



Trabajo de Diploma

Autor: Kendry Pupo Ramírez

Tutores: Dr.Ing. Luis Vázquez Seisdedos

Msc.Ing. Henry Bory Prévez

Santiago de Cuba 2017



Facultad de Ingeniería Eléctrica

Trabajo de Diploma

Título: Desarrollo de un simulador de plantas eólicas conectadas a la red con fines de control y supervisión de parámetros.

Autor: Kendry Pupo Ramírez.

Tutores: Dr.Ing. Luis Vázquez Seisdedos. MSc.Ing. Henry Bory Prévez.

Santiago de Cuba

2017

Pensamiento

Nunca consideres el estudio como una obligación sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.

Albert Einstein.

Toda persona debe decidir una vez en su vida si se lanza a triunfar, arriesgándolo todo, o si se sienta a ver el paso de los triunfadores.

Thomas Alva Edison.

Dedicatoria

A todas esas personas que hicieron posible la culminación de mis estudios, a mis padres, mi familia y mis profesores.

Agradecimientos

A mis padres por brindarme su apoyo y su confianza en los momentos más difíciles.

A mis compañeros de aula y de Beca.

A mis tutores por su trabajo.

A todas las personas que contribuyeron en mi formación tanto personal como profesional.

Resumen

El tema de la energía renovable se ha convertido en un aspecto significativo en el desarrollo económico-social de un país, especialmente la energía eólica por el nivel del potencial energético para la producción de electricidad. De aquí la importancia de una plataforma de experimentación a escala de simulación para el diseño, análisis y supervisión de los sistemas de control que presentan las turbinas eólicas. En este trabajo se realiza una descripción del funcionamiento de los generadores eólicos en general, teniendo en cuenta los modelos matemáticos y las estrategias de control de los mismos que aparecen en la literatura. Luego partiendo de estos se realiza el diseño de un simulador de una planta eólica para analizar el comportamiento dinámico de turbinas típicas, mediante la simulación MatLab 2015/Simulink, además de realizar el diseño de una interfaz gráfica GUIDE (del inglés *Graphical User Interface Development Environment*) para ajustar, por parte del usuario, los parámetros de diseño y sistema de control para trabajo con una estación eólica conectada a la red.

Abstract

The theme of the renewable energy has become a significant aspect in the costreducing social development of a country, mainly the wind power for the level of the energetic potential for the production of electricity. From here the importance of a platform from experimentation to scale of simulation for the design, analysis and supervision of the control systems that show the eolian turbines. In this work a description of the functioning of the eolian generators comes true in general, taking mathematical models into account and the strategies of control of the same ones that appear in literature. Next departing from these he sells off the design of a simulator of an eolian plant to analyze the dynamic behavior of turbines typical, intervening simulation MatLab 2015/Simulink, in addition to sell off the design of a graphic interface, GUIDE, for to adjust, on behalf of the user, the designing parameters and control system for work with an eolian connected station to the network.

Índice

Introdu	cción	1	. 1
Capítul	o 1 G	Seneralidades sobre plantas eólicas.	. 7
1.1-	Físi	ica y naturaleza del viento.	. 7
1.1.	1-	El viento como fuente estocástica.	. 8
1.1.	2-	El viento como factor de turbulencias	. 8
1.2-	Сог	nponentes principales de un aerogenerador.	. 9
1.3- aerog	Prii Jene	ncipio de funcionamiento, clasificación y características de los radores.	11
1.3.	1-	Principio de funcionamiento de los aerogeneradores.	11
1.3.	2-	Clasificación de los aerogeneradores.	13
1.4-	Mo	delo matemático de una turbina de velocidad variable.	17
1.4.	1- M	odelado de la velocidad del viento.	17
1.4.	2-	Modelo aerodinámico de la turbina eólica.	19
1.4.	3-	Modelo del subsistema mecánico.	20
1.5-	Mo	delo del subsistema eléctrico.	22
1.5.	1-	Modelo del generador doblemente alimentado (DFIG).	22
1.5.	2-	Modelo del convertidor electrónico de potencia.	25
1.6-	Sis	temas de Control	27
1.7-	Со	nclusiones del capítulo	30
Capítulo eólicas	o 2 S con	SimEólica: plataforma para el diseño y experimentación con plantas ectadas a la red	31
2.1-	Gei	neralidades	31
2.2-	Prii	ncipales características de la interfaz gráfica	31
2.2.	1-	Características del GUIDE I. Parámetros de Diseño.	32
2.2.	2-	Características del GUIDE II. Simulación y Control.	33
2.3-	Prii	ncipales características del modelo Simulink.	35
2.3.	1-	Subsistema del Viento.	35
2.3.	2-	Subsistema Aerodinámico	36
2.3.	3-	Subsistema Mecánico.	37
2.3.	4-	Subsistema Eléctrico.	38
2.3.	5-	Subsistema del Convertidor de potencia bidireccional	38
2.3.	6-	Subsistema del Sistema de Control.	39
2.4-	Esp	pecificaciones en la simulación	40
2.4.	1-	Datos para la simulación	40

2.4	.2-	Parámetros de Diseño	41
2.4	.3-	Parámetros de Simulación y Control.	42
2.5-	Aná	lisis de los resultados obtenidos.	43
2.6-	Con	clusiones del capítulo.	46
Conclusiones Generales			
Recomendaciones			
Referencias Bibliográficas4			

Listado de Símbolos

 V_{viento} : Velocidad equivalente encima del área del rotor (m/s).

- V_{eq_0} : Velocidad del viento a la altura del centro (*m*/*s*).
- $V_{eq_{cv}}$: Componente de corte del viento (m/s).
- $V_{eq_{st}}$: Componente de sombra de la torre (m/s).
- V_H : Velocidad del viento a la altura del centro del rotor (m/s).
- α : Exponente de corte del viento.
- *H*: Altura de centro del rotor (m).
- ψ : Ángulo azimut de la pala (°).
- ψ_b : Ángulo azimut para cada pala (°).
- a: Radio de la torre (m).
- x: Distancia de la línea media de la torre al plano de rotación de las palas (m).
- V_0 : Velocidad media del viento (m/s).
- M: Factor de conversión de la velocidad del viento.
- Pmec: Potencia mecánica (W).
- ρ : Densidad del aire (Kg/m^3).
- A: Superficie barrida por el aspa m^2 .
- C_p : Coeficiente de potencia.
- β : Ángulo de paso de las aspas (°).
- ω_{rot} Velocidad mecánica de la turbina o frecuencia angular de rotación (*rad/s*).
- R: Radio del aspa (m).
- T_{aer} : Torque aerodinámico (Nm).
- λ : Coeficiente de velocidad específica.

- T_{gen} : Par electromagnético producido por el generador de inducción (Nm).
- ω_1, ω_2 : Velocidad mecánica de los engranes de la caja multiplicadora (*rad/s*).
- ω_{aen} : Velocidad mecánica del generador de inducción (*rad/s*).
- Q_{ebv} : Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad (*Nm*).
- Q_{eav} : Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad (*Nm*).
- J_{ebv} : Momento de inercia de las aspas y el buje (Kgm^2).
- K_{ebv} : Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad (Nm/rad).
- K_{eav} : Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad (Nm/rad).
- D_{ebv} : Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad (*Nms/rad*).
- D_{eav} : Coeficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad (*Nms/rad*).

 J_{eng1}, J_{eng2} : Momentos de inercia de los engranes de la caja multiplicadora (Kgm^2) .

 n_{eng} : Relación de engranes de la caja multiplicadora.

 J_{eav} : Momento de inercia del generador de inducción (Kgm^2).

 V_a , V_b , V_c : Tensiones de fase (V).

V_{max}: Tensión máxima o amplitud máxima (V).

 V_{ef} : Tensión efectiva de fase (V).

- V_{efl} : Tensión efectiva de línea (V).
- R_s : Resistencia del estator (ohm).
- R_r : Resistencia del rotor (ohm).
- L_S : Inductancia del estator (mH).
- L_R : Inductancia del rotor (mH).
- ω_r : Velocidad del campo del rotor visto en el rotor (*rad/s*).
- ω_s : Velocidad sincrónica (*rad/s*).

- p: Número de pares de polos.
- *Ll_s*: Inductancia de dispersión del estator (mH).
- Ll_r : Inductancia de dispersión del rotor (mH).
- L_{ms} : Inductancia mutual (mH).
- DFIG: Generador doblemente alimentado.
- SCIG: Generador de inducción jaula de ardilla.
- WRIG: Generador de inducción de rotor bobinado.
- PMSG: Generador sincrónico de imán permanente.
- WRSG: Generador síncronos de rotor bobinado.
- PWM: Modulación de ancho de pulso.
- RSC: Convertidor del lado del rotor.
- GSC: Convertidor del lado de la red.

Introducción

La energía es el motor impulsor de cualquier civilización con cierto desarrollo tecnológico, en estos momentos constituye, a la par de la alimentación y las condiciones medio ambientales, la principal preocupación a nivel global, por su importancia estratégica en el desarrollo de la economía de todo país, sistema político-económico o área geográfica, propiciando su independencia económica, la posibilidad de adquisición de capital, tecnologías, mercados y una posición privilegiada en el ámbito comercial. Esta influye en todos los momentos de la vida moderna, desde la producción hasta el consumo de los bienes, es por eso que se considera correcta la afirmación de que todos consumimos nuestra cuota de energía, por lo cual tenemos que ahorrarla.

En la actualidad la producción de energía en el mundo se centra fundamentalmente en tres grandes fuentes:

- 1. Los combustibles fósiles.
- 2. Las fuentes alternativas de energía.
- 3. Las fuentes renovables de energía.

Los combustibles fósiles, entre los que se encuentran el petróleo y sus derivados; el gas natural, el carbón, gases hidratados (metano y agua), arenas alquitranadas y esquistos petrolíferos, estas son sustancias ricas en energía que se han formado a partir de plantas y microorganismos enterrados durante mucho tiempo proporcionando la mayor parte de la energía que mueve la moderna sociedad industrial. La gasolina o el gasóleo que utilizan nuestros automóviles, el carbón o petróleo que mueve muchas plantas eléctricas y el gas natural que calienta muchas casas son todos combustibles fósiles. (AGMA, 1989)

La lluvia ácida y el calentamiento global son dos de los más serios problemas medioambientales relacionados con la utilización a gran escala de los combustibles fósiles. Otros problemas de este tipo, como la contaminación del suelo y el vertido de petróleo, están relacionados directamente con la extracción y el transporte de los combustibles fósiles. (AGMA, 1989)

Las fuentes alternativas de energía: La posibilidad de reducir la dependencia mundial de los combustibles fósiles plantea problemas por lo que existen

energías alternativas como la energía nuclear (fisión y fusión nuclear). Hasta la fecha, la utilización de energías alternativas se ha visto frenada por dificultades tecnológicas y medioambientales. Por ejemplo, aunque el uranio que se utiliza en la fisión nuclear es abundante, el riesgo de accidentes nucleares y las dificultades asociadas con el almacenamiento de los residuos radiactivos han provocado el declive de la energía nuclear. (AGMA, 1989)

Las fuentes renovables de energía: Son todas aquellas capaces de renovarse naturalmente, en un período de tiempo corto y que por lo general no producen efectos contaminantes al medio ambiente. Sus fuentes principales son: el sol, el agua, el calor de la tierra y los materiales y desechos biológicos.

El agua es el recurso líquido y energético más abundante en nuestro planeta, tiene una capacidad, como portador energético, que permite un gran aprovechamiento de este potencial en diferentes formas, estas son:

- Energía hidráulica: energía que se obtiene de la caída del agua desde cierta altura hasta un nivel inferior, lo que provoca el movimiento de ruedas hidráulicas o turbinas. La hidroelectricidad es un recurso natural disponible en las zonas que presentan suficiente cantidad de agua. Su desarrollo requiere construir embalses, presas, canales de derivación, y la instalación de grandes turbinas y equipamiento para generar electricidad. (AGMA, 1989)
- ✓ Energía mareomotriz: La energía de las mareas puede emplearse para producir electricidad. La marea ascendente fluye a través de un dique, mueve unas turbinas y luego queda retenida tras él. Cuando la marea desciende, el agua atrapada se libera, atraviesa el dique y mueve de nuevo las turbinas. Estas plantas de energía mareomotriz desarrollan su máxima eficiencia cuando la diferencia entre las mareas alta y baja es grande. (AGMA, 1989)
- Energía undimotriz: Las olas son generadas por el viento. Las ráfagas de viento sacuden la superficie de las aguas, las rizan y dan lugar a ondulaciones que van creciendo en amplitud. Esta energía también está siendo utilizada, de forma experimental para la obtención de energía eléctrica. (AGMA, 1989)
- Energía geotérmica: La energía geotérmica se basa en el hecho de que la Tierra está más caliente cuanto más profundamente se perfora. La

energía geotérmica puede derivarse de vapor de agua atrapado a gran profundidad bajo la superficie terrestre. Si se hace llegar a la superficie, puede mover una turbina para generar electricidad. Otra posibilidad es calentar agua bombeándola a través de rocas profundas calientes. Aunque esta fuente de energía subterránea es en teoría ilimitada, en la mayor parte de las zonas habitables del planeta está demasiado profunda como para que sea rentable perforar pozos para aprovecharla. (AGMA, 1989)

Energía de biomasa: Se obtiene directa o indirectamente de recursos biológicos. La energía de biomasa que procede de la madera, residuos agrícolas y estiércol, continúa siendo la fuente principal de energía de las zonas en desarrollo. En algunos casos también es el recurso económico más importante, por ejemplo, la caña de azúcar se transforma en etanol, o cuando se obtiene gas a partir de estiércol. Existen varios proyectos de investigación que pretenden conseguir un desarrollo mayor de la energía de biomasa, sin embargo, la rivalidad económica que plantea con el petróleo es responsable de que dichos esfuerzos se hallen aún en una fase temprana de desarrollo. (AGMA, 1989)

El sol como fuente primaria de energía de nuestro sistema solar, nos aporta un gran potencial energético de dos formas fundamentales: por las radiaciones en forma de luz (energía solar), y el viento (energía eólica).

- Energía solar: Energía radiante producida en el sol como resultado de reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. La intensidad de energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende, de forma complicada pero predecible, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor. (AGMA, 1989)
- Energía eólica: energía producida por el viento, movimiento horizontal propio de la atmósfera, que se producen por diferencias de presión atmosférica, atribuidas, sobre todo, a diferencias de temperatura. Las variaciones en la distribución de presión y temperatura se deben, en gran medida, a la distribución desigual del calentamiento solar, junto a las

diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas. La cantidad de energía contenida en las masas de aire en movimiento en su circulación por las capas bajas atmosféricas representa el nivel del potencial energético del recurso eólico, que puede ser relativamente elevado, se transforma en energía útil y su aprovechamiento en condiciones favorables de eficiencia y rentabilidad, dado el grado de desarrollo alcanzado por las tecnologías de conversión eólica (aeroturbinas). (AGMA/AWEA, 1996)

Este último grupo, las fuentes renovables, se consideran las energías del futuro por lo que en nuestro país se enfocan los intereses energéticos en función de estas fuentes de energía más limpias, renovables y promisorias.

Por una cuestión de tecnologías, de condiciones geográficas, infraestructurales, eco-naturales y económicas, en Cuba se apuesta por métodos relativamente económico, acorde con nuestras posibilidades geo-industriales, invirtiendo en fuentes como *Energía hidráulica*, empleada en mini hidroeléctricas (por la corta extensión e insuficiente caudal de nuestros ríos), *Energía de biomasa*, obtenida de los desechos de nuestra agroindustria como la azucarera; *Energía solar*, por los altos índices de radiación solar sobre nuestro territorio, gracias a nuestra posición geográfica, *Generación diesel* (grupos electrógenos), por sus altos índices de eficiencia y la *Energía eólica*, por su alto potencial energético omnipresente por nuestro clima tropical. (Ecured, 2014)

La energía del viento es aprovechada mediante el uso de máquinas eólicas capaces de transformar la energía eólica en energía cinética de rotación utilizable, ya sea para diversos trabajos (molinos de viento) o para la producción de energía eléctrica (aerogeneradores).

Cuba se encuentra inmersa en la diversificación de su matriz energética, en la cual la introducción de las fuentes renovables de energía juega el rol más importante. La generación de electricidad a partir de la fuente eólica presenta grandes ventajas con respecto a otras fundamentalmente por su limpieza, regenerabilidad, fácil montaje, manejo y mantenimiento entre otros además de no producir emisiones a la atmósfera ni generar residuos, excepto los de su fabricación.

4

En Cuba la energía eólica está en una fase de franco crecimiento, tras los primeros estudios y emplazamientos de prospección, análisis de factibilidad propiciada por los parques ya existentes y la búsqueda de nuevas áreas para emplazamientos potenciales. Actualmente podemos localizar parque eólicos en zonas ventosas como Cabo Cruz (proyecto experimental, primer aerogenerador instalado en Cuba) en Granma; Isla de Turiguanó, Cayo Coco, Chambas, Ciego de Ávila; Los Canarreos, Isla de la Juventud y Gibara (I y II) en Holguín. (Ecured, 2014)

Hasta el momento no está concebido el estudio de esta temática en el pregrado y se reportan muy pocos trabajos nacionales dirigidos a la investigación de los aerogeneradores, además no se cuenta con una herramienta que facilite el análisis y la experimentación a escala de simulación, por lo que se plantea como **problema de investigación:** Necesidad de contar con el modelo Simulink de una planta eólica conectada a red que integrando las dinámicas de turbina, los convertidores electromecánicos y electrónicos permita ensayar el control y la supervisión de parámetros.

Para dar solución a la problemática planteada anteriormente se hace necesario profundizar en las características de los aerogeneradores, sus sistemas de control y supervisión siendo el **Objeto de la investigación:** Construcción del modelo Simulink que integre las dinámicas controladas de la turbina, los convertidores electromecánicos y electrónicos.

El **Objetivo** es: Dotar a la actividad docente-investigativa del Departamento de Control Automático y la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Oriente de un modelo Simulink en MatLab 2015a que incluye las dinámicas de turbina, generador de inducción doblemente alimentado y un convertidor electrónico de potencia bidireccional que permita configurar sistemas de control y supervisar los parámetros de operación.

Siendo el **Campo de acción:** Generación de series de tiempo a partir del modelo Simulink que integra las dinámicas controladas de la turbina, los convertidores electromecánico y electrónico.

Hipótesis: Si se construye un modelo Simulink de una planta eólica se podrá generar series de tiempo de las dinámicas controladas de la turbina, los convertidores electromecánico y electrónico con lo cual se promoverá mayor efectividad en la caracterización de este tipo de sistema.

5

Para el cumplimiento del objetivo propuesto se plantearon las siguientes tareas de investigación:

- Búsqueda bibliográfica que permita fundamentar los aspectos claves que intervienen desde las tecnologías de captura de las formas primarias de las fuentes hasta su entrega al cliente.
- Establecimiento del dimensionado cuantitativo de estado estacionario partiendo de especificar un conjunto de escenarios considerando las escalas periódicas de días, meses y anual.
- Identificación de los conceptos enseñados a los ingenieros en Automática: Variables manipulada, controlada, de demanda y de perturbaciones.
- Caracterización de los aspectos que lo hacen un "sistema dinámico" (detectar los elementos que introducen "almacenamiento") y analizar las constantes de tiempo que caracterizan al sistema Planta – Sistema de Control.
- Proposición del modelo Simulink correspondiente para complementar el objetivo propuesto y diseñar una interfaz de usuario que le ofrezca facilidades para configuración flexible.
- 6. Confección del informe.

Dichas tareas han sido desarrolladas utilizando como base las siguientes técnicas y métodos:

- ✓ Análisis y Síntesis.
- ✓ Método Empírico.
- ✓ Observación y Revisión documental.

Desarrollo

Capítulo 1 Generalidades sobre plantas eólicas.

1.1- Física y naturaleza del viento.

La Tierra devuelve constantemente a la atmósfera el calor que recibe del Sol, aunque no de modo uniforme. En las zonas donde menos calor se libera (zonas de aire frío), la presión de los gases atmosféricos aumenta, mientras que allí donde se libera más calor, el aire se calienta y la presión de los gases disminuye. De esta forma se crea una macrocirculación como consecuencia de los movimientos convectivos: las masas de aire se calientan, su densidad disminuye y se elevan, haciendo que fluya aire más frío sobre la superficie terrestre. Este movimiento de masas de aire frío y caliente genera las zonas de altas y bajas presiones presentes permanentemente en la atmósfera, a las que también afecta la rotación terrestre. (ABB, 2012)

Dado que la atmósfera tiende a restablecer constantemente el equilibrio de presiones, el aire se mueve de las zonas de mayor presión a las de menor presión. De este modo, el viento puede definirse como el desplazamiento más o menos rápido de una masa de aire entre zonas de diferente presión. Cuanto mayor sea la diferencia de presión, mayor será la velocidad de desplazamiento del aire y más fuerte será el viento.

En realidad, el viento no sopla en la dirección que une el centro de las altas presiones con el de las bajas presiones, sino que en el hemisferio norte se desvía a la derecha, la desviación es debida a la rotación terrestre y la consiguiente fuerza aparente de Coriolis. En efecto, salvo en la franja ecuatorial, en cualquier otro punto del globo un cuerpo en movimiento sufre el efecto de la rotación con más intensidad cuanto más cerca está de los polos. De esta forma, el aire que se mueve hacia el norte en el hemisferio boreal sufre un giro hacia el noreste, mientras que si se mueve hacia el sur sufre un giro hacia sudoeste circulando alrededor de los centros de altas presiones en sentido horario y entorno a los de bajas presiones en el sentido contrario. A gran escala se puede observar en las diferentes latitudes una circulación de masas de aire que está influenciada

cíclicamente por las estaciones; a una escala menor, se produce un calentamiento distinto entre la tierra y las masas de agua, generando las brisas térmicas de tierra y de mar. (ABB, 2012)

Los parámetros fundamentales que deben ser medidos para caracterizar un régimen de viento en un sitio, son idealmente los siguientes: Velocidad media mensual del viento, para cada mes; patrón típico diario de la velocidad del viento para cada mes; duración y distribución anual, mensual y diaria de los períodos de calma; máximas velocidades del viento y dirección del viento.

1.1.1- El viento como fuente estocástica.

El viento es una materia prima utilizada en la proceso de generación de electricidad, el cual posee ciertas perturbaciones que influyen en este proceso y en la vida útil del aerogenerador. Como el viento siempre estará variando buscando un equilibrio de la temperatura en la superficie terrestre se encontrarán variaciones que pueden ser:

- Variaciones a corto plazo: la velocidad del viento variando continuamente fluctuando su contenido energético, dependiendo tanto de las condiciones climáticas como de las condiciones de superficie locales y de los obstáculos.
- Variaciones diurnas (noche y día): esta variación se debe sobre todo a que las diferencias de temperatura entre la superficie del mar y la superficie terrestre, son mayores durante el día que durante la noche.
- Variación estacional en la energía eólica: En zonas templadas los vientos de verano son generalmente más débiles que en invierno, el consumo de electricidad es generalmente mayor en invierno. Por lo tanto, en zonas frías del planeta la calefacción eléctrica se corresponde con la energía eólica, pues el enfriamiento de las casas varía con la velocidad del viento, de la misma forma que la producción de electricidad varía en los aerogeneradores. (Figueredo, 2006)

1.1.2- El viento como factor de turbulencias.

En las capas más bajas de la atmósfera, la velocidad del viento se verá afectada por una cierta fricción con la superficie terrestre, más conocida como la rugosidad del terreno. Cuanto más sea la rugosidad del terreno, mayor se verá afectada la velocidad del viento. Los bosques y las grandes ciudades ofrecen una mayor resistencia al movimiento del viento, sin embargo las pistas de hormigón de los aeropuertos y la superficie del agua de los mares tienen una influencia casi nula.

Los obstáculos tanto de la naturaleza (árboles, montañas, formaciones rocosas, etc.), como del hombre (edificios, aeropuertos), disminuyen la velocidad del viento o sufre una aceleración cuando tiene que remontar colinas, montes o cadenas montañosas, dando lugar a ráfagas de vientos y turbulencias que cambian la dirección y velocidad de este, provocando perturbaciones no deseadas que desembocan en cargas aerodinámicas para las palas de una turbina eólica, produciendo un deterioro adicional por fatiga en los componentes mecánicos y fluctuaciones en la potencia que deterioran la calidad de la energía eléctrica producida, causando daños en su funcionamiento en un plazo de tiempo determinado. (Curso Eólica, 2011)

Los obstáculos que enfrenta el viento a su paso son decisivos a la hora de valorar el emplazamiento de una turbina, a mayor altura sobre la parte superior del obstáculo menor será el abrigo que este le proporciona al viento disminuyendo su velocidad, el abrigo puede extenderse hasta una altura cinco veces superior a la del obstáculo a una cierta distancia.

El relieve y las irregularidades de la superficie terrestre o marina tienen un impacto significativo en el viento y sus características locales; de hecho, el viento sopla con más intensidad sobre superficies grandes y llanas como el mar, y de ahí el principal interés por las instalaciones eólicas terrestres (onshore) y marinas (offshore). (ABB, 2012)

1.2- Componentes principales de un aerogenerador.

Como podemos ver en la figura 1.1 se ilustran las distintas partes que conforman una turbina eólica.

1- Pala	10- Dispositivos hidráulico de refrigeración
2- Soporte de pala	11- Frenos mecánicos
3- Actuador de ángulo de paso	12- Generador

Tabla 1.1 Listado de los componentes de un aerogenerador.

4-	Buje	13- Convertidor de potencia y sistema de control
5-	Cubierta	14- Transformador
6-	Soporte principal	15- Anemómetro y veleta
7-	Eje de baja velocidad	16- Estructura de la góndola
8-	Luces de señalización aérea	17- Torre de soporte
9-	Multiplicador	18-Mecanismo actuador de orientación



Figura 1.1 Componentes de un aerogenerador. (ABB, 2012)

La góndola mantiene normalmente la turbina de frente al viento (a barlovento) por la acción de un sistema de orientación activo, siguiendo las señales de los instrumentos que determinan la dirección y velocidad del viento, ubicados en el exterior de la góndola. Esta contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico.

Las palas del rotor capturan la energía del viento y transmiten su potencia hacia el buje, el cual las une y puede incorporar sus articulaciones, como cambio de paso. El acoplamiento o eje de baja velocidad del aerogenerador conecta el buje del rotor al multiplicador. El eje contiene conductos del sistema hidráulico para permitir el funcionamiento de los frenos aerodinámicos.

El eje de alta velocidad permite el funcionamiento del generador eléctrico y está equipado con un freno de disco mecánico de emergencia. El freno mecánico se utiliza en caso de fallo del freno aerodinámico, o durante las labores de

mantenimiento de la turbina. El multiplicador tiene a su izquierda el eje de baja velocidad y permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire más rápido que el eje de baja velocidad, esta razón depende del diseño de generador eléctrico.

El generador eléctrico convierte la energía cinética de rotación en el eje en energía eléctrica. El sistema de control tiene un controlador electrónico continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y le indica al operador encargado de la turbina de la situación.

El dispositivo de refrigeración contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además contiene una unidad de refrigeración de aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador.

El anemómetro y la veleta se utilizan para medir la velocidad y la dirección del viento. Las señales electrónicas del anemómetro son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para conectar el aerogenerador cuando el viento alcanza la velocidad de conexión. El ordenador parará el aerogenerador automáticamente si la velocidad del viento alcanza la velocidad de desconexión, con el fin de proteger a la turbina. Las señales de la veleta son utilizadas por el controlador electrónico del aerogenerador para girar al aerogenerador en contra del viento, utilizando el mecanismo de orientación.

La torre del aerogenerador soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con vientos sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños (cargadores de baterías, etc.). (ABB, 2012)

1.3- Principio de funcionamiento, clasificación y características de los aerogeneradores.

1.3.1- Principio de funcionamiento de los aerogeneradores.

Un aerogenerador o turbina eólica transforma la energía cinética del viento en energía eléctrica sin usar combustible, pasando por el estadio intermedio de conversión a energía mecánica de rotación a través de las palas. Los aerogeneradores pueden ser de sustentación o de resistencia en función de cuál

de las fuerzas generadas por el viento se use como fuerza motriz. Para entender el principio de funcionamiento de un aerogenerador nos referiremos a las turbinas de uso más extendido en la actualidad, es decir, las de sustentación; en ellas, a diferencia de las de resistencia, el viento circula por ambas caras de la pala, las cuales tienen perfiles geométricos distintos, creando de esta forma un área de depresión en la cara superior respecto a la presión en la cara inferior. El perfil de ala de la pala eólica produce una velocidad distinta del flujo de viento que se desliza sobre la superficie superior respecto al flujo de viento que se desliza por la superficie inferior. Esta diferencia de velocidades es el origen de la diferencia de presiones. Esta diferencia de presiones produce una fuerza llamada sustentación aerodinámica (figura 1.2) sobre la superficie de la pala, de forma parecida a lo que sucede en las alas de los aviones.



Figura 1.2 Fuerzas en un perfil aerodinámico de una pala de un aerogenerador. (ABB, 2012)

La sustentación en las alas de un avión es capaz de levantarlo del suelo y mantenerlo volando, mientras que en un aerogenerador provoca su rotación alrededor del eje del buje. Al mismo tiempo se genera una fuerza de resistencia que se opone al movimiento y es perpendicular a la sustentación. En los aerogeneradores diseñados correctamente, la relación sustentación-resistencia es grande dentro del rango normal de operación.

Un aerogenerador necesita una velocidad del viento mínima (velocidad de conexión o cut-in) de 3 - 5 m/s y entrega la potencia nominal a una velocidad de 12 - 14 m/s. Por razones de seguridad, a velocidades elevadas por lo general superiores a 25 m/s (velocidad de desconexión o cut-off), el sistema de frenado para la turbina. El bloqueo puede efectuarse por medio de frenos mecánicos que detienen el rotor o, en el caso de palas de inclinación variable, escondiéndolas del viento al ponerlas en la posición conocida como bandera, posición en la cual la cuerda del perfil de la pala es paralela al eje del rotor y el borde de ataque mira al viento. En esta posición la carga aerodinámica sobre las palas se reduce al mínimo. (ABB, 2012)

1.3.2- Clasificación de los aerogeneradores.

Existen distintos criterios para clasificar los aerogeneradores por ejemplo según la posición del eje en el que se encuentran dos tipos: de eje vertical dentro de los cuales se encuentran el tipo Savonius, el tipo Darrieus y híbridos Savonius-Darrieus. Por otra parte se tienen aerogeneradores de eje horizontal, estos últimos se pueden clasificar según la dirección del viento en: aerogeneradores a barlovento que son aquellos donde el viento incide directamente sobre la parte delantera de la góndola y a sotavento donde el viento incide directamente sobre la parte trasera de la góndola. Según el número de palas pueden ser: monopala, bipala, tripala y multipala. De acuerdo a las diferentes tecnologías de generación, se han clasificado en: (ABB, 2012)

- ✓ Aerogeneradores de velocidad fija.
- ✓ Aerogeneradores de velocidad variable.

Los aerogeneradores de velocidad fija tienen como característica que la velocidad está determinada por la frecuencia de la red, la caja de multiplicadora (Gear) y el diseño del generador. Están equipadas con un generador que generalmente es de jaula de ardilla SCIG (del inglés, <u>Squirrel Cage Induction Generator</u>) y conectado directamente a la red con un arrancador suave y un banco de capacitores para reducir la compensación de potencia reactiva. Están diseñados para lograr una máxima eficiencia independientemente de la velocidad del viento. En el orden del aumento de la producción de potencia, el generador de algunas turbinas eólicas de velocidad fija tienen dos bobinados:

13

uno para las velocidades del viento bajas típicamente con 8 polos y otro para velocidades del viento medias y altas, típicamente con 4-6 polos.

Las turbinas de velocidad fija tienen la superioridad de ser simples, robustas y confiables y bien probadas. El costo de la parte eléctrica es bajo. Tiene como desventaja el incontrolable consumo de potencia reactiva, fatigas mecánicas y un limitado control de la calidad de potencia, debido a la operación en velocidad fija todas las fluctuaciones en la velocidad del viento son adicionalmente trasmitidas como en el torque mecánico y entonces como fluctuaciones en la potencia de la red. En el caso de redes débiles las fluctuaciones de potencia pueden también ocasionar grandes fluctuaciones de tensión, el cual a su vez, resultará en pérdidas en la línea. Un esquema para una turbina de viento de velocidad fija se muestra en la figura 1.3. (Ackermann, 2005)



Figura 1.3 Esquema de un aerogenerador de velocidad fija. (Ackermann, 2005)

Los aerogeneradores de velocidad variable están diseñados para funcionar a una amplia gama de velocidades del rotor. Estas turbinas generalmente emplean el cambio de paso de las palas para la regulación de la potencia. Los controles de velocidad y de potencia le permiten a estas turbinas extraer más energía de un régimen de viento dado que las que pueden extraer las turbinas de viento de velocidad fija. Las turbinas de velocidad variable emplean máquinas de inducción de rotor bobinado WRIG (del inglés, *Wound Rotor Induction Generator*) que permiten el acceso al estator y al rotor de la máquina. El circuito del rotor de la máquina está conectado a un convertidor de corriente alterna (AC, del inglés *Alternant Current*) a corriente continua (DC, del inglés *Direct Current*) y a una resistencia fija. Existen distintas estructuras de conexión con la red en la figura 1.4 se muestra la estructura de un aerogenerador de velocidad variable

empleando resistencias variables. El convertidor se conecta para controlar la resistencia efectiva en el circuito del rotor de la máquina para permitir una amplia gama de variación de velocidad (hasta 10%). Sin embargo, la energía se pierde en forma de calor en la resistencia del circuito externo del rotor, aunque puede emplearse un controlador para variar la resistencia del rotor para la extracción óptima de potencia. En este tipo de turbinas se requiere una compensación de potencia reactiva. (Ackermann, 2005)



Figura 1.4 Esquema de un aerogenerador de velocidad variable con resistencia externa. (Ackermann, 2005)

En la figura 1.5 se muestra la estructura de un aerogenerador de velocidad variable, estructura conocida como aerogenerador con generador doblemente alimentado DFIG (del inglés, *Doubly Fed Induction Generator*), esta estructura remedia el problema de la pérdida de potencia en el circuito del rotor mediante el empleo de un convertidor de <u>AC/DC/AC</u> en el circuito del rotor para recuperar la potencia de deslizamiento. El control de vectorial de flujo de corrientes del rotor permite desacoplar la potencia de salida real y reactiva, así como la extracción de energía eólica maximizada y esfuerzos mecánicos reducidos. Además, estas turbinas suelen emplear cambio de paso de las palas para la regulación de potencia. Debido a que el convertidor manipula sólo la potencia de salida de la máquina. Las desventajas de esta tecnología son mayor costo y complejidad, que se compensan con la capacidad de extraer más energía de un determinado régimen de viento que las otras tecnologías. (Ackermann, 2005)



Figura 1.5 Esquema de un aerogenerador con DFIG. (Ackermann, 2005)

Los Aerogeneradores con convertidor completo, figura 1.6, tienen un convertidor AC/DC/AC, el cual es la única vía de flujo de alimentación de la turbina eólica a la red. Por lo tanto, no hay una conexión directa a la red, y el convertidor tiene que estar preparado para manejar toda la potencia a la salida del aerogenerador. Estas turbinas suelen emplear un número alto de polos, generadores sincrónicos de imán permanente PMSG (del inglés, Permanent Magnet Synchronous Generator), generadores síncronos WRSG (del inglés, Wound Rotor Synchronous Generator) o asincrónicos de rotor bobinado para permitir el funcionamiento a baja velocidad del viento, lo que permite la eliminación de la caja de cambios para aumentar la fiabilidad. Además, las turbinas de convertidor completo ofrecen un control de potencia activa y reactiva independiente, y típicamente emplean el cambio de paso de las palas para la regulación de la potencia. A pesar de que estas turbinas son relativamente caras, el aumento de la fiabilidad y la simplicidad del esquema de control de las turbinas DFIG son características atractivas, especialmente en instalaciones en alta mar donde el mantenimiento es costoso. (Ackermann, 2005)



Figura 1.6 Esquema de un aerogenerador con un convertidor completo de frecuencia de escala completa. (Ackermann, 2005)

De los cuatro tipos de turbinas existentes, esta tesis se centra en generador de inducción doblemente alimentado que aunque es de mayor complejidad y costo que la anterior, es el tipo de turbina más popular disponible en el mercado, pues las desventajas antes mencionadas se compensan con su capacidad de extraer más energía de un determinado régimen de vientos que las otras tecnologías.

1.4- Modelo matemático de una turbina de velocidad variable.

El modelo dinámico de un sistema de generación eólico incluye los siguientes subsistemas: modelo de la velocidad del viento, modelo aerodinámico de la turbina, modelo de la caja multiplicadora y el modelo del generador de inducción, los cuales se acoplan al modelo de la red de transporte y demás elementos del sistema eléctrico para realizar estudios de estabilidad. (Gónzalez, 2008)

En la figura 1.7 se muestra la descomposición metodológica empleada para realizar el modelado del sistema de generación eólico.





1.4.1- Modelado de la velocidad del viento.

El modelo equivalente de la velocidad del viento propuesto por **(Roohollad, 2009)** considera los efectos de corte del viento y de sombra de la torre. El corte del viento se refiere al incremento de la velocidad del viento con la altura debido a la fricción entre la superficie de la tierra y la velocidad del viento. El efecto de sombra de la torre se refiere a la reducción en el flujo de aire debido a la presencia de la torre. Para una turbina eólica de tres palas el torque

aerodinámico del rotor depende $3\omega_{rot}$ (tres es el número de palas, ω_{rot} es la velocidad angular de rotación del rotor), componente ondulatoria causada por el corte del viento y por la sombra de la torre. Así, este modelo puede exactamente reflejar las condiciones de carga del viento de una turbina de viento. Basado en este modelo la velocidad equivalente encima del área del rotor V_{viento} consiste en tres componentes: la velocidad del viento a la altura del centro V_{eq_0} , la componente de corte del viento $V_{eq_{cv}}$ y la componente de sombra de la torre $V_{eq_{st}}$. La velocidad equivalente del viento y el análisis de las ecuaciones se muestran a continuación:

$$V_{viento} = V_{eq_0} + V_{eq_{cv}} + V_{eq_{st}}$$
(1.1)

$$V_{eq_0} = V_H \tag{1.2}$$

$$V_{eq_{cv}} = V_H \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{8} \left(\frac{R}{H}\right)^2 + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{60} \left(\frac{R}{H}\right)^3 \cos 3\psi \right]$$
(1.3)

$$V_{eq_{st}} = \frac{MV_H}{3R^2} \sum_{1}^{3} \left[\frac{a^2}{\sin^2 \psi_b} \ln\left(\frac{R^2 \sin^2 \psi_b}{x^2} + 1\right) - \frac{2a^2 R^2}{R^2 \sin^2 \psi_b + x^2} \right]$$
(1.4)

$$\psi_1 = \psi \qquad \psi_2 = \psi + \frac{2\pi}{3} \qquad \psi_3 = \psi + \frac{4\pi}{3}$$
(1.5)

$$V_{0} = \left[1 + \frac{\alpha(\alpha - 1)R^{2}}{8H^{2}}\right]V_{H} = MV_{H}$$
(1.6)

Donde V_H es la velocidad del viento a la altura del centro del rotor (m/s); α es exponente de corte del viento, este valor empírico es afectado por la rugosidad de la superficie (Tabla 1.2); H es la altura de centro del rotor (m); ψ es ángulo azimut de la pala (°) y varía de 0°-360°; ψ_b es ángulo azimut para cada pala (°); que varía de 0°-360°, definido en la ecuación 1.5 para una turbina eólica de tres palas; a es el radio de la torre (m); x es la distancia de la línea media de la torre al plano de rotación de las palas (m); V_0 es la velocidad media del viento, y M factor de conversión de la velocidad del viento.

Terreno	α	
Liso (mar, arena, nieve, etc)	0.10-0.13	
Irregularidades medias (praderas, tierras sembradas, pueblos, etc)		
Irregularidades(bosques y áreas suburbanas, etc)		
Muchas Irregularidades (Ciudad, Altas construcciones, colinas,	0.27-0.40	
etc)		

Tabla 1.2 Variación de los valores empíricos de α con el terreno.



Figura 1.8 Definición de algunos parámetros dimensionales de una turbina eólica. (Roohollad, 2009)

1.4.2- Modelo aerodinámico de la turbina eólica.

La potencia mecánica *Pmec* producida por una turbina de viento está dada por la ecuación (1.7), donde ρ es la densidad del aire, A es la superficie barrida por el aspa, V_{viento} es la velocidad equivalente del viento, C_p es el coeficiente de potencia, β es el ángulo de paso de las aspas, ω_{rot} es la velocidad mecánica de la turbina, λ coeficiente de velocidad específica y R el radio del aspa. (Gónzalez, 2008)

$$Pmec = \frac{1}{2}\rho A V_{viento}{}^{3}C_{p}(\lambda,\beta)$$
(1.7)

$$\lambda = \frac{\omega_{rot} R}{V_{viento}} \tag{1.8}$$

El máximo valor teórico de C_p es de 0.539, denominado límite de Betz. Este coeficiente depende del diseño aerodinámico de la turbina y es bastante inferior

al máximo debido a imperfecciones en el diseño y pérdidas por carga aerodinámica. El coeficiente de potencia a la forma de la expresión (1.9).

$$C_{p} = C_{1} \left(\frac{C_{2}}{\lambda_{i}} - C_{3}\beta - C_{4} \right) e^{-C_{5}/\lambda_{i}} + C_{6}\lambda$$
(1.9)

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$
(1.10)

donde:

$$C_1 = 0.5176; C_2 = 116; C_3 = 0.4; C_4 = 5; C_5 = 21; C_6 = 0.0068$$

El torque aerodinámico T_{aer} se obtiene dividiendo la potencia producida por el viento, *Pmec* entre la velocidad del rotor de la turbina, ω_{rot} ecuación (1.11).

$$T_{aer} = \frac{Pmec}{\omega_{rot}} \tag{1.11}$$

1.4.3- Modelo del subsistema mecánico.

Existen componentes mecánicos presentes en una turbina eólica que pueden transmitir oscilaciones a la red, como son las aspas, el eje de baja velocidad, la caja multiplicadora y el eje de alta velocidad. Una aproximación común para caracterizar esta dinámica es utilizar el modelo dinámico de un sistema de cuatro masas (figura 1.9), considerando que la unión entre las aspas y el buje está fuertemente amortiguada. Las ecuaciones que describen la dinámica del sistema se presentan de la ecuación (1.12) a la ecuación (1.18). (Gónzalez, 2008)

$$T_{aer} - D_{ebv}(\omega_{rot} - \omega_1) - Q_{ebv} = J_{ebv}\frac{d}{dt}\omega_{rot}$$
(1.12)

$$D_{ebv}(\omega_{rot} - \omega_1) + Q_{ebv} - T_1 = J_{eng_1} \frac{d}{dt} \omega_1$$
(1.13)

$$T_2 - D_{eab} \left(\omega_2 - \omega_{gen} \right) - Q_{eav} = J_{eng2} \frac{d}{dt} \omega_2$$
(1.14)



Figura 1.9 Modelo de cuatro masas para el sistema mecánico. (Gónzalez, 2008)

$$D_{eav}(\omega_2 - \omega_{gen}) + Q_{gen} - T_{gen} = J_{eav} \frac{d}{dt} \omega_{gen}$$
(1.15)

$$Q_{ebv} = K_{ebv} \int (\omega_{rot} - \omega_1) dt \tag{1.16}$$

$$Q_{eav} = K_{eav} \int (\omega_2 - \omega_{gen}) dt$$
(1.17)

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = n_{eng} \tag{1.18}$$

donde:

 T_{gen} : Par electromagnético producido por el generador de inducción (*Nm*).

 ω_1, ω_2 : Velocidad mecánica de los engranes de la caja multiplicadora (*rad/s*).

 ω_{gen} : Velocidad mecánica del generador (rad/s).

 Q_{ebv} : Par de reacción debido a la rigidez del eje de baja velocidad (*Nm*).

- Q_{eav} : Par de reacción debido a la rigidez del eje de alta velocidad (*Nm*).
- J_{ebv} : Momento de inercia de las aspas y el buje (Kgm^2).
- K_{ebv} : Coeficiente de rigidez del eje de baja velocidad (Nm/rad).
- K_{eav} : Coeficiente de rigidez del eje de alta velocidad (Nm/rad).
- D_{ebv} : Coeficiente de amortiguamiento del eje de baja velocidad (*Nms/rad*).

 D_{eav} : Coeficiente de amortiguamiento del eje de alta velocidad (*Nms/rad*).

 J_{eng1}, J_{eng2} : Momentos de inercia de los engranes de la caja multiplicadora (Kgm^2) .

 n_{eng} : Relación de engranes de la caja multiplicador.

 J_{eav} : Momento de inercia del generador de inducción (Kgm^2).

1.5- Modelo del subsistema eléctrico.

Para analizar el modelo del subsistema eléctrico, este se ha dividido en dos partes para su mejor comprensión, el modelo del generador doblemente alimentado y el modelo del convertidor electrónico potencia bidireccional, los cuales serán analizados en los dos subepígrafes siguientes.

1.5.1- Modelo del generador doblemente alimentado (DFIG).

El modelo del generador doblemente alimentado está basado en dos transformaciones de coordenadas, denominadas de Clarke y Park, que tienen como objetivo simplificar las ecuaciones que representan al generador eléctrico porque permiten convertir el sistema trifásico en un sistema bifásico, Clarke reduce el número de ecuaciones de seis a cuatro, y Park permite obtener un sistema de ecuaciones con coeficientes que no dependen de la posición angular del rotor, al referir las variables del rotor y del estator a un sistema de referencia generalizado.

En este trabajo se supone un sistema trifásico balanceado definido como:

$$V_a = V_{max} \cos wt \tag{1.19}$$

$$V_b = V_{max} \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{1.20}$$

$$V_c = V_{max} \cos\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{1.21}$$

donde:

 V_a , V_b , V_c Tensiones de fase (V).

 V_{max} Tensión máxima o amplitud máxima (V).

$$V_{max} = \sqrt{2}V_{ef}$$
; $V_{max} = \frac{\sqrt{2}V_{efl}}{\sqrt{3}}$ (1.22)

 V_{ef} Tensión efectiva de fase (V).

 V_{efl} Tensión efectiva de línea (V).

A este conjunto de ecuaciones, que definen las tensiones trifásicas, se le aplican la transformada de Clarke y Park para obtenerlas en el sistema de coordenadas generalizado empleando la ecuación 1.23, la cual es demostrada en el Anexo 1.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$
(1.23)

Las ecuaciones eléctricas del <u>DFIG</u> en el sistema de coordenadas generalizado son mostradas a continuación: (Calderon, Mina, Calleja, & López, 2014)

$$V_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt}$$
(1.24)

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt}$$
(1.25)

$$V_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt}$$
(1.26)

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt}$$
(1.27)

$$\omega_r = \omega_s - \omega_{gen} \tag{1.28}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \tag{1.29}$$

Donde se muestran las magnitudes de las tensiones, corrientes y flujos (Φ) para el rotor y el estator en los ejes directos y en cuadratura. Además se tiene que:

 R_s Resistencia del estator (ohm).

 R_r Resistencia del rotor (ohm).

 L_s Inductancia del estator (mH).

 L_r Inductancia del rotor (mH).

 ω_r Velocidad del campo del rotor visto en el rotor (*rad/s*).

 ω_s Velocidad sincrónica (*rad/s*).

p Número de pares de polos.

Ecuaciones de flujo: (Calderon, Mina, Calleja, & López, 2014)

$$\Phi_{ds} = \left(Ll_s + \frac{3}{2}L_{ms}\right)i_{ds} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{dr}$$
(1.30)

$$\Phi_{qs} = \left(Ll_s + \frac{3}{2}L_{ms}\right)i_{qs} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qr}$$
(1.31)

$$\Phi_{dr} = \left(Ll_r + \frac{3}{2}L_{ms}\right)i_{dr} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{ds}$$
(1.32)

$$\Phi_{qr} = \left(Ll_r + \frac{3}{2}L_{ms}\right)i_{qr} + \frac{3}{2}L_{ms}i_{qs}$$
(1.33)

donde:

- Ll_s Inductancia de dispersión del estator (mH).
- Ll_r Inductancia de dispersión del rotor (mH).

 L_{ms} Inductancia mutual (mH).

$$L_{S} = Ll_{s} + \frac{3}{2}L_{ms}$$
(1.34)

$$L_R = L l_r + \frac{3}{2} L_{ms} \tag{1.35}$$

Los dos circuitos equivalentes que representan el comportamiento dinámico de la parte eléctrica del generador doblemente alimentado, uno por cada eje, son los mostrados en las figuras 1.10 y 1.11. (Olmedo, 2013)


Figura 1.10 Circuito equivalente en el eje directo, d.



Figura 1.11 Circuito equivalente en el eje cuadratura, q.

La expresión matemática del par electromagnético es: (Olmedo, 2013)

$$T_{gen} = \frac{3}{2} p \left(\Phi_{dr} i_{qs} - \Phi_{qr} i_{ds} \right)$$
(1.36)

Las potencias eléctricas: (Olmedo, 2013)

$$P_{s} = \frac{3}{2} \left(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \right) Potencia activa (W)$$
(1.37)

$$Q_s = \frac{3}{2} \left(V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \right) Potencia \ reactiva \ (VAR)$$
(1.38)

1.5.2- Modelo del convertidor electrónico de potencia.

En la figura 1.12 se muestra las dos partes en que se divide el convertidor de potencia: convertidor del lado del rotor RSC (en inglés, <u>Rotor Side Converter</u>) y el convertidor del lado de la red GSC (en inglés, <u>Grid Side Converter</u>). El convertidor del lado del rotor controla la potencia activa y reactiva de la máquina empleando la transformada de Park. De esta forma la componente q de la corriente del rotor es usada para controlar la potencia reactiva y la componente d para controlar el torque de la turbina eólica, por lo tanto su velocidad. El convertidor del lado de red mantiene la tensión de <u>DC</u> en el valor predefinido,

independiente de la magnitud y dirección de la potencia del rotor y además garantiza que la operación del convertidor sea con un factor de potencia de uno que no genere ni consuma potencia reactiva. Por lo que el convertidor del lado de la red solo intercambia potencia activa con la red, por lo tanto la transmisión de potencia reactiva se realiza a través del estator de la máquina. (Olmedo, 2013)



Figura 1.12 Esquema del convertidor de potencia. (Calderon, Mina, Calleja, & López, 2014)

Así, el modelo del <u>GSC</u> expresado en forma matricial y considerando que Ra = Rb = Rc resistencia de la red y La = Lb = Lc inductancia de la red, queda de la siguiente manera:

$$L\begin{bmatrix}\frac{di_{ag}}{dt}\\\frac{di_{bg}}{dt}\\\frac{di_{cg}}{dt}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}V_{as}\\V_{bs}\\V_{cs}\end{bmatrix} - \frac{u_{cd}}{3}\begin{bmatrix}2 & -1 & -1\\-1 & 2 & -1\\-1 & -1 & 2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}S_{ag}\\S_{bg}\\S_{cg}\end{bmatrix} - R\begin{bmatrix}i_{ag}\\i_{bg}\\i_{cg}\end{bmatrix}$$
(1.39)

$$C\frac{du_{cd}}{dt} = i_c = i_{ogsc} - i_{orsc} \tag{1.40}$$

Por su parte, en el esquema de la figura 1.12 se puede observar que no se considera una impedancia RL para el <u>RSC</u>; por lo tanto, el modelo que describe al RSC se obtiene análogamente a (1.39), con Ra, b, c = 0 y La, b, c = 0; esto es:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \frac{u_{cd}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{ar} \\ S_{br} \\ S_{cr} \end{bmatrix}$$
(1.41)

Adicionalmente, es necesario establecer ecuaciones que permitan obtener las corrientes *iorsc* y *iogsc*, corrientes de salida de los convertidores respectivamente (véase figura 1.12) a partir de las corrientes *abc* del rotor y de las corrientes del <u>GSC</u>, respectivamente. Éstas se plantean a continuación:

$$i_{orsc} = S_{ar}i_{ar} + S_{br}i_{br} + S_{cr}i_{cr}$$

$$(1.42)$$

$$i_{ogsc} = S_{ag}i_{ag} + S_{bg}i_{bg} + S_{cg}i_{cg}$$
(1.43)

Donde *Sar*, *Sbr*, *Scr* y *Sag*, *Sbg*, *Scg* corresponden a las señales de control para el <u>RSC</u> y el <u>GSC</u>, respectivamente, tomando el valor de 1 o 0.

1.6- Sistemas de Control.

El control para cada turbina eólica considera los estados de encendido y apagado, así como el comportamiento cuando la planta se encuentra en estado de detención. Además, actúa sobre la velocidad de giro de modo que el aerogenerador opere dentro de los rangos de diseño (velocidad de conexión y velocidad de desconexión), siendo especialmente relevante tener una estrategia de control que impida que el límite de velocidad se exceda en caso que la velocidad del viento aumente en forma desmedida. En este sentido, existen varias estrategias de control enfocadas al aprovechamiento de la energía eólica natural y su transferencia hacia el eje de las turbinas, pudiendo emplearse en forma individual o bien en forma conjunta dependiendo del nivel de potencia. Entre ellas se encuentra el control de la orientación (<u>Yaw</u>), control del ángulo de paso (<u>Pitch</u>), manejo de la geometría de las aspas, pérdida (<u>Stall</u>) y el control por medio de alerones. (Figueroa, 2007)

Las entradas del controlador de cada aerogenerador corresponden a variable físicas propias de la operación, como lo son las características del viento, revoluciones del eje, temperatura de los devanados del generador, la temperatura de los cojinetes del multiplicador, el tamaño y la frecuencia de las vibraciones en la góndola y en las palas del rotor, etc. Las salidas de sistema de control son señales que son aplicadas directamente hacia los actuadores, sin embargo, estas salidas resultantes de la estrategia de control se encuentran influidas por las acciones determinadas por el control supervisor (*Wind Plant Master Controller*). (ABB, 2012)

27

A continuación se presentan los mecanismos de control más utilizados actualmente:

Mecanismo de orientación (yaw control): El mecanismo de orientación de un aerogenerador es utilizado para girar el rotor de la turbina en contra del viento para evitar un error de orientación. Se dice que la turbina eólica tiene un error de orientación si el plano del rotor no está perpendicular al viento, por lo cual una menor proporción de la energía del viento será aprovechada por el rotor. A simple vista, esto parece ser una excelente forma de controlar la potencia de entrada al rotor del aerogenerador, sin embargo, la parte del rotor más próxima a la dirección de la fuente de viento estará sometida a un mayor esfuerzo (par flector) que el resto del rotor. Por tanto, las turbinas eólicas que estén funcionando con un error de orientación estarán sujetas a mayores cargas de fatiga que las orientadas en una dirección perpendicular al viento. Casi todos los aerogeneradores de eje horizontal emplean orientación forzada, es decir, utilizan un mecanismo que mantiene la turbina orientada en contra del viento mediante motores eléctricos y multiplicadores. El mecanismo de orientación se activa por un controlador electrónico que vigila la posición de la veleta de la turbina varias veces por segundo, cuando la turbina está girando. Adicionalmente, los aerogeneradores cuentan con un contador de la torsión de los cables. Esto debido a que los cables que llevan la corriente desde el generador de la turbina eólica hacia abajo a lo largo de la torre estarán cada vez más torsionados si la turbina, por accidente, se sigue orientando en el mismo sentido durante un largo periodo de tiempo. Así pues, el contador de la torsión en los cables avisará al controlador de cuando es necesario destorsionar los cables. Como en todos los equipos de seguridad en la turbina, este sistema es redundante. En este caso, la turbina está equipada también con un interruptor de cordón que se activa cuando los cables se torsionan demasiado.

Regulación por cambio del ángulo de paso (*pitch controlled*): En un aerogenerador de regulación por cambio del ángulo de paso, el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente

hace girar las palas del rotor fuera del viento. A la inversa, las palas son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo. El diseño de aerogeneradores controlados por cambio del ángulo de paso requiere una ingeniería muy desarrollada, para asegurar que las palas giren exactamente el ángulo deseado. En este tipo de aerogeneradores, el sistema de control generalmente girará las palas unos pocos grados cada vez que el viento cambie, para mantener un ángulo óptimo que proporcione el máximo rendimiento a todas las velocidades de viento. El mecanismo de cambio del ángulo de paso suele funcionar de forma hidráulica y los ángulos típicos de operación se encuentran entre los -5º y los 89.9º.

Regulación pasiva por pérdida aerodinámica (stall controlled (passive)): Los aerogeneradores de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tienen las palas unidas al buje en un ángulo fijo. Sin embargo, el perfil de la pala ha sido aerodinámicamente diseñado para asegurar que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se creará turbulencia en la parte de la pala que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional de la pala actúe sobre el rotor. La geometría de diseño hace que pala esté ligeramente torsionada a lo largo de su eje longitudinal, esto es así en parte para asegurar que la pala pierde la sustentación de forma gradual, en lugar de hacerlo bruscamente, cuando la velocidad del viento alcanza su valor crítico. La principal ventaja de la regulación por pérdida aerodinámica es que se evitan las partes móviles del rotor y un complejo sistema de control. Por otro lado, la regulación por pérdida aerodinámica representa un problema de diseño aerodinámico muy complejo, y presenta retos en el diseño de la dinámica estructural de toda la turbina, para evitar las vibraciones provocadas por la pérdida de sustentación. Alrededor de las dos terceras partes de los aerogeneradores que actualmente se están instalando en todo el mundo son máquinas de regulación por pérdida aerodinámica. (ABB, 2012)

Regulación activa por pérdida aerodinámica (<u>stall controlled (active)</u>): Un número creciente de grandes aerogeneradores (a partir de 1 MW) está siendo desarrollado con un mecanismo de regulación activa por pérdida aerodinámica. Técnicamente, las máquinas de regulación activa por pérdida aerodinámica se parecen a las de regulación por cambio del ángulo de paso, en el sentido de que

29

ambos tienen palas que pueden girar. Para tener un momento de torsión (fuerza de giro) razonablemente alto a bajas velocidades del viento, este tipo de máquinas serán normalmente programadas para girar sus palas como las de regulación por cambio del ángulo de paso a bajas velocidades del viento (a menudo solo utilizan unos pocos pasos fijos, dependiendo de la velocidad del viento). Sin embargo, este tipo de máquinas presenta una gran diferencia respecto a las máquinas reguladas por cambio del ángulo de paso, al alcanzar su potencia nominal: si el generador va a sobrecargarse, la máquina girará las palas en la dirección contraria a la que lo haría una máquina de regulación por cambio del ángulo de paso. En otras palabras, aumentará el ángulo de paso de las palas para llevarlas hasta una posición de mayor pérdida de sustentación, y poder así consumir el exceso de energía del viento. Una de las ventajas de la regulación activa por pérdida aerodinámica es que la producción de potencia puede ser controlada de forma más exacta que con la regulación pasiva, con el fin de evitar que al principio de una ráfaga de viento la potencia nominal sea sobrepasada. Otra de las ventajas es que la máquina puede funcionar casi exactamente a la potencia nominal a todas las velocidades de viento. Un aerogenerador normal de regulación pasiva por pérdida aerodinámica tendrá generalmente una caída en la producción de potencia eléctrica a altas velocidades de viento, dado que las palas alcanzan una mayor pérdida de sustentación. Los ángulos típicos de control en este caso son entre 0° y 4°. (ABB, 2012)

1.7- Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se han abordado los aspectos necesarios tales como: el principio de funcionamiento de cada componente que forma parte de un generador eólico así como sus respectivos modelos matemáticos incluyendo el modelo de la velocidad del viento resultante hacia las palas. Este aseguramiento en modelos matemáticos es lo que permitirá construir el modelo Simulink, el cual es la base del simulador, y que será objeto del capítulo siguiente los cuales serán evaluados considerando el caso del generador eólico del parque Gibara I de la firma Gamesa.

Capítulo 2 SimEólica: plataforma para el diseño y experimentación con plantas eólicas conectadas a la red.

2.1- Generalidades

SimEólica es un software construido usando las facilidades del MatLab versión R2015a. Es una plataforma para el diseño y experimentación con plantas eólicas conectadas a la red. El software utiliza herramientas que han sido programadas a partir de la necesidad de realizar ensayos en plantas eólicas y analizar su comportamiento dinámico.

El programa está construido sobre una interface de usuario que facilita la interacción con las funciones del sistema, además cuenta con un modelo Simulink donde se describen las distintas ecuaciones que modelan los distintos subsistemas. Para el diseño de la interfaz gráfica se usó el Toolbox GUIDE (del inglés, <u>Graphical User Interface Development Environment</u>) del MatLab, un ambiente de desarrollo integrado para la confección de interfaces gráficas de usuario que permite el diseño y la ejecución de programas que necesiten ingreso continuo de datos.

2.2- Principales características de la interfaz gráfica

La interfaz gráfica está formada por dos <u>GUIDE</u> principales, el primero es para introducir los coeficientes paramétricos de los modelos matemáticos de la parte aerodinámica, la parte mecánica y el subsistema eléctrico (véase figuras 2.1 y 2.2) y el segundo para configurar: los parámetros de la simulación, el coeficiente paramétrico de la densidad del aire, el vector de muestras deseados de la serie temporal disponible de velocidad del viento, el valor de consigna del lazo de control del ángulo de paso con la potencia nominal deseada, los tres valores de consigna en potencia para los convertidores electrónicos de potencia bidireccional <u>RSC</u> y <u>GSC</u> (véase figura 2.3). Este 2do <u>GUIDE</u> brinda la facilidad al usuario de graficar las series temporales correspondientes a las variables indicadas en la figura 2.4. En sentido general cada de los bloques contiene una serie de parámetros que permiten la construcción de los modelos planteados en el capítulo anterior, ajustar los parámetros para la simulación y cargar los datos, además se exponen las distintas unidades de estas variables en el sistema internacional de unidades.

2.2.1- Características del GUIDE I. Parámetros de Diseño.

El GUIDE I. parámetros de simulación está dividido por cuatro bloques: Parte Aerodinámica, parte mecánica, parte eléctrica y parámetros auxiliares. En la figura 2.1 se muestra las distintas variables y sus unidades en el sistema internacional para la parte aerodinámica y la parte mecánica, además de componentes que permiten la entrada de los valores por parte del usuario y un botón para pasarle los valores al modelo de Simulink de esta manera lograr construir las ecuaciones que describen el comportamiento dinámico de estos subsistemas.



Figura 2.1 GUIDE I. Parámetros de Diseño. Parte Aerodinámica y Parte Mecánica.

Además de estos dos bloques el primer GUIDE posee el bloque de la parte eléctrica y los parámetros auxiliares. En la figura 2.2 se muestran estas dos partes con sus parámetros y las respectivas unidades en el sistema internacional de unidades. Los parámetros auxiliares son los parámetros de la red eléctrica y los parámetros del convertidor de potencia. Al igual que los demás bloques el usuario tiene la posibilidad de entrar los valores para realizar la simulación y mediante el botón Guardar pasarlos al modelo Simulink. En sentido general si el usuario introduce valores que no son permisibles el programa mostrará un mensaje de error. De esta forma se evitará que las variables tomen valores no deseados y así garantizar que la simulación se realice correctamente.



Figura 2.2 GUIDE I. Parámetros de Diseño. Parte Eléctrica y Parámetros Auxiliares.

2.2.2- Características del GUIDE II. Simulación y Control.

El GUIDE II. Simulación y Control permite ajustar los valores del tiempo de simulación y algunos parámetros para la construcción de las ecuaciones del modelo del viento. Además permite cargar los datos para realizar la simulación siendo seleccionados por parte del usuario, el cual pueden seleccionar el mes y la cantidad de muestras para la simulación. El programa devuelve la cantidad de valores y la fecha y hora que se tomará para la simulación, todos estos ajustes se realizan en el bloque parámetros de simulación de la figura 2.3, por último se tiene un botón que permite pasarle los valores al modelo Simulink. El bloque parámetros de control permite introducir una serie de valores para construir los sistemas de control de ángulo de paso, y sistema de control del convertidor de

potencia y empleando una pequeña interfaz ajustar los valores de los controladores, así se guardan y se le pasan al modelo Simulink.

Parámetros de Simulación	Parámetros de Control
Tiempo de Simulación (seg)	Control del Ángulo de paso Potencia nominal (kW)
Exponente del Corte del Viento	Tiempo de respuesta (seg)
Densidad del aire (Kg/m^3)	Valores desde Hasta
Datos:	Controlador
Cantidad de datos	Control del convertidor de potencia
Rango de los Datos	Potencia activa de referencia RSC (kW)
Desde la muestra	Potencia reactiva de referencia RSC (kW)
Hasta la muestra	Potencia reactiva de referencia GSC (kW)
Muestras para la Simulación	Controladores
Desde	Control de la Orientación
Hasta	
Cargar Datos Guardar	Guardar Simular

Figura 2.3 GUIDE II. Simulación y control. Parámetros de Simulación y parámetros de control.

Además el GUIDE II. Simulación y Control tiene la facilidad de mostrar un conjunto de gráficas que permiten analizar el comportamiento dinámico de la planta eólica, ya sean parámetros eléctricos, mecánicos y de eficiencia. Estas curvas se corresponden con el tiempo de simulación que se fija por parte del usuario y por la cantidad de valores que se tomaron para la simulación. El usuario tiene la libertad de escoger cuál o cuáles curvas quiere visualizar. En la figura 2.4 se muestra el fragmento del GUIDE que realiza las funciones para visualizar las gráficas, con un botón el cual ejecuta el comando para graficar.



Figura 2.4 GUIDE II. Simulación y Control. Opciones de Gráficas.

2.3- Principales características del modelo Simulink.

El modelo Simulink está diseñado siguiendo la misma estrategia de trabajo obtenida para realizar modelado de cada subsistema de la planta eólica, de esta forma se hace más comprensible y en caso de encontrar algún error sería más fácil corregirlo. Por lo tanto el modelo Simulink está formado por seis subsistemas: Viento, parte aerodinámica, parte mecánica, parte eléctrica, convertidor de potencia y sistema de control, a continuación se realizará una breve descripción de cada bloque sus entradas, salidas y algunos ajustes a la hora de realizar la simulación.

2.3.1- Subsistema del Viento.

En la figura 2.5 se muestra el modelo Simulink del viento el cual contiene las ecuaciones que modelan el comportamiento de esta variable (véase ecuación 1.2 a la ecuación 1.6), además dentro del modelo para permitir la simulación se tiene el bloque From Workspace que permite cargar variables desde el espacio de trabajo, en este caso se emplea para cargar los datos de las velocidades de

viento en forma de serie temporal. Por otra parte se tiene que durante el tiempo de simulación la posición de las palas cambian por lo tanto su posición angular, de aquí que se implemente el esquema de la parte derecha que permite determinar en cada instante de simulación el nuevo ángulo azimut para una pala y luego sumando 120 grados obtener la posición de las demás palas. Esto es importante para calcular la componente de sombra de la torre que se describe en las ecuaciones del viento.

La salida de este bloque es el viento simulado y servirá como señal para el subsistema de la parte aerodinámica, además se emplea un Scope como opción para visualizar y luego exportar los valores al espacio de trabajo de esta variable, en este caso en forma de estructuras de tiempo, permitiendo obtener la gráfica del comportamiento de esta durante la simulación.





2.3.2- Subsistema Aerodinámico.

El subsistema de la parte aerodinámica figura 2.6 tiene como entradas la velocidad del viento que se obtuvo en el subsistema anterior, la velocidad de rotación del rotor que es consecuencia de la parte mecánica, esta se suma a la velocidad rotación que provoca el viento. Además se tienen las entradas de control para el ángulo de paso (ControlBeta) que se suma al valor inicial de esta variable, fijada por el usuario inicialmente. Las ecuaciones que conforman subsistema son las ecuaciones 1.7 a la 1.11. Como salidas para exportar al espacio de trabajo se tienen el ángulo de paso, el coeficiente de potencia, la potencia mecánica y el torque aerodinámico, este último se emplea como señal el subsistema de la parte mecánica.



Figura 2.6 Esquema Simulink del subsistema de la parte aerodinámica.

2.3.3- Subsistema Mecánico.

El subsistema mecánico figura 2.7 tiene como entradas el torque aerodinámico resultado del subsistema anterior y el torque electromagnético que se produce en el subsistema eléctrico. Las ecuaciones que conforman este subsistema son las ecuaciones 1.12 a la 1.18. En este subsistema se transforma el movimiento o la potencia mecánica del viento en potencia en el eje del generador. Como salidas se tienen la velocidad mecánica del rotor, que realimenta al bloque del viento y el subsistema aerodinámico, y la velocidad del generador que se emplea como entrada en el subsistema eléctrico. Estas variables son exportadas al espacio de trabajo y se dan como opciones de gráficas que el usuario puede visualizar.



Figura 2.7 Esquema Simulink del subsistema mecánico.

2.3.4- Subsistema Eléctrico.

El subsistema eléctrico, figura 2.8 está formada por las cuatro ecuaciones de tensión y de flujo que describen el comportamiento dinámico del generador doblemente alimentado (véase ecuaciones de 1.24 a 1.35), además contiene el bloque de la fuente trifásica, las conversiones de los sistemas de coordenadas (véase ecuación 1.23) y los subsistemas para la obtención de la potencia reactiva, activa y el torque electromagnético (véase ecuaciones 1.36, 1.37 y 1.38 respectivamente). Las entradas de este subsistema son la velocidad del generador que proviene de la parte mecánica y las tensiones de salida del convertidor de potencia. Las salidas son el torque electromagnético, la potencia activa y reactiva, las cuales son exportadas al espacio de trabajo y pueden ser visualizadas por el usuario como curvas características del funcionamiento de la planta simulada.





2.3.5- Subsistema del Convertidor de potencia bidireccional.

El subsistema del convertidor de potencia bidireccional, figura 2.9 tiene como entradas las señales de la corrientes de salida del rotor en sistema *dq*, así como la velocidad campo del rotor referido al rotor que se emplea en la transformación de coordenadas y la componente de secuencia cero. Además tiene como entradas las señales, figura 2.9 parte derecha, que se generan en el subsistema del sistema de control mediante la modulación de ancho de pulso (<u>PWM</u>), estas señales toman valores de 0 o 1. El convertidor de potencia está formado por las

ecuaciones del convertidor del lado de la red, convertidor del lado del rotor y del capacitor del bus de <u>CD</u> (corriente directa). Este subsistema está formado por las ecuaciones 1.39 a la ecuación 1.43.



Figura 2.9 Esquema Simulink del subsistema del convertidor de potencia bireccional.

2.3.6- Subsistema del Sistema de Control.

El subsistema del sistema de control, figura 2.10 está formado por el lazo de control del ángulo de paso para controlar la potencia activa de salida y de esta forma cumplir seguimiento del punto de máxima potencia. El desarrollo para la obtención del esquema Simulink de este lazo se representa en el Anexo 2, constituido por un controlador de tipo PID que se ajusta de forma experimental según los requerimientos del proceso y las necesidades del usuario. El control del ángulo de paso se realiza tomando como referencia la potencia nominal de la máquina y la realimentación de la potencia activa que se está generando. Además este esquema está formado por el actuador del ángulo de paso, un saturador para limitar el rango en que se mueven las palas y un sistema de primer orden que permite limitar la velocidad empleando la constante de tiempo, este

valor se fija por el usuario. Este subsistema tiene otros componentes que conforman el control de convertidor del lado del rotor y del convertidor del lado de red, el desarrollo para la obtención de las distintas señales, ecuaciones y el esquema Simulink que permiten obtener las señales de disparo que forman parte del modelo del convertidor de potencia se describen en el Anexo 3. Estos lazos de control emplean como estrategia de control el control PI el ajuste de los valores se realiza experimentalmente, estos lazos emplean como referencia en el caso del control del convertidor del lado del rotor la potencia activa y reactiva para este dispositivo, en el convertidor del lado de la red la tensión en el bus de <u>CD</u> y la potencia reactiva, de esta forma se tienen una serie de variables que se transforman del sistema dq al sistema trifásico empleadas como referencia para realizar la modulación por ancho de pulso (<u>PWM</u>) y generar las señales de disparo empleadas en el modelo del convertidor de potencia.



Figura 2.10 Esquema Simulink del subsistema del sistema de control.

2.4- Especificaciones en la simulación.

A continuación se muestran el tratamiento previo de los datos, eliminando los valores negativos y valores nulos, además de la selección del aerogenerador 2 para realizar la simulación.

2.4.1- Datos para la simulación.

Para la realización de la simulación se empleó una base de datos del año 2016, tomadas en el Parque Eólico Gibara I de la provincia de Holguín en la cual se registran la fecha y hora, el número de aerogenerador, la velocidad del viento, la posición de la góndola, la potencia activa y reactiva que se está generando y otros datos de interés. En el desarrollo del trabajo se realizó el tratamiento de los datos tomando las mediciones que se realizaron en el aerogenerador número 2 que se mantuvo en funcionamiento durante el tiempo en que se tienen los datos, estos datos fueron guardados en hojas de Excel donde se tienen la Fecha y hora, la velocidad del viento y los pulsos que se obtiene por el sensor que determina la posición de la góndola. Para la obtención de la dirección del viento se empleó la ecuación 2.1 que fue montada en Excel.

$$D_{viento} = Residuo\left(\left(\left(Pulsos * \frac{360}{2000}\right) + 210\right); 360\right)$$
(2.1)

donde:

D_{viento}: Dirección del viento (grados).

Pulsos : Pulsos obtenidos.

Además 2000 es la cantidad de pulsos para una vuelta o sea 360⁰ y el valor 210 es el offset que es el valor donde se montó inicialmente el sensor fotoeléctrico respecto al norte magnético. La función residuo proporciona el residuo después de dividir un número entre un divisor. Los valores de entrada del simulador se convierten en series temporales empleando la función especificada en el anexo 4 y utilizando como vector de tiempo la división entre el tiempo de simulación y la cantidad de valores, de esta forma se obtiene el incremento y el vector de tiempo sería desde el incremento hasta el tiempo de simulación.

2.4.2- Parámetros de Diseño.

Subsistema Aerodinámico:

Tabla 2.1 Parámetros de configuración del subsistema aerodinámico.

Diámetro de rotor (m): 52	Distancia de las palas a la torre (<i>m</i>): 2.75
Altura del rotor (m): 55	Ángulo de paso inicial de las palas (grado): 89
Diámetro superior de la torre (<i>m</i>): 2.44	Ángulo azimut inicial de las palas (grado): 80

Subsistema Mecánica:

Tabla 2.2 Parámetros de configuración del subsistema mecánico.

Variable	Eje de baja	Eje de alta	Caja
	velocidad	velocidad	multiplicadora
Momento de inercia (Kgm^2)	4000	54	Eng. 1: 0.01
			Eng. 2: 0.01

Coeficiente de	74600	1000	Relación de
amortiguamiento (Nms/rad)			trasmisión:
			74.5
Coeficiente de rigidez	11400	100	
(Nm/rad)			

Subsistema Eléctrico:

Tabla 2.3 Parámetros de configuración de la parte eléctrica.

Variable	Estator		Rotor
Resistencia (ohm)	0.0159		0.0122
Inductancia de dispersión (mH)	0.0422		0.0297
Inductancia mutua (mH)		21.19	
Número de pares de polos		2	

Parámetros auxiliares:

Tabla 2.4 Parámetros de configuración de la red y el convertidor.

Red eléctrica	
Tensión efectiva de línea (V)	690
Frecuencia de la red (Hz)	60
Resistencia de red (ohm)	0.1
Inductancia de red (mH)	15
Convertidor de potencia	
Período de conmutación (μseg)	100
Potencia manejada (W)	21000
Rizo de tensión deseado (V)	1.035

2.4.3- Parámetros de Simulación y Control.

Simulación:

Tabla 2.5 Parámetros de configuración de la simulación.

Tiempo de Simulación (seg): 10	Datos: Marzo
Exponente de corte de viento: 0.1	Desde:2
Densidad de aire (Kg/m^3) : 1.225	Hasta:3401

Control:

Tabla 2.6 Parámetros de configuración del Control del Ángulo de paso.

Control de Ángulo de paso	
Potencia nominal (kW)	850
Tiempo de respuesta (seg)	60

Rango de valores	Desde: -3	Hasta: 89
P: 0.0125	l: 1.205	D: 2.005

Tabla 2.7 Parámetros de configuración del control del Convertidor delLado del Rotor.

Control del Convertidor del Lado del Rotor				
Potencia activa de referencia (<i>W</i>) 10000				
Potencia reactiva de referencia (VAR)		2000		
Controlador 1	P: 0.671		I: 0.005	
Controlador 2	P: 0.671		I: 0.005	

Tabla 2.8 Parámetros de configuración del control del Convertidor delLado de la Red.

Control del Convertidor del Lado de la Red				
Potencia reactiva de referencia (VAR) 0				
Controlador 3	P: 0.076		I: 0.173	
Controlador 4	P: 0.923		I: 0.0152	
Controlador 5	P: 0.923		I: 0.0152	

2.5- Análisis de los resultados obtenidos.

Al correr el modelo Simulink, el simulador genera series de tiempo de los diferentes tipos de variables asociadas a los modelos que forman parte de la estructura del generador eólico conectado a la red. En este caso se pueden observar los resultados de simulación expuestos para el mes de marzo del 2016 con las especificaciones de las turbinas eólicas que se encuentran en funcionamiento en el Parque Gibara I. Los registros que se muestran a continuación son: Comparación entre el viento real y salida del modelo del viento, el coeficiente de potencia, la potencia activa y reactiva, además en el Anexo 4 se representan las demás registros que se brindan como opciones de salida visualizar el usuario. Cada uno de los registros cuenta con las unidades en el sistema internacional y el tiempo en segundos que es fijado por el usuario.

En la figura 2.11 se muestran los registros que describen el comportamiento del viento durante el mes de marzo en el parque Gibara I de la provincia de Holguín y salida del modelo del viento que se implementó en el simulador. Se puede observar que el modelo describe el comportamiento real de la variable velocidad del viento, por lo que el modelo obtenido es correcto.



Figura 2.11 Comparación entre el modelo del viento y el viento real.

En la figura 2.12 se describe el comportamiento del coeficiente de potencia durante el período tomado para la simulación, de esta forma se puede analizar la cantidad de energía que se extrae del viento y comprobar la eficiencia del aerogenerador, de esta forma poder evaluar el desempeño para detectar posibles fallas y solucionarlas sin tener mayores consecuencias.



Figura 2.12 Comportamiento del Coeficiente de Potencia.

En la figura 2.13 se muestra el comportamiento de la potencia activa durante el tiempo de simulación y para los datos fijados previamente por el usuario, este indicador permite el análisis de determinada región para un determinado tipo de turbina y determinar la factibilidad de la puesta en marcha del parque eólico, además de analizar el comportamiento del modelo de aerogenerador que se quiere implementar para estas condiciones ambientales, ya sea tanto velocidad como dirección del viento.



Figura 2.13 Comportamiento de la Potencia activa.

En la figura 2.14 se describe el comportamiento de la potencia reactiva que se genera y que es necesario compensar para el funcionamiento en condiciones nominales del aerogenerador, además esta curva permite analizar la eficiencia en cuanto a la potencia que se genera en relación con la potencia consumida de esta forma comprobar el funcionamiento del aerogenerador para estas condiciones y durante el período elegido por el usuario, y en sentido general del parque en su conjunto.





2.6- Conclusiones del capítulo.

En este capítulo se ha construido el modelo Simulink a partir de los modelos recopilados en el capítulo anterior. Para la interacción del usuario en cuanto a: la configuración de los coeficientes paramétricos que se emplean en las diferentes estructuras de modelos matemáticos para representar las características de un generador especifico, cargar la serie temporal de entrada y brindar facilidades de salidas gracias al diseño de un <u>GUIDE</u> con varias ventanas. Todo lo anterior conlleva a la obtención de una plataforma para la experimentación y el análisis de plantas eólicas conectadas a la red, además de sus sistemas de control y supervisión de parámetros.

Conclusiones Generales

Las conclusiones del presente trabajo son las siguientes:

- Se exponen los aspectos que intervienen desde las tecnologías captura de las fuentes primarias y procesos de conversión de energía hasta entregar a la red eléctrica.
- Se realizó una búsqueda bibliográfica minuciosa para la obtención de los modelos de los distintos subsistemas de la planta eólica.
- Se diseñó el modelo Simulink que permite la simulación de este tipo de planta con lo cual se generan series de tiempo de varias variables que le permiten al usuario realizar diferentes tipos de análisis.
- Se diseñó una aplicación MatLab-Simulink con una interfaz gráfica que permite la interacción flexible entre el usuario y el modelo Simulink para configurar los coeficientes paramétricos de los diferentes componentes, seleccionar variables a graficar, etc.
- Se realizó el ajuste de los controladores que interviene en la planta y análisis de esquemas de control diseñados.
- Se diseñó en conjunto SimEólica como herramienta para el análisis y experimentación con plantas eólicas conectadas a la red.

Recomendaciones

Con la culminación de esta investigación, el informe de tesis ofrece los resultados cualitativamente coherentes con la dinámica de las diferentes etapas del modelado de generación eólica. Se sugiere para futuros trabajos de diploma tomar en cuenta los siguientes aspectos:

- Generar series de tiempo bajo otros escenarios de entrada así como ensayar con otros modelos reportados y comparar los resultados entre sí para iguales escenarios de entrada.
- Implementar y ensayar técnicas de ajuste de los controladores de los distintos lazos de control y ampliar el control de la orientación y su influencia en el coeficiente de potencia.
- ✓ Llevar a cabo el control, la sincronización con la red y análisis las perturbaciones que afectan el desempeño del generador.
- Realizar un análisis de la calidad del servicio eléctrico que se entrega al cliente.
- Implementar nuevos métodos que permitan el análisis de otras variables que intervienen en este tipo de planta.
- Continuar perfeccionando gráficamente la interfaz creada para facilitar la interacción con el usuario.

Referencias Bibliográficas

- ABB. (2012). Cuaderno de aplicaciones técnicas No. 12.
- Ackermann, T. (2005). *Wind Power in Power Systems.* Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- AGMA. (1989). Nomenclature of Gear Tooth Failure Modes. Reaffirmed. 110.04-E95.
- AGMA/AWEA. (1996). Recommended Practices for Design and Specification of Gearboxes for Wind Turbine Generator Systems. 921-A97.
- Calderon, G., Mina, J., Calleja, H., & López, A. (2014). *Modelado y simulación de un Sistema de Conversión de Energía Eólica de velocidad variable interconectado a la red eléctrica.* Cancún, Quintana Roo, México.
- Carvaldo, R., & André, P. (2003). Dynamic Influences Of Wind Power On The Power System. PhD Thesis, Technical University of Demark and Risoe National Laboratory.
- Curso Eólica, E. (2011). Curso de física ambiental: Energía Eólica. UCLM, Grupo G-9.
- Ecured, E. C. (2014). http://www.ecured.cu.
- Figueredo, C. M. (2006). *Diez preguntas y diez respuestas sobre energía eólica.* La Habana, Cuba.
- Figueroa, J. L. (2007). Análisis de alternativas de expansión de la matriz energética de ENDESA Chile mediante generación eólica. Trabajo de Diploma, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y matemáticas, Departamento de Ingeniería Mecánica, Santiago de Chile.
- Gónzalez, H. (2008). Modelo, simulación y control de un sistema de generación eólico. Informe de maestría, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y telecomunicaciones, Bucaramanga, Colombia.
- Leonhard, W. (2001). Control of Electrical Drives, Spinger. Munteanu, I, et al., 2008. Optimal Control of Wind Energy Systems. Spinger.

- Olmedo, J. M. (2013). Análisis de los efectos ante perturbaciones eléctricas y mecánicas en el aerogenerador de inducción de doble alimentación (DFIG). Universitat Rovira, Virgili.
- Pena, Clare, J., & Asher, G. (1996a). A doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters suplying an isolated load from a variable speed wind turbine. IEE Proceedings -Electric Power Applications, 143(5), pp.380–387.
- Pena, R., Asher , G., & Clare, J. (1996b). Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable speed windenergy generation. IEE Proceedings Electric Power Applications, 143(3), pp.231–241.
- Roohollad, F.,. (2009). The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system. IEEE Trans. Energy Convers.
- Vidal, Y., Tutivén, C., Rodellar, J., & Acho, L. (2015). Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of Wind Turbines via a Discrete Time Controller with a Disturbance Compensator. Control Dynamics and Applications Research Group. Barcelona College of Industrial Engineering, Polytechnic University of Catalonia.

Anexo 1

Desarrollo para obtener la matriz de transformación del Sistema trifásico abc al Sistema dq_0 empleando la transformada de Clarke y Park.

• Consideraciones:

Se tiene un sistema trifásico balanceado de secuencia positiva:

$$X_a = X \cos wt \tag{A1.1}$$

$$X_b = X \cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) \tag{A1.2}$$

$$X_c = X \cos\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right) \tag{A1.3}$$

donde:

$$w = 2\pi f \; ; f = 60 \; Hz \tag{A1.4}$$

$$X_a + X_b + X_c = 0 \; ; \; X_b + X_c = -X_a \tag{A1.5}$$



Figura A1.1 Suma vectorial de Xb y Xc

1. Desarrollo para obtener la matriz de transformación de Clarke.

En la figura se representa las proyecciones del vector P, siendo este un vector flujo, tensión o corriente, en los ejes coordenados dq y $\alpha\beta$, de aquí que:

$$P_d = |P|\cos\gamma \tag{A1.6}$$

$$P_q = |P|\sin\gamma \tag{A1.7}$$

$$P_{\alpha} = |P|\cos(\theta + \gamma) = |P|\cos\theta\cos\gamma - |P|\sin\theta\sin\gamma \qquad (A1.8)$$

$$P_{\beta} = |P|\sin(\theta + \gamma) = |P|\sin\theta\cos\gamma + |P|\cos\theta\sin\gamma \qquad (A1.9)$$

Por tanto:

$$P_{\alpha} = P_d \cos \theta - P_q \sin \theta \tag{A1.10}$$

$$P_{\beta} = P_d \sin \theta + P_q \cos \theta \tag{A1.11}$$

$$\begin{bmatrix} P_{\alpha} \\ P_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_d \\ P_q \end{bmatrix}$$
(A1.12)

Donde: θ es el desplazamiento angular (*rad*)

 $\theta = wt$ Por lo tanto el eje coordenado dq rota a la velocidad w.



Figura A1.2 Proyecciones del vector P en los ejes coordenados dq y $\alpha\beta$. Si el vector *P* se analiza como un fasor la transformada puede ser expresada como:

$$(P_{\alpha,\beta}) = (P_{d,q})e^{j\theta} \tag{A1.13}$$

Por lo tanto la transformación inversa se obtiene de la manera siguiente:

$$(P_{d,q}) = (P_{\alpha,\beta})e^{-j\theta}$$
(A1.14)

Desarrollando:

$$P_d + jP_q = (P_\alpha + jP_\beta)e^{-j\theta}$$
(A1.15)

$$P_d + jP_q = (P_\alpha + jP_\beta)(\cos\theta - j\sin\theta)$$
(A1.16)

$$P_d + jP_q = P_\alpha \cos\theta - jP_\alpha \sin\theta + jP_\beta \cos\theta + P_\beta \sin\theta \qquad (A1.17)$$

$$P_d + jP_q = P_\alpha \cos\theta + P_\beta \sin\theta + j(-P_\alpha \sin\theta + P_\beta \cos\theta)$$
(A1.18)

$$P_d = \cos\theta \, P_\alpha + \sin\theta \, P_\beta \tag{A1.19}$$

$$P_q = -\sin\theta P_\alpha + \cos\theta P_\beta \tag{A1.20}$$

$$\begin{bmatrix} P_d \\ P_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_\alpha \\ P_\beta \end{bmatrix}$$
(A1.21)

2. Desarrollo para la obtención de la matriz de transformación de Park.

Para la obtención de la matriz de transformación del sistema trifásico abc al sistema dq0 se realiza en dos pasos:

- I. Transformar los valores del sistema trifásico abc al sistema fijo $\alpha\beta 0$.
- II. Transformar los valores del sistema fijo $\alpha\beta 0$ al sistema giratorio dq0. (Transformada de Clarke).

En la figura se representan fasores unitarios en los tres ejes del sistema trifásico abc.



Figura A1.3 Representación de fasores unitarios en cada eje del sistema trifásico.

Para obtener la transformada del sistema trifásico abc al sistema fijo $\alpha\beta$ 0, introduce el concepto de vector espacial trifásico \overline{X} y se realiza el procedimiento siguiente:

$$\bar{X} = \frac{2}{3} \left(X_a e^{j0} + X_b e^{-j\frac{2\pi}{3}} + X_c e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)$$
(A1.22)

$$\bar{X} = \frac{2}{3} \left(X_a + X_b \left(\cos \frac{2\pi}{3} - j \sin \frac{2\pi}{3} \right) + X_c \left(\cos \frac{2\pi}{3} + j \sin \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (A1.23)$$

$$\bar{X} = \frac{2}{3} \left(X_a - \frac{1}{2} X_b - j \frac{\sqrt{3}}{2} X_b - \frac{1}{2} X_c + j \frac{\sqrt{3}}{2} X_c \right)$$
(A1.24)

$$\bar{X} = \frac{2}{3} \left(X_a - \frac{1}{2} X_b - \frac{1}{2} X_c + j \left(\frac{\sqrt{3}}{2} X_c - \frac{\sqrt{3}}{2} X_b \right) \right)$$
(A1.25)

$$\bar{X} = X_{\alpha} + jX_{\beta} \tag{A1.26}$$

$$X_{\alpha} + jX_{\beta} = \frac{2}{3} \left(X_{a} - \frac{1}{2}X_{b} - \frac{1}{2}X_{c} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{2}X_{c} - \frac{\sqrt{3}}{2}X_{b}\right) \right)$$
(A1.27)

Para determinar completar la matriz y lograr que sea cuadrada se introduce la componente de secuencia cero:

$$X_0 = X_a + X_b + X_c (A1.28)$$

Obteniéndose la matriz siguiente:

$$\begin{bmatrix} X_{\alpha} \\ X_{\beta} \\ X_{0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{a} \\ X_{b} \\ X_{c} \end{bmatrix}$$
(A1.29)

Concluyendo:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix}$$
(A1.30)

$$\begin{bmatrix} X_{a} \\ X_{q} \\ X_{0} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{a} \\ X_{b} \\ X_{c} \end{bmatrix}$$
(A1.31)

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sqrt{3}/2\sin\theta - \frac{1}{2}\cos\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta \\ -\sin\theta & \frac{1}{2}\sin\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta & \frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta \\ \frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta & \frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta \\ \frac{1}{2}\sin\theta & \frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} (A1.32)$$

Desarrollando:

$$\sqrt{3}/2\sin\theta - \frac{1}{2}\cos\theta = \sin\frac{2\pi}{3}\sin\theta + \cos\frac{2\pi}{3}\cos\theta = \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (A1.33)$$

$$-\frac{1}{2}\cos\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta = \cos\frac{2\pi}{3}\cos\theta - \sin\frac{2\pi}{3}\sin\theta = \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \qquad (A1.34)$$

$$\frac{1}{2}\sin\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta = -\cos\frac{2\pi}{3}\sin\theta + \sin\frac{2\pi}{3}\cos\theta = -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$
(A1.35)

$$\frac{1}{2}\sin\theta - \frac{\sqrt{3}}{2}\cos\theta = -\cos\frac{2\pi}{3}\sin\theta + \sin\frac{2\pi}{3}\cos\theta = -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (A1.36)$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin\theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}$$
(A1.37)

Anexo 2

Obtención del esquema Simulink del control del ángulo de paso.

La regulación del ángulo de paso se emplea para el seguimiento del punto de máxima potencia, por lo que la referencia, ya que se espera que el aerogenerador opere en condiciones nominales, será la potencia nominal que desarrolla la máquina. Se debe tener presente la velocidad de respuesta del mecanismo de cambio de paso y el rango de operación para que el modelo del sistema de control describa fielmente el comportamiento real de este. Además según (Vidal, Tutivén, Rodellar, & Acho, 2015) el modelo del actuador del ángulo de paso se representa de la siguiente forma:

$$\ddot{\beta}(t) + 2\xi\omega_n\dot{\beta}(t) + \omega_n^2\beta(t) = \omega_n^2u(t)$$
(A2.1)

Donde: ξ es el amortiguamiento, ω_n frecuencia natural (rad/s) y u(t) es la señala de referencia.

Para el caso libre de falla $\xi = 0.6$ y $\omega_n = 11.11 ras/s$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$\beta(s) = \frac{123.4321U(s) - 14.332\beta i}{s^2 + 14.332s + 123.4321} \tag{A2.2}$$

El valor de inicial βi se fija por el usuario.

En la figura A2.1 se muestra el esquema Simulink diseñado, empleando un bloque de ganancia para convertir la señal de error de absoluto a relativo. El controlador tipo PID que se ajusta experimentalmente, un sistema de primer orden para simular la velocidad de respuesta a través de su constante de tiempo, un saturador para limitar el rango de operación y por último la función de transferencia del actuador del ángulo de paso.



Figura A2.1 Esquema Simulink diseñado.

Anexo 3

Obtención del esquema Simulink del control del convertidor de potencia.

Control de Convertidor del Lado del Rotor (RSC): (Calderon, Mina, Calleja, & López, 2014)

Para el control RSC, una alternativa es orientar el modelo dq del DFIG con el vector flujo de estator; lo anterior se ilustra en la figura A3.1.



Figura A3.1 Diagrama vectorial de las variables del DFIG orientadas al flujo del estator.

Como el flujo del estator se encuentra alineado con el eje d del marco de referencia arbitrario se tiene:

$$\lambda_{ds} = L_s i_{ds} + L_M i_{dr} = \lambda_s = L_M i_{ms}$$

$$\lambda_{qs} = L_s i_{qs} + L_M i_{qr} = 0$$
(A3.1)

Donde:
$$L_s = Ll_s + \frac{3}{2}L_{ms}$$
; $L_M = \frac{3}{2}L_{ms}$ y $\lambda_s = L_M i_{ms}$ (Leonhard, 2001)

Despejando i_{ds} e i_{qs} de (A3.1) y sustituyendo en las ecuaciones de flujo del rotor del modelo del DFIG resulta:

$$\lambda_{qr} = \sigma L_R i_{qr} \qquad \lambda_{dr} = \frac{L_M^2}{L_S} i_{ms} + \sigma L_R i_{qr} \qquad (A3.2)$$

Donde: $\sigma = 1 - \frac{L_M^2}{L_S L_R}$ $y \quad L_R = L l_r + \frac{3}{2} L_{ms}$

Sustituyendo $\lambda_{dr} y \lambda_{qr}$ de (A3.2) en $V_{dr} y V_{qr}$ del modelo del <u>DFIG</u> se consiguen las expresiones matemáticas siguientes:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_R \frac{di_{dr}}{dt} - \omega_r \sigma L_R i_{qr}$$
(A3.3)

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_R \frac{di_{qr}}{dt} - \omega_r (L_M i_{ms} + \sigma L_R i_{qr})$$

De (A3.3) es posible extraer los siguientes subsistemas:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_R \frac{di_{dr}}{dt} \qquad V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_R \frac{di_{qr}}{dt}$$
(A3.4)

Donde V_{dr} depende solamente de i_{dr} y V_{qr} solo depende de i_{qr} . Estas expresiones son útiles en el diseño de controladores lineales, a partir de los cuales se obtienen las señales de control V_{drl} y V_{qrl} , y a las cuales se les resta o suma el tercer término de (A3.3), respectivamente. Estos términos se consideran como señales de compensación para mantener el desacoplamiento en las componentes dq. Así las variables V_{dr}^* y V_{qr}^* , resultantes, son las acciones de control o señales moduladoras para PWM asociados al RSC.



Figura A3.2 Esquema de control para RSC, basado en (Pena, Asher, & Clare, 1996b)

Para obtener los valores de referencia $P_s^* y Q_s^*$, es adecuado partir de las expresiones en el marco de referencia dq que describen la potencia activa y reactiva en terminales del estator del <u>DFIG</u>, estas son:

$$P_{s} = \frac{3}{2} \left(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \right) \qquad Q_{s} = \frac{3}{2} \left(V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \right)$$
(A3.5)

Se debe tener presente que el flujo del estator se encuentra alineado con el marco de referencia dq, por lo que $V_{ds} = 0$ y $\lambda_{qs} = 0$. Por otra parte, r_s es de un valor muy pequeño y por tal razón se considera $r_s \approx 0$; así, V_{ds} y V_{qs} del modelo del <u>DFIG</u> quedan simplificado de la siguiente manera:

$$V_{ds} = 0 \qquad V_{qs} = \omega \lambda_{ds} = \omega L_M i_{ms} \tag{A3.6}$$

De (A3.1) se puede obtener las expresiones que describen a $i_{ds} e i_{qs}$; estas se muestran a continuación:

$$i_{ds} = \frac{L_M}{L_S}(i_{ms} - i_{dr})$$
 $i_{qs} = -\frac{L_M}{L_S}i_{qr}$ (A3.7)

Sustituyendo (A3.6) y (A3.7) en (A3.5) se obtienen las ecuaciones con las cuales es posible el cálculo de las corrientes de referencia $i_{dr}^* y i_{qr}^*$ a partir de las potencias de referencia $P_{rsc}^* y Q_{rsc}^*$, estas se muestran a continuación:



Figura A3.3 Esquema Simulink diseñado.

Control de Convertidor del Lado del Red (GSC): (Calderon, Mina, Calleja, & López, 2014)

El control del <u>GSC</u> se basa en el modelo del marco de referencia arbitrario dq, del modelo trifásico del <u>GSC</u> esto es:

$$L\frac{di_{dg}}{dt} = V_{ds} - V_{dgl} - Ri_{dg} + L\omega i_{qg}$$

$$L\frac{di_{qg}}{dt} = V_{qs} - V_{qgl} - Ri_{qg} - L\omega i_{dg}$$
(A3.9)

Adicionalmente se considera como marco de referencia arbitrario el vector de tensión del estator, como se puede apreciar en la figura A3.4.



Figura A3.4 Diagrama vectorial de las variables del DFIG orientadas a la tensión del estator.

De acuerdo con el marco de referencia seleccionado, V_{ds} es equivalente a la magnitud de V_s y $V_{qs} = 0$, por lo que reordenando (A3.9) se tienen las siguientes ecuaciones:

$$V_{dgl}^{*} = -V_{dsl} + (L\omega i_{dg} + V_{ds})$$

$$V_{qgl}^{*} = -V_{qsl} - (L\omega i_{dg})$$
(A3.10)

donde:

$$V_{dsl} = Ri_{dg} + L\frac{di_{dg}}{dt} \qquad V_{qsl} = Ri_{qg} + L\frac{di_{qg}}{dt}$$
(A3.11)
Análogamente al subsistema dado en (A3.4), las ecuaciones en (A3.11) son lineales y desacopladas, y útiles para el diseño de controladores lineales, a partir de los cuales se obtienen las señales de control $V_{dsl} y V_{qsl}$. Finalmente, las variables $V_{dsl}^* y V_{qsl}^*$, resultantes de (A3.10), son las acciones de control o señales moduladoras para el <u>PWM</u> asociado al <u>GSC</u>. El diagrama de control para el <u>GSC</u> puede ser apreciado en la figura A3.6.

El diseño del controlador de tensión del bus de <u>CD</u>, parte de las fórmulas en el marco de referencia dq que describen la potencia activa y reactiva en terminales del <u>GSC</u>; dichas expresiones se muestran a continuación:

$$P_{gsc} = \frac{3}{2} \left(V_{ds} i_{dg} + V_{qs} i_{qg} \right) \qquad Q_s = \frac{3}{2} \left(V_{qs} i_{dg} - V_{ds} i_{qg} \right)$$
(A3.12)

Por su parte, la potencia del bus de <u>CD</u> es expuesta en la siguiente ecuación:

$$P_{bus} = u_{cd}i_c = \frac{3}{2} \left(V_{ds}i_{dg} + V_{qs}i_{qg} \right)$$
(A3.13)

Esta expresión puede reducirse tomando en consideración que $V_{ds} = 0$, de esta manera:

$$u_{cd}i_c = \frac{3}{2}V_{ds}i_{dg}$$
(A3.14)

Y de acuerdo con (Pena, Clare, & Asher, 1996a) y (Pena, Asher, & Clare, 1996b)

$$V_{ds} = \frac{m_1}{2\sqrt{2}} u_{cd}$$
(A3.15)

Donde m_1 es el índice de modulación PWM para el GSC, al que comúnmente se le asigna el valor de 0.75. Sustituyendo (A3.14) en (A3.15) y despejando i_c se tiene que:

$$i_c = \frac{3}{4\sqrt{2}} m_1 i_{dg} \tag{A3.16}$$

Igualando (16) con la ecuación de tensión en el capacitor se obtiene:

$$C\frac{du_{cd}}{dt} = \frac{3}{4\sqrt{2}}m_1 i_{dg}$$
(A3.17)

A partir de la cual se diseña el controlador para regular el bus de <u>CD</u> en función de i_{dg} en cascada con el controlador resultante en (A3.11). Es importante resaltar que en el control de Q_{gsc} y que se logra mediante el control, obtenido a partir de

(A3.11) en función de i_{dg} , el valor de referencia i_{qg}^* se obtiene en (A3.12), bajo la consideración que $V_{qs} = 0$ y para un valor dado de Q_{gsc}^* , esto es:



Figura A3.5 Esquema de control para el GSC, basado en (Pena, Asher, & Clare, 1996b)



Figura A3.6 Esquema Simulink diseñado.

Anexo 4



Curvas de salida del Simulador.



Figura A4.2 Comportamiento de ángulo de paso de las palas.



Figura A4.4 Comportamiento de la Potencia mecánica.



Figura A4.6 Comportamiento de la velocidad mecánica del rotor.

Tiempo (seg)



Figura A4.7 Comportamiento de la velocidad del generador.



Figura A4.8 Comportamiento del torque electromagnético.

Anexo 5

Principales funciones de MatLab empleadas en el Simulador,

imread: Permite cargar imágenes para mostrarlas en los axes.

get: Permite capturar el valor de una propiedad de cierto componente.

set: Permite modificar una propiedad de cierto componente.

find_system: Permite encontrar el modelo Simulink que se va modificar.

open_system: Abre el modelo Simulink que se va a modificar.

set_param: Permite modificar una propiedad de un bloque del modelo Simulink abierto.

errordlg: Muestra un mensaje de error en pantalla.

str2num: Convierte de cadena a número.

xlsread: Carga una hoja de datos de Excel de la cual se tiene su dirección.

cell2mat: Convierte de celda a arreglo numérico.

timeseries: Permite convertir un arreglo numérico a una serie temporal.

assignin: Permite asignar una variable al espacio de trabajo.

cat: Permite concatenar arreglos junto a la dimensión especificada.

size: Permite determinar el tamaño de un arreglo dado.

evalin: Permite cargar variables desde el espacio de trabajo.

figure: Permite crear una nueva figura para mostrar la gráfica.

plot: Permite graficar arreglos, estructuras de tiempo, series temporales, etc.

title: Permite ponerle título a la gráfica obtenida.

xlabel: Permite ponerle título al eje de las abscisas de la gráfica.

ylabel: Permite ponerle título al eje de las ordenadas de la gráfica.