Las ecuaciones del rotor y estator en los componentes dq son:

$$v_{rd} = R_r i_{rd} - (w_s - w_r) \psi_{rq} + \frac{d}{dt} \psi_{rd} \quad (2.80)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + (w_s - w_r) \psi_{rd} + \frac{d}{dt} \psi_{rq} \quad (2.81)$$

Aduciendo que la maquina trabaja sin saturarse, el flujo del estator será la suma del flujo producido por la corriente que circula o recorre el mismo, más una parte del producido por las corrientes del rotor, siendo la expresión [30]:

$$\psi_r = \left(L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right) i_r + \psi_s \frac{L_m}{L_s} \quad (2.82)$$

Para representar la relación entre ψ_r y ψ_s definiendo:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (2.83)$$

Al introducir las ecuaciones (2.82) y (2.81) en (2.80) y (2.79) obtenemos:

$$v_{rd} = R_r i_{rd} - w_{slip} \sigma L_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{sd} \quad (2.84)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + w_{slip} \sigma L_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + w_{slip} \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \psi_{sd} \quad (2.85)$$

Para incluir el efecto de la saturación se han desarrollado varias formas de modelar la expresión no lineal, una de ellas se expone a continuación [30]:

$$L_m(i_m) = \frac{(\alpha - L_p * i_m)}{(\beta + i_m)} \quad (2.86)$$

Identificación de sistemas.

Actualmente la identificación de sistemas es una herramienta muy utilizada puesto que facilita la obtención de los modelos matemáticos de sistemas dinámicos, que permiten el análisis, simulación, optimización o diagnósticos de fallas [31]. Para realizar la identificación de sistemas es primordial tener un conjunto de datos tanto de entrada como de salida los cuales se obtienen experimentalmente del sistema, de manera que se pueda determinar o elegir el tipo de estructura a utilizar y su respectivo algoritmo de optimización de parámetros [31].

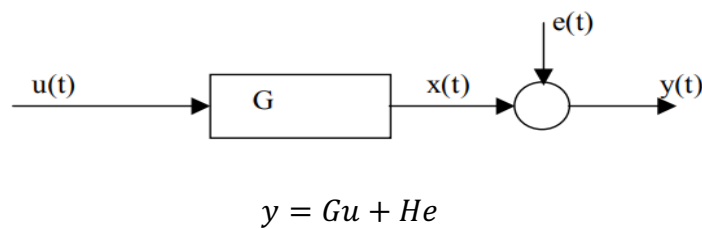
La identificación de sistemas tiene como fin, determinar el modelo que represente de la forma más exacta posible al sistema dinámico a partir de datos medidos y conocimientos previos del mismo [32]. Comúnmente se trabaja con las estimaciones de los parámetros de las partes lineales y mediante el uso de la física se le añade

las no linealidades al modelo, sin embargo, el modelo resultante puede estar alejado del real, pero puede ser considerablemente apto al momento de tomar decisiones oportunas [32].

Identificación lineal de sistemas.

Se puede describir el modelo lineal general de un sistema de manera simbólica como se observa en la Figura 2.9.1.

Fig. 0.1 Representación simbólica del sistema [35].



La salida de medida y , está vinculada a la entrada de medida u y al ruido e , G expresa las propiedades dinámicas del sistema modelado, mientras que H se refiere a las propiedades del ruido describiendo de cierta forma la perturbación en la salida [32]. En sistemas lineales se denomina función de transferencia para la entrada y la salida [32].

Modelo ARX (Auto-Regressive with eXogenous inputs).

Según [31], [32] este modelo se expresa explícitamente de la siguiente manera:

$$\Delta y_k + a_1 \Delta y_{k-1} + a_2 \Delta y_{k-2} = b_1 \Delta u_{k-2} + e_k \quad (2.87)$$

$$\Delta y(z) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) \frac{1}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} e(z)$$

$$= \frac{B}{A} \Delta u \frac{1}{A} e \quad (2.88)$$

Dando lugar a un sistema de ecuaciones donde a y b serán los coeficientes de la función de transferencia discreta adquirida mediante el método de los mínimos cuadrados, el cual permite minimizar la suma de los cuadrados de la parte derecha menos la izquierda con relación a los coeficientes a y b para ello se usa la función Arx del Matlab. El método de variable instrumental también es usado para determinar a y b de forma que el error entre ambas partes no correlacione con alguna combinación lineal de entrada [32].

Modelo ARMAX (AutoRegressive Moving Average eXogen).

En esta estructura se introduce el polinomio C(z) al modelo ARX obteniendo la siguiente expresión [32], [33]:

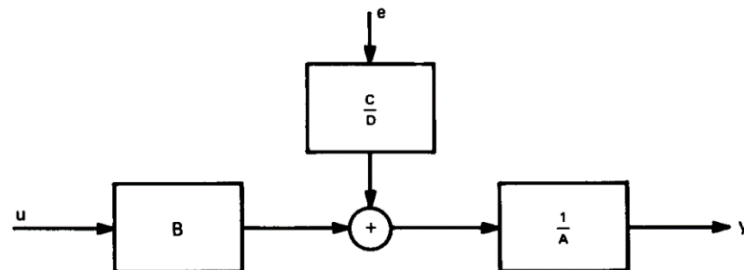


Fig. 0.2 estructura del modelo ARMAX [34].

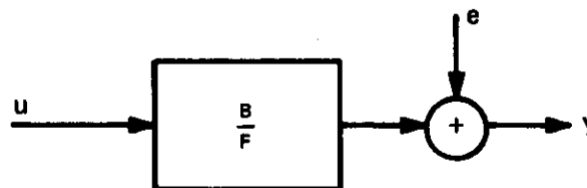
$$\begin{aligned} \Delta y(z) &= \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) + \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} e(z) \\ &= \frac{B}{A} \Delta u \frac{C}{A} e \quad (2.89) \end{aligned}$$

A partir de ello se obtiene un sistema de ecuaciones en esta las incógnitas son coeficientes del modelo discreto y sus soluciones se obtienen por predicción del error con el método máxima verosimilitud, para ello se hace uso de la función armax [32], [33]. A esta salida se le suma un disturbio e que es un ruido previamente filtrado por $C(z)/A(z)$ [33].

Modelo OE (Output error).

A este modelo se le agrega en su salida una disturbio que es directamente un ruido blanco e [33]. En este todas las estructuras del modelo de ecuaciones corresponden a descripciones donde las funciones de transferencia G y H tienen el polinomio A como factor común en los denominadores [34].

Fig. 0.3 estructura del modelo Output error [34].

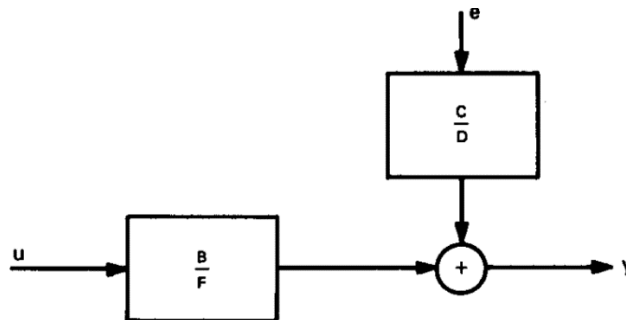


$$\begin{aligned} \Delta y(z) &= \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) + e(z) \\ &= \frac{B}{A} \Delta u + e \end{aligned} \quad (2.90)$$

Modelo BJ (Box Jenkins).

A este modelo se le agrega en su salida un disturbio que es directamente un ruido e anticipadamente filtrado por $C(z)/D(z)$ [36]. De cierta forma esta es la parametrización de dimensión finita más natural, donde las funciones de transferencia se parametrizan independientemente como funciones racionales [34].

Fig. 0.4 estructura del modelo BJ (Box Jenkins) [34].



$$\begin{aligned} \Delta y(z) &= \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \Delta u(z) + \frac{c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2}} e(z) \\ &= \frac{B}{A} u(t) \frac{C}{D} e(t) \end{aligned} \quad (2.91)$$

Esta estructura en realidad puede llevarse a diversos conjuntos de modelos dependiendo de cuál de los cinco modelos de polinomios se usen, varios de estos conjuntos

de modelos son más usados en la práctica por ende tenemos motivos para volver a usarlos en algoritmos explícitos como para resultados analíticos [34].

Identificación no lineal de sistemas.

Estos son sistemas únicos que por su naturaleza no comparten muchas propiedades, en la práctica la mayor parte de los sistemas actúan de forma no lineal, la obtención de estos suele darse cuando un modelo lineal provee un ajuste inadecuado en torno a la medición de las señales de salida y no se puede mejorar modificando la estructura del modelo u orden; estos tienen más flexibilidad en cuanto a la captura de los fenómenos más complejos que los modelos lineales [31].

Modelo NARX.

Este modelo es una extensión del modelo ARX en el caso de modelos no lineales, es un estimador flexible y posee la siguiente estructura:

$$y(t) = f(y(t-1), \dots, y(t-na), u(t-nk), \dots, u(t-nk-nb + 1)) \quad (2.92)$$

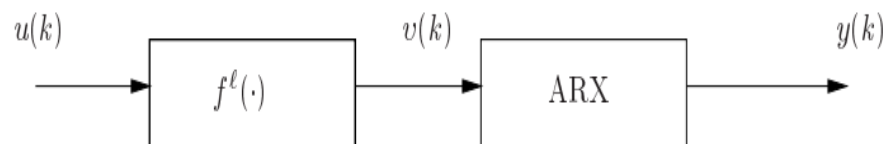
En este modelo f depende del número de entradas anteriores u y salidas y ; na es el número de términos de salidas pasadas y nb corresponde al número de entradas, nk es el retardo desde la entrada hasta la salida, descrito como el número de muestras [31].

Este modelo calcula la salida de y en dos etapas, calculando los valores de los regresores de entradas actuales y anteriores y los datos de salida del pasado; por defecto donde todos los regresores son entradas tanto de la función lineal como del bloque no lineal, el bloque estimador de no linealidad brinda mapa de los regresores a la salida del modelo, utilizando una combinación de funciones lineales y no lineales.

Modelo HW (Hammerstein – Wiener).

Estos son usados como estructura de caja negra, en este solo interesa la función dinámica externa, es decir no figura una visión física en los procesos del sistema [31]. Una particularidad que se le atribuye a este es la representación de los sistemas dinámicos haciendo uso de uno o dos bloques estáticos no lineales en serie con un bloque lineal, este último es una función de transferencia discreta y simboliza el componente dinámico del modelo [31].

Fig. 0.1 modelo de Hammerstein [37].



Se puede decir que este modelo es un caso particular de la representación polinómica de NARX, en los modelos de Hammerstein – Wiener se tiene una sola salida para cada valor de entrada estacionaria correspondiente, sin

embargo, en estado estable este tolera multiplicidad de entradas y solamente una salida [35].

La investigación fue llevada a cabo en el cantón Quevedo, provincia de Los Ríos en las instalaciones del Campus universitario "Ingeniero Manuel Agustín Haz Álvarez", Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicado en la Av. Quito km. 1 1/2 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas.

Para llevar a cabo el presente proyecto fue necesario e indispensable sustentar lo planteado con fuentes de carácter documental y teórica considerando de tal forma las investigaciones existentes con respecto al tema planteado.

La etapa inicial o de preparación previa comprende la familiarización con la saturación como elemento no lineal en la identificación y control de sistemas a través de la consulta de la literatura especializada; para arribar a través de una preparación teórica previa, a una valoración analítica de los métodos de identificación no lineal.

Con la finalidad de llevar a cabo el presente proyecto de investigación, se aplicó los conocimientos adquiridos en el proceso académico, con respecto a las diversas fuentes de generación de energía eléctrica, así como el funcionamiento y componentes que rigen el desempeño óptimo de dichos sistemas. A fin de poder tratar la información obtenida para el desarrollo del modelo pertinente a la investigación.

Con el trabajo realizado en el laboratorio de máquinas eléctricas de la facultad de ciencias de la ingeniería se logró implementar y manipular el funcionamiento del DFIG, de manera que se pudo obtener los datos necesarios para llevar a cabo la modificación y simulación del modelo del generador de inducción doblemente alimentado diseñado por [1], en el cual se incluyó la saturación magnética del núcleo, y a su vez se determinaron las condiciones que permitan proteger a la máquina ante la aparición de estas eventualidades.

Con los conocimientos adquiridos durante el previo estudio de investigaciones publicadas en base a la identificación de sistemas no lineales, se analizaron las características del generador de inducción doblemente alimentado sustentado en las diversas fuentes bibliográficas, se hizo uso de ello para llevar a cabo la simulación del modelo pertinente que permita el cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto de investigación.

Al estudiar el comportamiento del generador de inducción doblemente alimentado y al asociar su funcionamiento de estado normal en sistemas de generación eólica se crearon premisas que permitieron llevar a cabo la simulación respectiva en el software, haciendo trabajar al sistema en condiciones normales y con saturación.

Se hizo uso del laboratorio de máquinas eléctricas y de un software, para simular los procesos oportunos que permitieron llevar a cabo la identificación de sistemas con saturación y las características pertinentes al

funcionamiento del generador de inducción doblemente alimentado cuando trabaja con y sin saturación en sistemas de generación eólica.

Como parte del proceso de profundización en las particularidades y requerimientos de la investigación se realizó una revisión analítica de los métodos de identificación no lineal apropiados para sistemas con saturación, además se obtuvo una caracterización tanto cualitativa como cuantitativa de la saturación y su efecto en el comportamiento de los sistemas.

La máquina fue simulada en el software Matlab/simulink y su respuesta fue medida de forma experimental, las características de la máquina se ilustran en la tabla 4.1.1. Para la obtención de los datos se realizó el montaje de la turbina eólica mediante el acople de un motor y un generador en el laboratorio de máquinas eléctricas, para las mediciones se conectó en estrella los devanados del estator y en circuito abierto los devanados del rotor del generador

Tabla 0.1 características del DFIG [1]

Características del DFIG	
Tensión	690V
Resistencia del estator	0.0035 Ω
Resistencia del rotor	0.0031 Ω
Inductancia del estator	8.84801e-5 H
Frecuencia nominal	60Hz
Numero de polos	4
Inductancia mutua constante	0,00621 H
Inductancia del rotor	1.289e-4 H

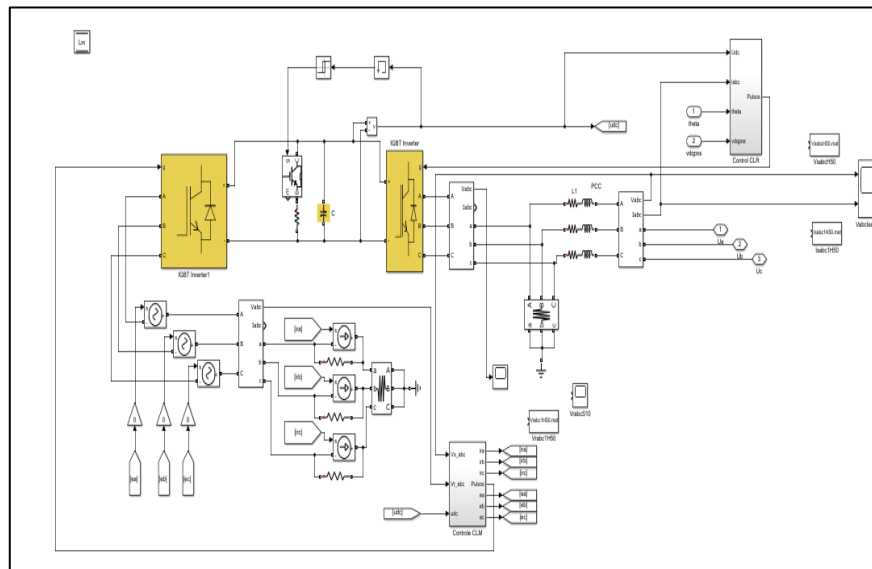
Fuente: [1].

Elaborado por: Autora

Esto permitió obtener datos de voltajes, corriente y potencia para cada fase tanto del rotor como del estator, mismos que fueron procesados en la hoja de cálculo de Excel para la obtención de la curva de saturación de la máquina y demás parámetros requeridos para realizar las modificaciones al modelo DFIG trabajado en [1], a fin de efectuar los análisis pertinentes.

El sistema modelado en la figura 4.1.1 corresponde al sistema estudiado por [1], mismo que ha sido modificado y adaptado a las necesidades del actual proyecto de investigación.

Fig. 0.2 sistemas de control para el rotor y estator [1].



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: [1].

En la figura 4.1.1 se visualiza el modelo del sistema de control con sus respectivos bloques de control para el voltaje en el estator y la velocidad en el rotor, a más de eso, estos controles son de gran ayuda para limitar el deslizamiento de la máquina por lo tanto el voltaje debe ser proporcionado por el convertidor del rotor puesto que

el torque electromagnético, la potencia activa y reactiva del rotor y estator son controladas a través del ajuste de amplitud, frecuencia y fase del voltaje introducido en el rotor [36].

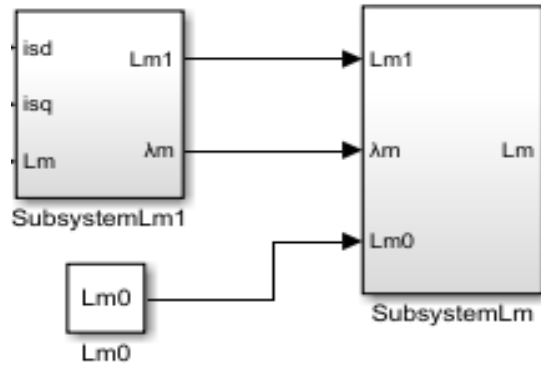
Adicional a esto, se tiene un convertidor de lado de la red y sus respectivos controles basados en dos PIs que trabajan en los ejes de referencia rotatorios dq , este es el encargado de controlar y mantener constante la tensión continua. Para controlar la corriente en el modelo estudiado por [1] se implementó un lazo de control interno, además de la implementación de un controlador para la potencia reactiva, los estimadores de flujo y un bloque para el cálculo del vector de voltaje.

Incorporación de la saturación al modelo DFIG.

Hay varias formas de incluir la saturación magnética en el modelo de una máquina de inducción, en el actual proyecto de investigación la saturación magnética se incluye en el modelo del DFIG como en [1], a través de una ecuación matemática polinómica misma que representa la variación del flujo magnético con respecto a la corriente de magnetización, para determinar esta ecuación se hizo trabajar a la máquina a velocidad síncrona a través un primo motor, se aplicó un voltaje al estator y rotor del DFIG el cual se varió desde 0 hasta 130% de su valor nominal, para cada valor de voltaje se realizaron mediciones de potencias, corrientes, voltajes tanto del rotor como estator y la velocidad del rotor.

Fig. 0.1 Bloque de incorporación de la saturación

[1].



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: [1].

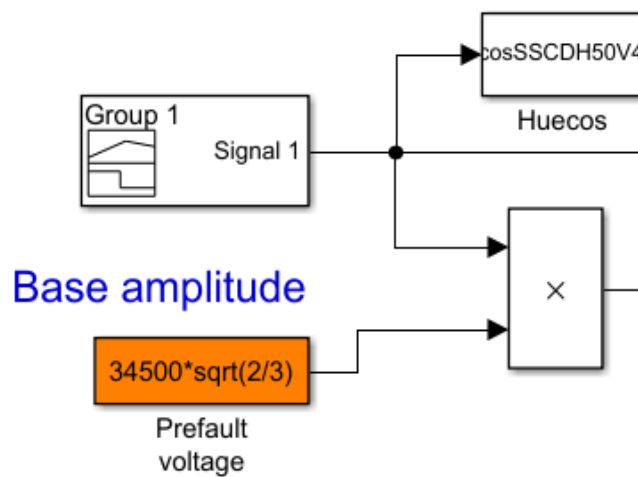
Por consiguiente se procedió a hallar la característica de magnetización del generador de inducción doblemente alimentado, a este se realizó las pruebas y simulaciones pertinentes a fin de estipular ciertas condiciones de funcionamiento de la máquina además de hallar las curvas normalizadas y aproximadas que permitan reflejar cuando el sistema entre en periodo de saturación. Estos parámetros de la máquina fueron efectuadas por [1] en dos bloques de Matlab/simulink, al cual se le realizó las respectivas modificaciones de forma que permita establecer el valor de L_m con el cual se debe trabajar en el modelo de la máquina.

Comportamiento del modelo con saturación y sin saturación.

Para la simulación se generaron huecos de tensión y sobretensiones como en [1] creados en el bloque Signal Builder en Matlab/simulink este es un generador de señales que permite el cambio de la tensión de alimentación al porcentaje que se desee. Se trabajó con y sin saturación, con huecos de tensión del 30%, 50%, 90% y con pulsos de

120 ms, las variables analizadas son potencia activa, potencia reactiva, velocidad del rotor, torque electromagnético corriente de rotor y estator; el sistema trabajará en lazo cerrado en relación al control de velocidad del rotor y la entrada de referencia es la velocidad del viento la cual es variada en cada modelo a simular y el voltaje nominal es de 690V.

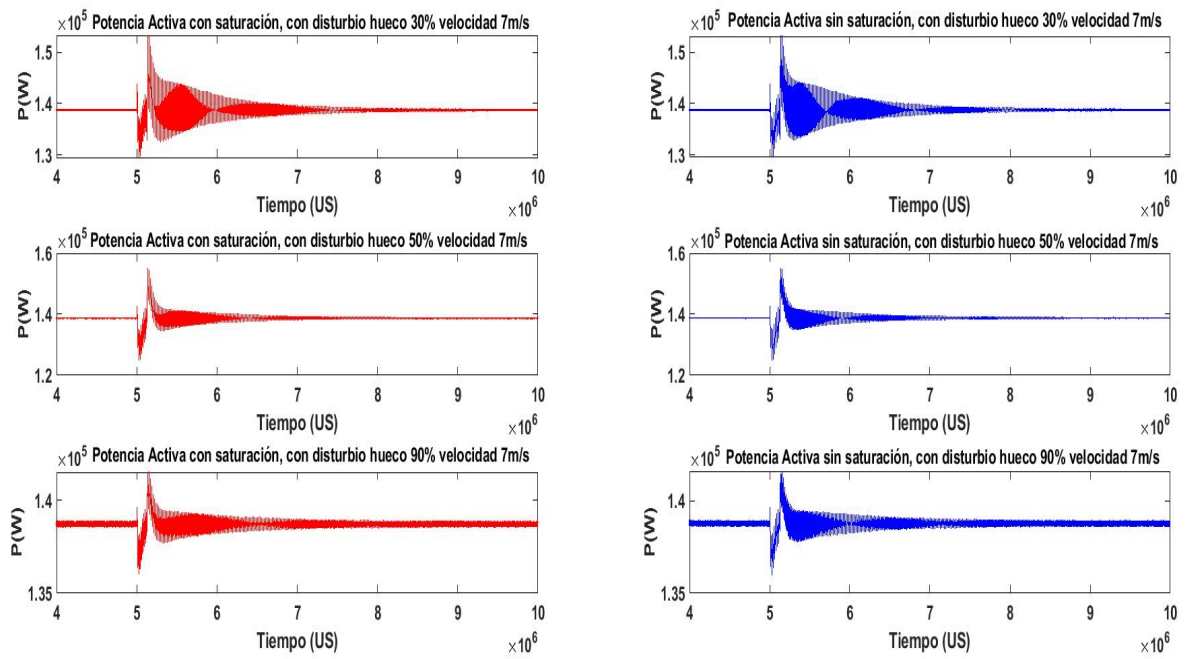
Fig. 0.1 Bloque Signal Builder para generar sobretensiones y huecos de tensión [1].



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: [1].

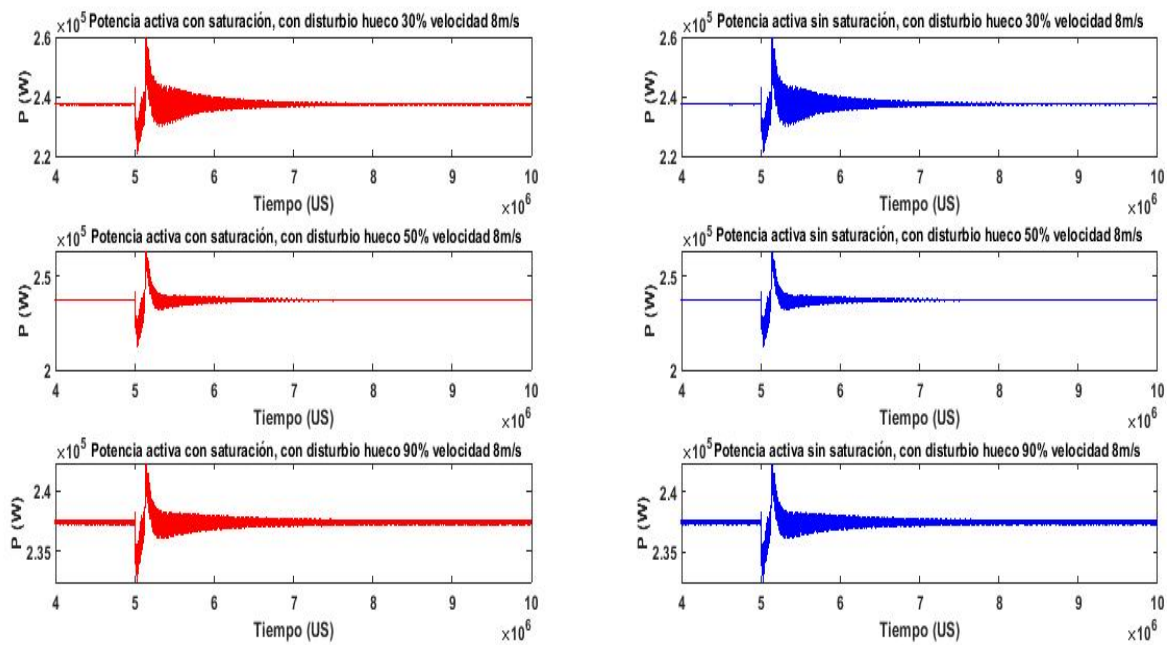
A continuación se mostrara los resultados de las simulaciones en las cuales se hará una comparación del comportamiento del sistema cuando trabaja con y sin saturación, en el estudio se trabajó el sistema a diferentes velocidades del viento y con varios porcentajes de huecos de tensión, esto con la finalidad de verificar el comportamiento del sistema cuando se ve sometido a trabajar bajo ciertos escenarios y de tal forma verificar su funcionamiento o comportamiento, a fin de detectar cuando este se encuentre en condición de fallo o inestable.

Fig. 0.2 Potencia Activa con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 7m/s.



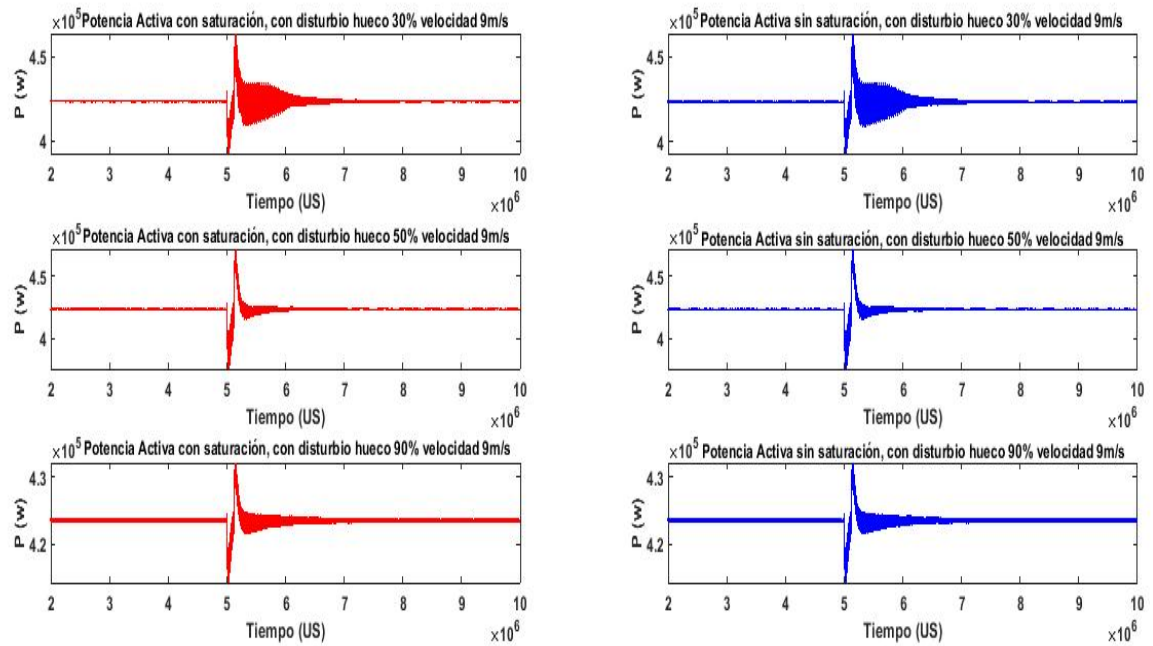
Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

Fig. 0.3 Potencia Activa con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 8m/s.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

Fig. 0.4 Potencia Activa con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 9m/s.



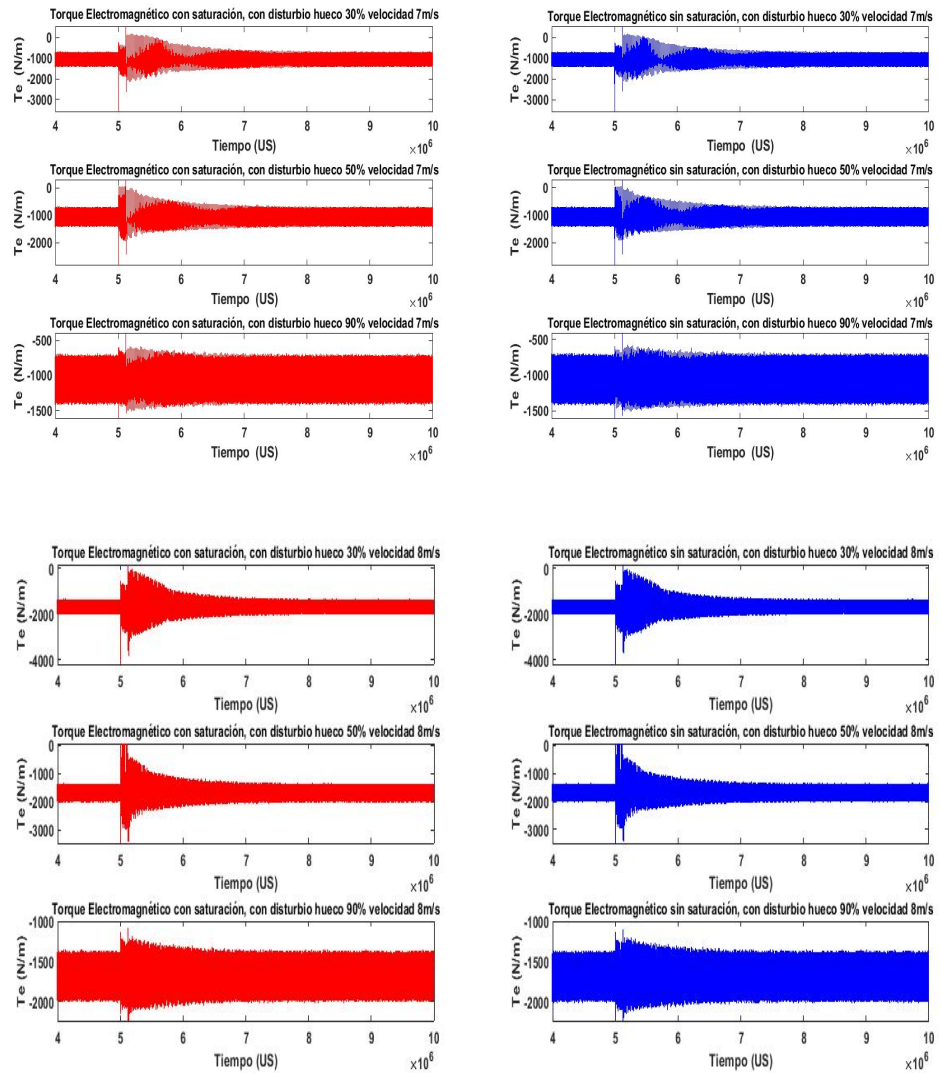
Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

En esta parte el efecto del hueco de tensión se ha evaluado utilizando el modelo estudiado por [1] al cual se le incorporo el bloque de saturación con su respectiva ecuación, como se observa en la figura 4.1.4 al someter al sistema sin saturación a un hueco de tensión del 30% se puede visualizar una marcada diferencia con respecto al sistema que incorpora la saturación, esta inestabilidad producida en el sistema se la puede visualizar principalmente cuando los huecos de tensión son de mayor profundidad.

En la figura 4.1.5 y 4.1.6 se sometió al sistema a tres caídas de voltajes distintos y se examina su efecto sobre la potencia eléctrica como observamos en los huecos de menor profundidad el sistema sufre daños en menor proporción a diferencia del funcionamiento del sistema

con hueco del 30% donde evidentemente el sistema enfrenta un periodo de mayor inestabilidad.

Fig. 0.5 Torque Electromagnético con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 7m/s.



El efecto del hueco de tensión en el sistema sobre el torque electromagnético se puede observar en las figuras 4.1.7 y 4.1.8 donde se visualizan los picos producidos a causa de la aparición de huecos de tensión, las comparaciones sugieren que este debe ser controlado de forma tal que mantenga la relación óptima entre la velocidad angular del giro del rotor y la velocidad del viento, a fin de asegurar

la máxima extracción de la potencia del viento. Torque Electromagnético con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 8m/s.

Fig. 0.6 Potencia Reactiva con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 7m/s.

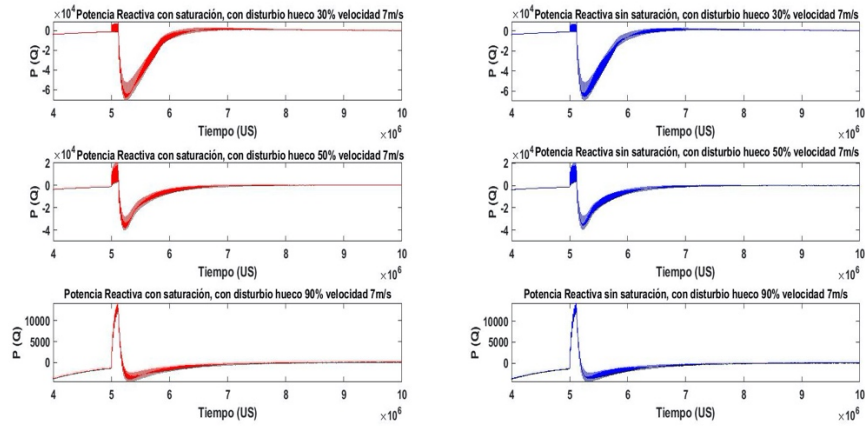
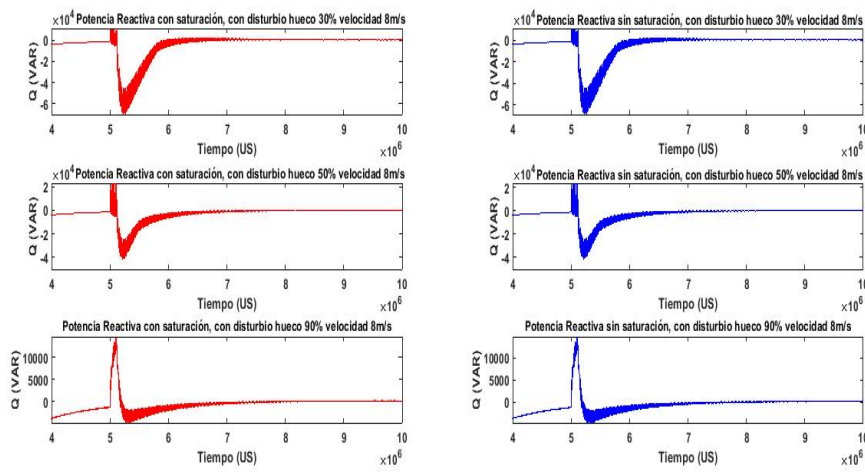


Fig. 0.7 Potencia Reactiva con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 8m/s.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

En la figura 4.1.9 y 4.1.10 se visualiza el comportamiento de la potencia reactiva ante la aparición de huecos de tensión donde se presencian valores picos más bajos, sin embargo el sistema con saturación es más estable, se debe prever que exista un estricto control de la potencia

reactiva como en la activa, de forma tal que se reduzca o evite la ondulaciones en el torque del generador.

Fig. 0.8 Velocidad del rotor, con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 7m/s.

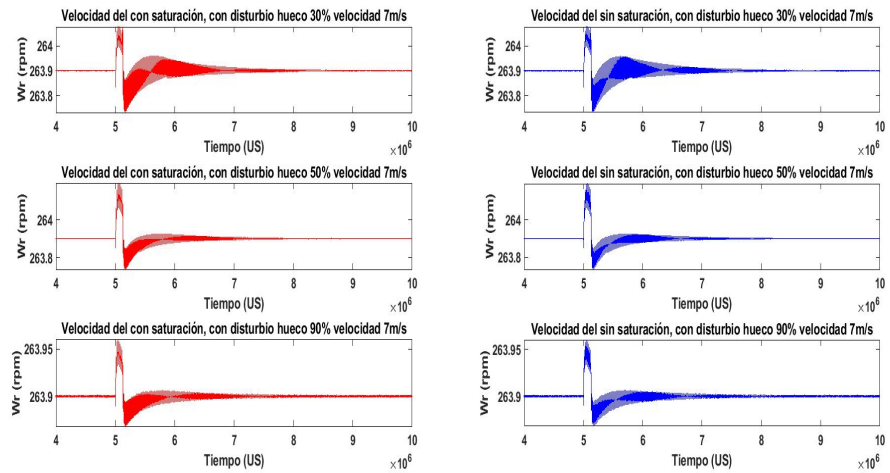
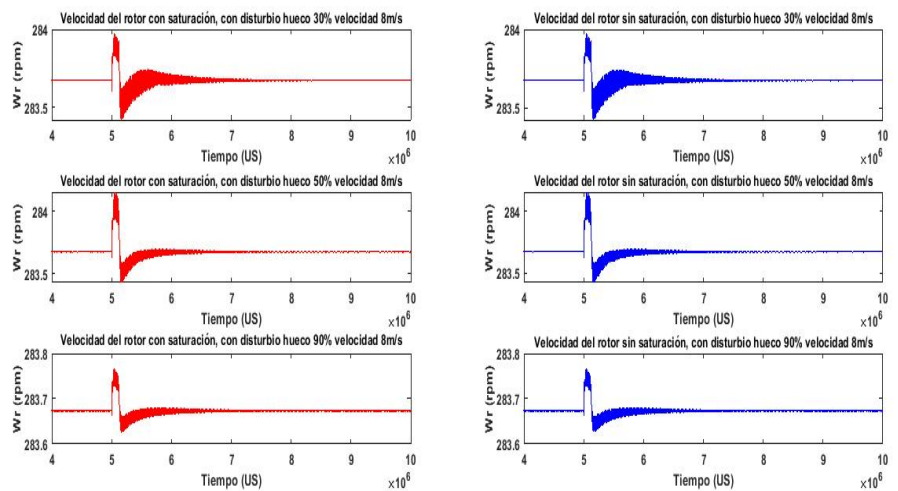


Fig. 0.9 Velocidad del rotor, con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 8m/s.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

En las figuras 4.1.11 y 4.1.12 se observa el comportamiento de la velocidad del rotor, se presencia el mismo escenario que las variables analizadas anteriormente cuando se enfrenta a huecos de tensión de mayor profundidad como es el caso del hueco de 30% este tiende a pasar por un periodo inestable, sin embargo se puede evidenciar que

el sistema que incorpora la saturación presenta menores picos en su comportamiento.

Fig. 0.10 Corriente del estator, con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 7m/s.

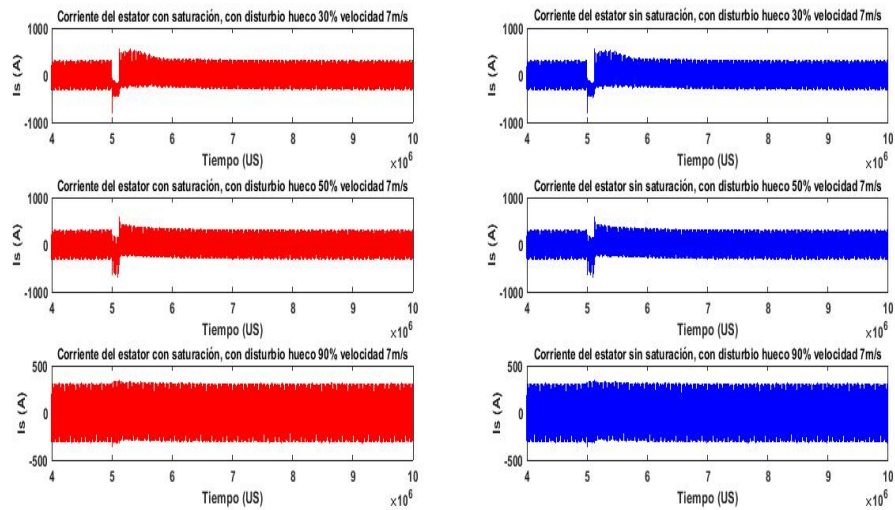
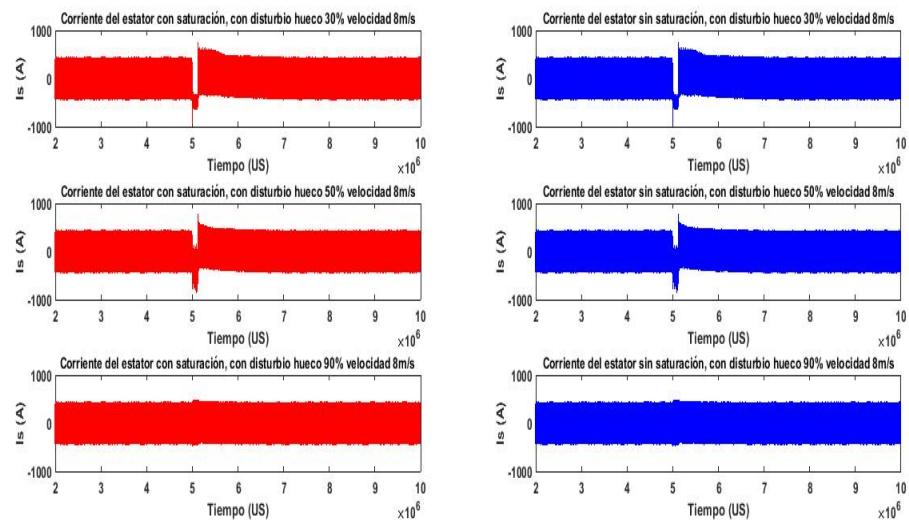


Fig. 0.11 Corriente del estator, con y sin saturación, hueco 30%, 50% y 90% velocidad 8m/s.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

En la figura 4.1.13 y 4.1.14 se observa el comportamiento de la corriente del estator ante la aparición de huecos de tensión, misma que se enfrenta a los mismos comportamientos de los casos anteriores, se presencia picos bajos y altos con huecos más profundos a diferencia

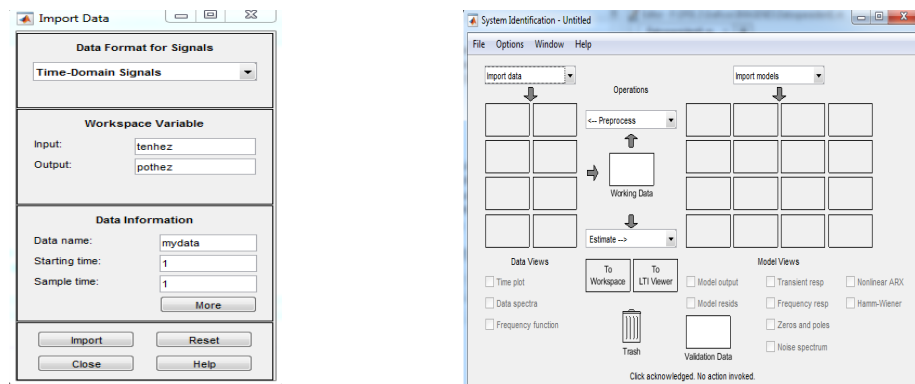
del hueco de 90% donde el comportamiento es menos inestable.

En este apartado se detalla el proceso realizado para la identificación del sistema, para el cual se trabajó con las señales de potencia y velocidad del rotor, mismas que corresponden a las señales de salida observables de interés, y como entrada se tomó la señal de huecos de tensión, básicamente lo que se desea es visualizar el comportamiento del sistema en determinadas condiciones, predecir el comportamiento del sistema y hacer uso de representaciones que estén más aproximadas al modelo real de manera que se pueda trabajar con estas.

Se llevó a cabo un método experimental, el cual permitió la obtención del modelo del sistema en estudio, el proceso realizado para la obtención del modelo matemático de este fue el siguiente:

1. Obtención de los datos para las entradas y salidas de

Fig. 0.12 Datos de entrada y salida para realizar la identificación del sistema.

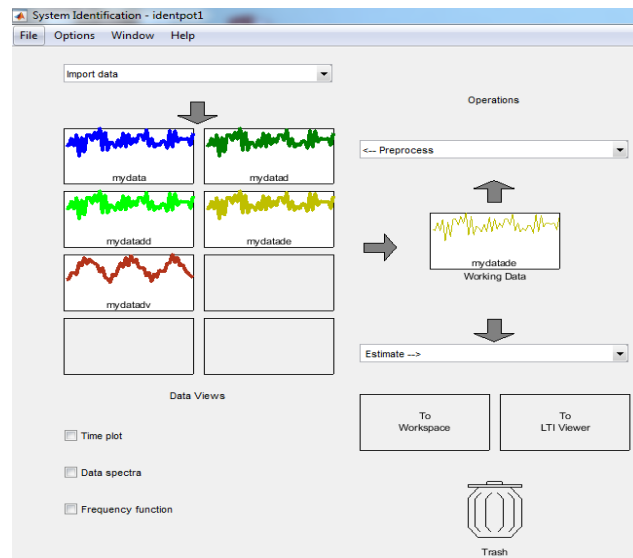


nuestro modelo o sistema.

Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

- Se realizó el tratamiento previo de los datos registrados, a este proceso corresponde el filtrado de los datos, eliminación de valores medios y la selección de la señal para la ventana de trabajo y para validación.

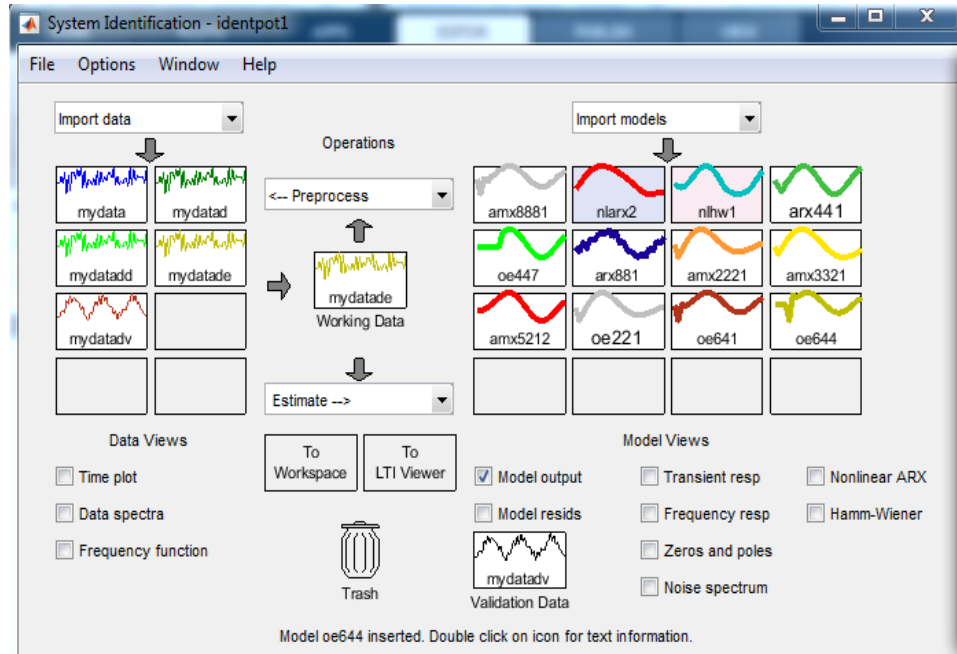
Fig. 0.13 Tratamientos de los datos del modelo.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

- Se escogió la estructura del modelo que más se ajustó al real.

Fig. 0.14 Estructuras de los modelos empleados para la identificación.



En la figura 4.2.3 se visualizan las estructuras empleadas para hallar el modelo del sistema en estudio, se emplearon varias estructuras y cada una de ellas con diversos parámetros, en la figura 4.2.4 se puede verificar los índices de exactitud de los modelos simulados.

Fig. 0.15 Porcentajes de las estructuras simuladas.

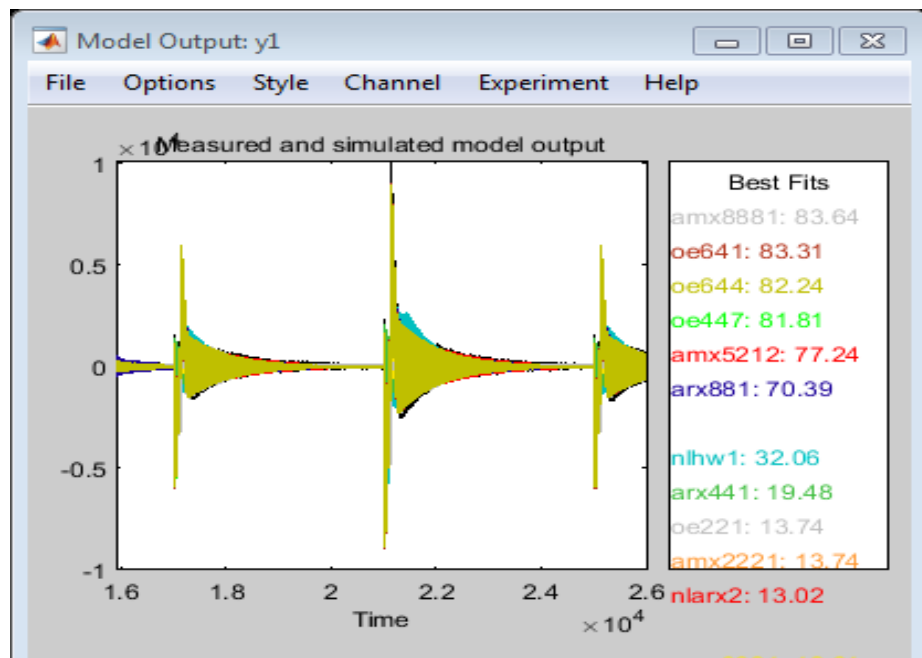
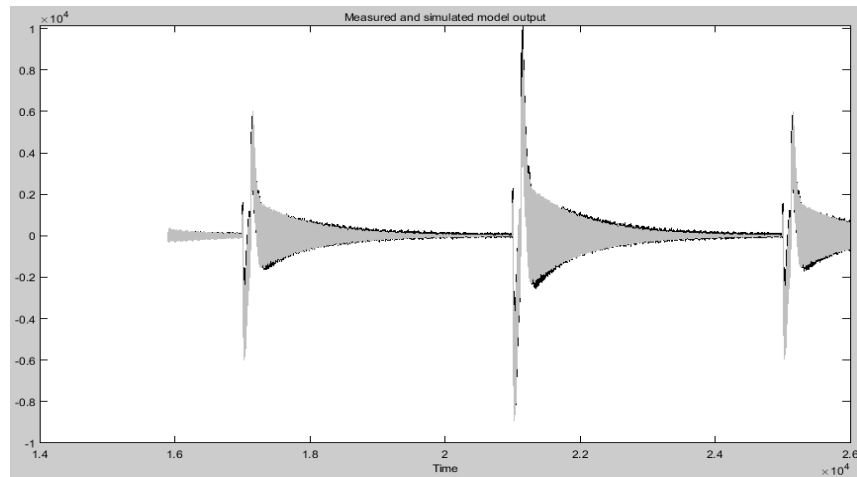


Fig. 0.16 Medición y simulación de la salida del modelo.



Fuente: Matlab/Simulink

Elaborado por: autora

La estructura del modelo que más representa el comportamiento del sistema es el modelo ARMAX con un porcentaje del 83.64% se puede observar la medición y simulación de la salida del modelo en la figura 4.2.5. Es importante determinar si la estructura del modelo obtenido satisface el grado de exactitud requerido.

4. Obtención de los parámetros del modelo.

Discrete-time ARMAX model: $A(z)y(t) = B(z)u(t) + C(z)e(t)$

$$A(z) = 1 - 0.6312 z^{-1} - 2.781 z^{-2} + 1.642 z^{-3} + 3.151 z^{-4} - 1.674 z^{-5} - 1.628 z^{-6} + 0.6646 z^{-7} + 0.2586 z^{-8}$$

$$B(z) = -5237 z^{-1} + 3715 z^{-2} + 1.341e04 z^{-3} - 8186 z^{-4} - 1.256e04 z^{-5} + 8049 z^{-6} + 4300 z^{-7} - 3487 z^{-8}$$

$$C(z) = 1 + 0.3032 z^{-1} - 2.193 z^{-2} - 0.7907 z^{-3} + 1.62 z^{-4} + 0.7165 z^{-5} - 0.1546 z^{-6} - 0.2112 z^{-7} - 0.255 z^{-8}$$

Name: amx8881

Sample time: 1 seconds

Parameterization:

Polynomial orders: na=8 nb=8 nc=8 nk=1

Number of free coefficients: 24

Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

5. Obtención de la función de transferencia.

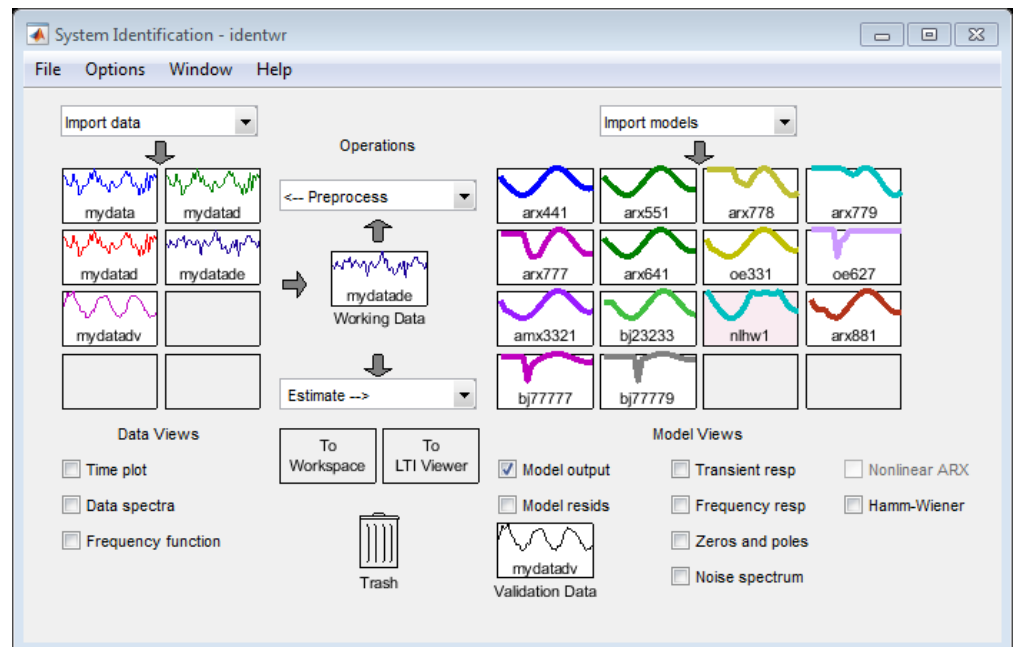
```
From input "u1" to output "y1":  
  
-5237 z^-1 + 3715 z^-2 + 1.341e04 z^-3 - 8186 z^-4 - 1.256e04 z^-5 + 8049 z^-6 + 4300 z^-7 - 3487 z^-8  
-----  
1 - 0.6312 z^-1 - 2.781 z^-2 + 1.642 z^-3 + 3.151 z^-4 - 1.674 z^-5 - 1.628 z^-6 + 0.6646 z^-7 + 0.2586 z^-8  
  
Name: amx8881  
Sample time: 1 seconds  
Discrete-time transfer function.
```

Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

Con el fin de verificar el comportamiento del sistema ante la aparición de huecos de tensión y sobretensiones se llevó a cabo la obtención de la función de transferencia, esta es de vital importancia ya que permite tener en cuenta la dinámica del sistema y la dinámica de control, básicamente la función de esta es modelar la respuesta del sistema ante las señales aplicadas.

El mismo procedimiento fue aplicado para la obtención del modelo matemático del sistema, esta vez tomando como señal de entrada los huecos de tensión y como señal de salida la velocidad del rotor como se ilustra a continuación:

Fig. 0.17 tratamientos de los datos del modelo.



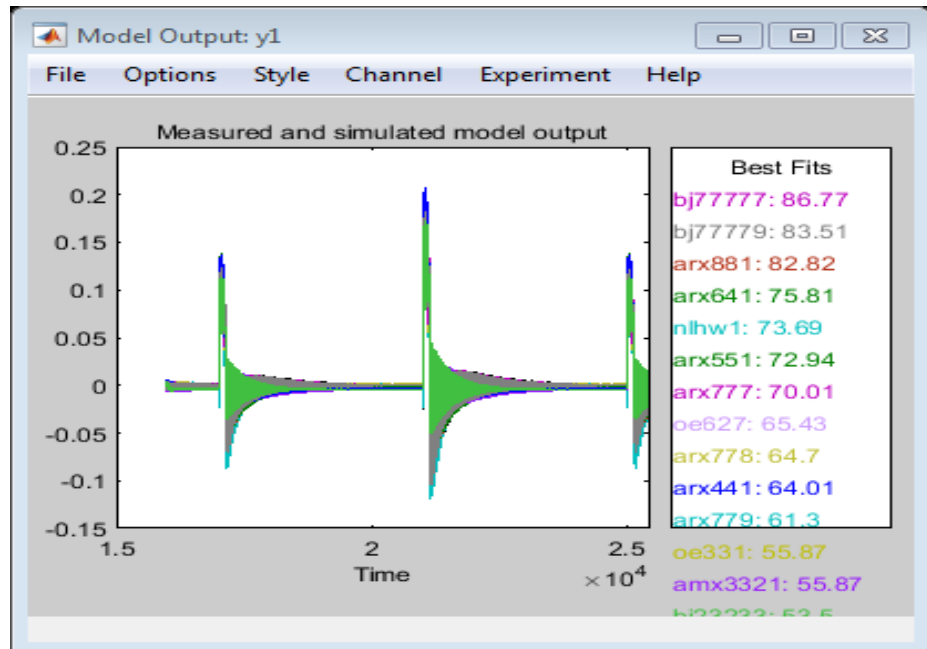
Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

En la figura 4.2.7 se visualiza el tratamiento de los datos, en esta sección se realizó el mismo procedimiento llevado a cabo anteriormente; se efectuó el filtrado de los datos de entrada y salida en este caso como entrada los huecos de tensión y para la salida la velocidad del rotor, también se ejecutó la eliminación de valores medios, la selección de la señal para la ventana de trabajo y validación, por último la simulación para la elección del modelo del sistema.

A continuación se eligió la estructura del modelo que más se acercó a la representación del modelo real estos porcentajes se pueden observar en la figura 4.2.8, en este caso el modelo fue Box-Jenkins con un porcentaje del 86.77%, cabe recalcar que para fines de simulación, control, análisis y diseño se debe precautelar la elección

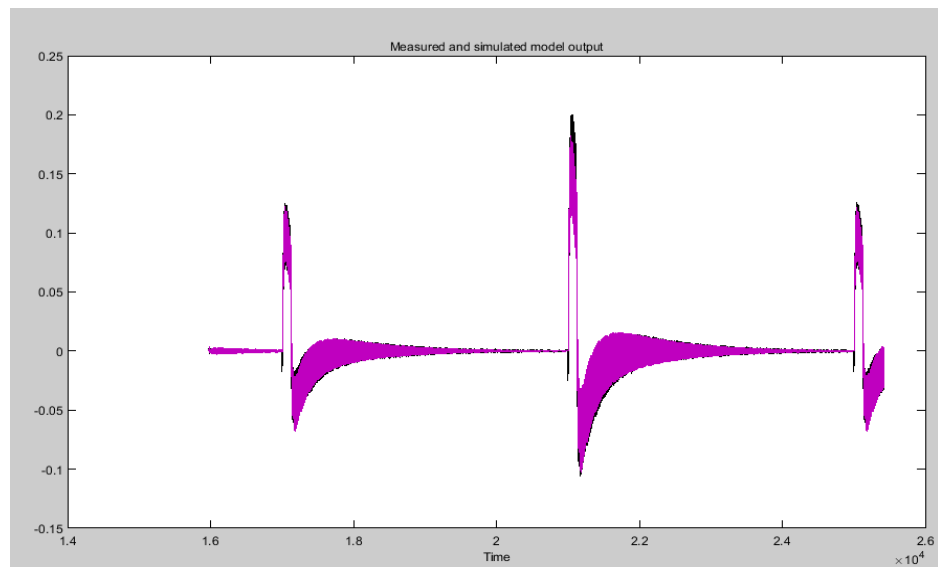
del modelo más exacto, de forma que con la obtención del modelo matemático se tenga una base de estudio para investigaciones futuras.

Fig. 0.18 Porcentajes de las estructuras simuladas.



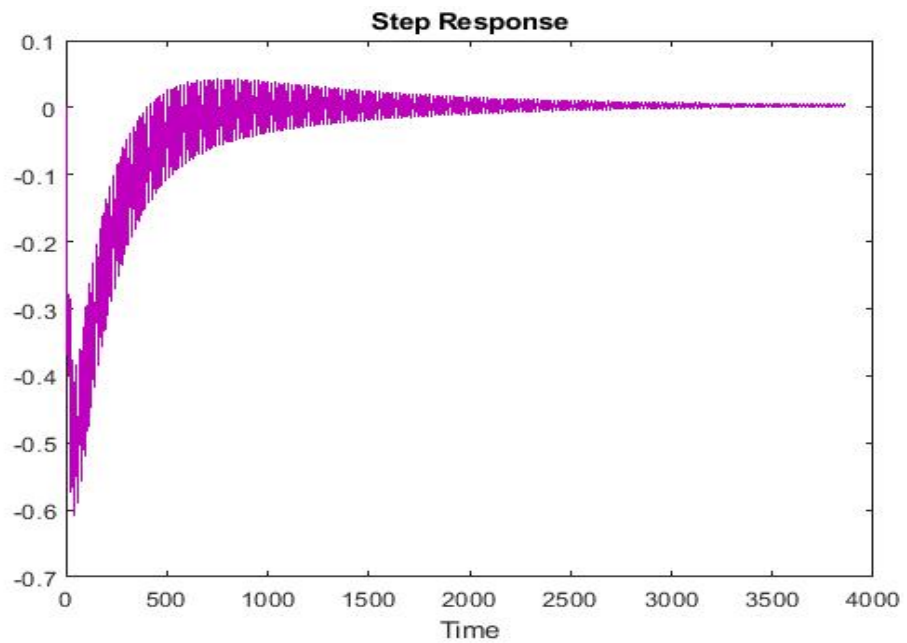
Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

Fig. 0.19 Medición y simulación de la salida del modelo.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

Fig. 0.20 respuesta transitoria del modelo.



Fuente: Matlab/Simulink
Elaborado por: autora

En la figura 4.2.9 se visualiza la medición y simulación de la salida del modelo con estructura Box-Jenkins y la figura 4.2.10 muestra la respuesta transitoria de dicho modelo, se puede verificar la similitud de esta con el modelo real en el anexo número 9.

A continuación se presentaran los parámetros de la estructura del modelo escogido.

Discrete-time BJ model: $y(t) = [B(z)/F(z)]u(t) + [C(z)/D(z)]e(t)$

$$B(z) = -0.2265 z^{-7} + 0.3666 z^{-8} + 0.2762 z^{-9} - 0.7253 z^{-10} + 0.1109 z^{-11} + 0.3598 z^{-12} - 0.1608 z^{-13}$$

$$C(z) = 1 - 0.3265 z^{-1} - 0.1673 z^{-2} - 0.2176 z^{-3} - 0.1373 z^{-4} - 0.1407 z^{-5} + 0.3746 z^{-6} + 0.3196 z^{-7}$$

$$D(z) = 1 - 1.528 z^{-1} + 0.4491 z^{-2} + 0.01822 z^{-3} + 0.07248 z^{-4} + 0.01015 z^{-5} + 0.4214 z^{-6} - 0.3861 z^{-7}$$

$$F(z) = 1 - 2.004 z^{-1} - 0.6705 z^{-2} + 3.79 z^{-3} - 1.612 z^{-4} - 1.601 z^{-5} + 1.283 z^{-6} - 0.1851 z^{-7}$$

```

Name: bj77777
Sample time: 1 seconds

Parameterization:
  Polynomial orders:  nb=7  nc=7  nd=7  nf=7  nk=7
  Number of free coefficients: 28
  Use "polydata", "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

```

Obteniendo como resultado la siguiente función de transferencia del modelo:

Fig. 0.21 Función de transferencia del modelo.

```

From input "u1" to output "y1":
      -0.2265 z^-1 + 0.3666 z^-2 + 0.2762 z^-3 - 0.7253 z^-4 + 0.1109 z^-5 + 0.3588 z^-6 - 0.1608 z^-7
z^(-6) * -----
      1 - 2.004 z^-1 - 0.6705 z^-2 + 3.79 z^-3 - 1.612 z^-4 - 1.601 z^-5 + 1.283 z^-6 - 0.1851 z^-7

Name: bj77777
Sample time: 1 seconds
Discrete-time transfer function.

```

Como conclusión ante la aplicación de la identificación a estas dos señales de salida podemos determinar que el modelo que más se ajusta a las necesidades del estudio está determinado por el modelo que usa la señal de la potencia eléctrica, puesto que otorga las características dinámicas más reales del sistema, ya que las variaciones en esta se dan en el orden de los MW, mientras que las variaciones que presenta la velocidad del rotor son menos significativas. Por tanto podemos decir que para objeto de estudios futuros sería más óptimo trabajar con la función

Los generadores de inducción doblemente alimentados actualmente son objeto de estudio especialmente en aspectos referentes al modelado, identificación y control, la importancia de este radica en manifestar ciertos factores que podrían poner en riesgo el correcto

funcionamiento de la máquina, así como los daños que esta pudiese ocasionar al sistema eléctrico de potencia para el cual se encuentre operando, puesto que el SEP por su gran magnitud y robustez es vulnerable ante cualquier eventualidad que llegara a suscitarse.

Por tal motivo, los criterios de evaluación presentados obedecen a los modelos y diseños típicos de los DFIG utilizados en la actualidad, sin embargo, estos modelos no son necesariamente los óptimos es decir, el generador de inducción doblemente alimentado por su naturaleza como una máquina electromagnética giratoria tiende a producir fluctuaciones constantes de voltaje y potencia, esto se debe a la aparición de fenómenos como la saturación magnética y la histéresis, por ende, para determinar este como un diseño óptimo debe estar sujeto a diversas variables de estudios en cuanto a funcionamiento y fiabilidad.

Por tanto, al realizar esta investigación se pudo determinar la importancia de la incorporación de la saturación al modelo del DFIG, puesto que la inductancia de magnetización es uno de los factores más relevantes a ser considerado, su integración es fundamental para establecer un incremento de voltaje y estabilidad del DFIG en sus terminales cuando opera en condiciones de vacío o con carga [37].

Varias investigaciones enfatizan la importancia que tiene realizar el control en una turbina eólica con DFIG, pues a través de este se permite llevar a cabo el cálculo del par del generador y referencias de ángulo de inclinación para cumplir con la máxima extracción de energía del viento y

mantener el funcionamiento de la turbina de forma estable, es decir, que la potencia, el par y velocidad se encuentren operando bajo los límites establecidos [36].

Sin embargo, hay que recalcar que el uso de un DFIG en una turbina eólica de velocidad variable es realmente importante, el uso del controlador back to back en el circuito del rotor permite entregar y absorber energía a la red eléctrica, además la presencia de este posibilita el control de los parámetros eléctricos de la corriente que circula por el rotor, de forma que conectar el estator directamente a la red no se convierte en un peligro, ya que al controlar los parámetros eléctricos en el rotor beneficia en el control del estator, de forma que se genere una corriente que posea la tensión y frecuencia que requiere el sistema en el cual se encuentre trabajando [38].

Uno de los inconvenientes en el desarrollo del modelo DFIG en el estudio fue la dificultad para encontrar una máquina que proporcione a más de las características básicas entregadas por el fabricante, este aspecto dificultó la obtención de resultados puesto que se deben hacer pruebas y simulaciones en las cuales se debe asumir varias condiciones de funcionamiento, factor que no sería necesario al disponer por completo las características de magnetización de la máquina.

Referencias bibliográficas.

- [1] J. P. Murillo, "Modelamiento e identificación para la detección de dinámicas de comportamiento en generadores de inducción doblemente alimentados.," Universidad Central de las Villas, 2019.
- [2] L. S. Ferreira., "Efeito De Disturbios Na Malha Principal Sobre O Desempenho Dinâmico À Frequência Fundamental De Aerogeradores De Indução Simples E Aerogeradores De Indução De Dupla Alimentação.," Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 2005.
- [3] M. H. Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright, *Wind Energy Generation Modeling And Control*. 2009.
- [4] J. Z. J. Zhao, W. Z. W. Zhang, Y. H. Y. He, and J. H. J. Hu, "Modeling and control of a wind-turbine-driven DFIG incorporating core saturation during grid voltage dips," *2008 Int. Conf. Electr. Mach. Syst.*, no. 2007, pp. 2438–2442, 2008.
- [5] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems, Second Edition*. 2012.
- [6] "A Geração Eólica e o Gerador de Indução com Rotor Bobinado," 1998.
- [7] "La Energía Eólica en Ecuador," *Tech4cdm*, p. 23.
- [8] D. Andagoya, C. Gallardo, G. Salazar, and H. Arcos, "Máxima Capacidad de Generación Eólica a ser Instalada en el Sistema Eléctrico Ecuatoriano," vol. 33, no. 3, 2014.
- [9] ING. César Heberto Ochoa Ruiz, "Modelado de la generacion eolica para estudios en redes electricas.," Universidad Autónoma de Nuevo León, 2011.

- [10] J. Kim, "Operating Method of Induction Generator Capable of Stable Operation at All Times and Power Failure," vol. 14, no. 3, pp. 5–11, 2018.
- [11] M. A. Rodr, J. Lo, L. Marroyo, and E. Engineers, *Wind Energy Generation system based on DFIM VSWT*. 2011.
- [12] A. F. De Andrés, "Planificación de parques eólicos mediante sistemas de información geográfica y Algoritmos genéticos," 2015.
- [13] E. Hau, *Wind Turbines Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Munich, 2013.
- [14] P. A. Castillo, "Determinación de rangos de operación de generador de inducción para aplicación en aerogeneradores.," Universidad de Chile, 2010.
- [15] M. L. Rubio, A. D. M. A. L. Reneses, and A. M. B. A. A. D. E. L. Urquijo, *Diseño de aerogeneradores Maquinas Hidraulicas*. 2006, pp. 1–37.
- [16] H. M. Sanchez Jaramillo and J. Espinosa, "Estimación de los parámetros del modelo matemático del generador sincrónico, a través de optimización.," Universidad Nacional de Colombia, 2015.
- [17] A. S. Ortiz, "Estimación de los Parámetros eléctricos de los generadores síncronos.," Universidad Autónoma Nuevo León, 1995.
- [18] M. S. S. J. Duncan Glover, *Sistemas de Potencia Análisis y Diseño.*, Tercera ed. .
- [19] G. A. Rios, *Analisis Y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia.* .
- [20] P. Kundur, "[Prabha Kundur] Power System Stability And Control.pdf." p. 1661, 2005.
- [21] Z. Song, C. Xia, and T. Shi, "Assessing transient response of DFIG based wind turbines during voltage dips regarding main flux saturation and rotor deep-bar effect," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 10,

pp. 3283–3293, 2010.

- [22] C. Sample, "Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG)."
- [23] E. Philipe, P. Soares, and A. Vieira, "Simulation of foubly fed induction generator when submitted to change in wind speed.," *e-xacta*, vol. 4, pp. 81–91, 2011.
- [24] J. B. Hu, Y. K. He, and J. G. Zhu, "The internal model current control for wind turbine driven doubly-fed induction generator," *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.,* vol. 1, no. c, pp. 209–215, 2006.
- [25] A. Keyhani, H. Tsai, and S. Member, "IGSPICE Simulation of Inductions Machines with saturable inductances," vol. 4, no. 1, pp. 118–125, 1989.
- [26] J. E. Brown and F. lee, "A Method of Including The Effects Of Main Flux Path Saturation in the generalized Equations of A.C. Machines.," no. 1, pp. 96–103, 1983.
- [27] J. C. Moreira and T. A. Lipo, "Modeling of Saturated ac Machines Including Air Gap Flux Harmonic Components," vol. 28, no. 2, 1992.
- [28] X. Hailiang, Z. Wei, N. Heng, and L. Jiawen, "Improved vector control of DFIG based wind turbine during grid dips and swells," *Electr. Mach. Syst. (ICEMS), 2010 Int. Conf.,* pp. 511–515, 2010.
- [29] J. R. P.Pillay, "Reclosing Transients In Induction Machines Including The Effects Of Saturation Of The Magnetizing Branch And A Practical Case Study," vol. 9, no. 2, pp. 383–389, 1994.
- [30] M^a Elena Martín Cañadas, "Aportación al modelado del motor trifásico de inducción con consideración de la saturación y el efecto de doble jaula."
- [31] O. E. Reina, "Identificación no lineal de un sistema con Zona Muerta," 2015.

- [32] P. A. Padilla, "Métodos de Identificación dinámica," 2015.
- [33] A. Bueno, "Identificación experimental de sistemas," *Univ. Alicant.*, pp. 1–37, 2011.
- [34] L. Ljung, *System identification-Theory for the user.*, vol. 25, no. 3. New Jersey, 1989.
- [35] M. C. S. COELHO, L. A. AGUIRRE, and M. V. CORRÊA, "Metodologia para Representação de Modelos NARX Polinomiais na Forma de Hammerstein e Wiener," *TEMA - Tendências em Matemática Apl. e Comput.*, vol. 3, no. 1, 2011.
- [36] G. Abad, J. López, M. A. Rodríguez, L. Marroyo, and G. Iwanski, *Doubly Fed Induction Machine*. 2011.
- [37] T. M. Emmanuel, C. Freddy, and R. A. Juan, "Análisis Dinámico del Generador de Inducción," vol. 8, no. 1, pp. 1–7, 2010.
- [38] R. S. Adrian, "Modelado Y Control De Un Aerogenerador Conectado a La Red Mediante Un Dfig," Universidad Politécnica de Madrid., 2018.
- [39] L. A. Toledo, Eduardo Jose, "CONTROL DE TENSION Y LVRT EN SISTEMAS DE GENERACION EÓLICA Seminario Nacional CIGREAC 2014," no. April 2015, 2014.

Descubre tu próxima lectura

Si quieres formar parte de nuestra comunidad, regístrate en <https://www.grupocompas.org/suscribirse> y recibirás recomendaciones y capacitación



   @grupocompas.ec
compasacademico@icloud.com

compas

Grupo de capacitación e investigación pedagógica



@grupocompas.ec
compasacademico@icloud.com



ISBN: 978-9942-33-197-7



@grupocompas.ec
compasacademico@icloud.com

compas
Grupo de capacitación e investigación pedagógica