



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**“MODELADO DINAMICO DE UN
AEROGENERADOR TIPO D
INCORPORANDO UN GENERADOR DE
INDUCCIÓN”**

TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

Luis Contreras Gómez

Asesores de tesis:

M.C. Christian Pérez Negrón Pérez

M.I. Genaro Campos Castillo

Puebla, Pue.

Enero 2018



BUAP





BUAP



BUAP

Oficio No. 4367/2017

C. Luis Contreras Gómez

Pasante de la Maestría en Ingeniería
con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia
Facultad de Ingeniería, BUAP.
Presente

Por medio del presente, el suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **Modelado dinámico de un aerogenerador tipo D incorporando un generador de inducción**. Para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia. Asignándose como Asesores al M.C. Christian Pérez Negrón Pérez y M.I. Genaro Campos Castillo.

Sin otro particular de momento, reciba un cordial saludo.

Atentamente
"Pensar bien, para vivir mejor"
H. Puebla de Zaragoza, diciembre 5 de 2017.

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández
Director

C.c.p. M.C. Christian Pérez Negrón Pérez y M.I. Genaro Campos Castillo, Asesores del Tema de Tesis

C.c.p. Archivo

ABH/GCC/sco*

Qu

80 AÑOS
DE UNIVERSIDAD

Facultad
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610



BUAP

H. Puebla de Zaragoza a 27 de Enero de 2018.

Asunto: Autorización de impresión.

M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández.
Director de la Facultad de Ingeniería.
BUAP
PRESENTE.


Los suscritos **M.C. Christian Pérez Negrón Pérez** y **M.I. Genaro Campos Castillo**, Asesores del tema de tesis denominado: **“Modelado Dinámico de un Aerogenerador tipo D incorporando un Generador de Inducción”**, presentado por el **C. Luis Contreras Gómez** pasante de la Maestría en Ingeniería, con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia y con atención al oficio SIEP No. 4367/2017, de la fecha 05 de diciembre de 2017, nos permitimos informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la tesis, no tenemos inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo, solicitamos tenga a bien autorizar el jurado para su Examen Profesional.

Lo hacemos de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE
Puebla, Pue. 27 de Enero de 2018


M.C. Christian Pérez Negrón Pérez


M.I. Genaro Campos Castillo

C.c.p. Exámenes Profesionales
Interesado
Archivo
CPNP* rba



DEDICATORIA

A mi esposa Lupita por amarme, aconsejarme y apoyarme siempre.

A mis padres por ser un ejemplo de vida y enseñanza.

A mi hijo Luis Alfonso por haber nacido y por estar en mi vida.



AGRADECIMIENTOS

- A Dios por ayudarme a terminar este proyecto, gracias por darme la fuerza y el coraje para hacer este sueño realidad.
- A Lupita, por ser mi apoyo incondicional, por impulsarme a concluir este proyecto, por todo el amor y paciencia que me das día a día. Te amo con todo mi corazón.
- A mis padres por hacer de mí una persona de bien, por darme una formación, por ayudarme y aconsejarme en los momentos difíciles.
- A Luisito por hacer que todos mis esfuerzos valgan la pena, por darme tantos momentos de alegría y por ser unas de las razones para levantarme día a día para esforzarme por el presente y el mañana.
- A mi familia por estar conmigo siempre en las buenas y en las malas, por todos los buenos consejos y por el cariño incondicional.
- Al M.C. Christian Pérez Negrón Pérez por confiar en mí y animarme a superarme constantemente, por su tiempo, su amistad, su experiencia y sus consejos, que gracias a su ayuda este proyecto fue culminado.
- Al DTO de la GCROR por las facilidades y el apoyo brindado para realizar este trabajo de investigación.
- A todo el personal de la División de Estudios de Posgrado por todas las atenciones prestadas.



RESUMEN

En esta de tesis se presenta el modelado dinámico de un Aerogenerador tipo D incorporando un Generador de Inducción. El modelo del aerogenerador utilizado es un aerogenerador de velocidad variable, en el cual el acoplamiento mecánico turbina-generador corresponde al modelo de las dos masas. La turbina eólica se acopla a un Generador de Inducción de Rotor Devanado GIRD, el cual corresponde al modelo reducido del generador de inducción y el GIRD se conecta a un Bus Infinito por medio de un Convertidor de Potencia de Escala completa en un arreglo *back to back*.

Se plantea un sistema de control el cual incorpora controladores PI para realizar el ajuste de potencia activa y factor de potencia, ajustando los ángulos de disparo de los elementos de conmutación del convertidor lado máquina para la potencia activa y del convertidor lado sistema para el factor de potencia. Ambos controladores se sintonizan considerando la respuesta del sistema a una entrada escalón utilizando las técnicas de Ziegler-Nichols.

Se presentan tres casos de estudio en los cuales se reporta la respuesta dinámica del aerogenerador tipo D. Para el caso uno se realiza la simulación de un CAG (Control Automático de Generación) sin tomar en cuenta la frecuencia del sistema, el cual consiste en el envío de consignas de potencia activa al modelo en intervalos de tiempo definidos, considerando el ángulo de posicionamiento de los álabes β , el factor de potencia y la velocidad de viento constantes. Para el caso dos se modifica el valor de la velocidad de viento en intervalos de tiempo definidos, manteniendo la potencia activa, el factor de potencia y β constantes. Para el tercer caso se envían consignas de factor de potencia al modelo en intervalos de tiempo definidos y se mantienen constantes la potencia activa, la velocidad de viento y β .



ABSTRACT

The dynamic modeling of an aerogenerator class D incorporating an induction generator are presented in this thesis. The model of the aerogenerator used is one from an aerogenerator of variable speed in which the mechanical coupling turbine-generator corresponds to the model of both masses. The wind turbine is coupled to a GIRD Winding Rotary Induction Generator that corresponds to the reduced model of the induction generator, and the GIRD is connected to an Infinite Bus by a Full Scale Power Converter in a back to back array.

It also proposes a control system which incorporates PI controllers to make the settings of active power and power factor, adjusting the firing angles of the switching elements of the machine-side converter for the active power and of the system-side converter for the power factor. Both controllers were tuned considering the response of the system to a step input using Ziegler-Nichols techniques.

Three study cases are presented in this thesis, in which the dynamic response of the D type aerogenerator is reported. For case one, the simulation of an AGC (Automatic Generation Control) is carried out without considering the frequency of the system, that consists in sending power instructions to the model at defined time intervals, considering the positioning angles of the blades β , with power factor and wind speed being constant. For case two, modifying the value of the wind speed in defined time intervals, keeping active power, power factor and β constant; And for the third case, sending instructions of power Factor to the model in defined time intervals and keeping constant active power, wind speed and β .



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	i
AGRADECIMIENTOS.....	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS.	x
Capítulo 1	1
Introducción	1
1. 1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN	1
1.2 OBJETIVO DE LA TESIS	3
1.2.1 Objetivos Particulares.....	3
1.3 CONTENIDO DE LA TESIS	4
Capítulo 2	6
MÉTODOS NUMÉRICOS PARA LA SOLUCIÓN DE ECUACIONES DIFERENCIALES.....	6
2. 1 INTRODUCCIÓN	6
2. 2 MÉTODO DE EULER.....	6
2.3 MÉTODO DE HEUN	7
2.4 MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN.....	9
2.5 SUMARIO	10
Capítulo 3	11
MODELADO DEL AEROGENERADOR TIPO D	11
3.1 INTRODUCCIÓN	11
3.2 TIPOS DE AEROGENERADORES.....	11
3.2.1 TIPO A: VELOCIDAD FIJA	13
3.2.1.1 TIPO A0: CONTROL PASIVO	13
3.2.1.2 TIPO A1: CONTROL ACTIVO	15
3.2.1.3 TIPO A2: CONTROL DE ENTRADA EN PÉRDIDA DE ACTIVO.....	15
3.2.2 TIPO B: VELOCIDAD VARIABLE LIMITADO	15
3.2.3 TIPO C: VELOCIDAD VARIABLE CON UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DE ESCALA PARCIAL	16



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

3.2.4 TIPO D: VELOCIDAD VARIABLE CON UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DE ESCALA COMPLETA.....	16
3.3 TIPOS DE TURBINAS DE VIENTO	17
3.3.1 TURBINAS CON EJE VERTICAL.....	17
3.3.1 TURBINAS CON EJE HORIZONTAL	18
3.4 MODELO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN.....	20
3.4.1 MODELO REDUCIDO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN	25
3.4.1.1 MODELO REDUCIDO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO	26
3.5 SISTEMA MECÁNICO TURBINA GENERADOR.....	30
3.5.1 MODELO DE DOS MASAS.....	33
3.6 MODELO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA EN EL DOMINIO $qd0$	39
Capítulo 4	49
REGULACIÓN DE FRECUENCIA.....	49
4.1 INTRODUCCIÓN	49
4.2 BALANCE CARGA GENERACIÓN.....	49
4.3 REGULACIÓN PRIMARIA	50
4.3.1 Función de Transferencia del Generador	50
4.4 REGULACIÓN SECUNDARIA	54
4.4.1 Control automático de la generación en un sistema aislado.....	54
Capítulo 5	55
MODELO DEL AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D.	55
5.1 INTRODUCCIÓN	55
5.2 MODELO DEL AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D	55
5.3 SISTEMA DE CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y FP DEL AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE.....	59
5.3.1 Sistema de control de potencia activa por medio del ángulo de disparo del rectificador αI	60
5.3.1.1 Sintonización de las ganancias del controlador PI para el ángulo αR	61
5.3.2 Sistema de control del factor de potencia por medio del ángulo de disparo del inversor αI	63
5.3.2.1 Sintonización de las ganancias del controlador PI para el ángulo αI	64
Capítulo 6	66
CASOS DE ESTUDIO.....	66
6.1 INTRODUCCIÓN	66
6.2 REPRESENTACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL AEROGENERADOR TIPO D DENTRO DEL CAG.....	67
6.3 COMPORTAMIENTO DEL AEROGENERADOR TIPO D ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO CON UNA POTENCIA DE REFERENCIA FIJA.....	74



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

6.4 ASIGNACIÓN DE CONSIGNAS DE F.P. PARA CONTROL DE VOLTAJE ANTE UNA P CONSTANTE.....	79
6.5 CONCLUSIONES.	87
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	89
CONCLUSIONES.	89
TRABAJOS FUTUROS.....	91
APÉNDICE A.	92
PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS CASOS DE ESTUDIO.....	92
APÉNDICE B.	95
DIAGRAMA DE FLUJO DEL CÓDIGO DE MATLAB UTILIZADO EN LOS CASOS DE ESTUDIO.	95
Referencias	96



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 ESQUEMA GRÁFICO DEL MÉTODO DE HEUN. A) PREDICTOR Y B) CORRECTOR	8
FIGURA 3.1 CONFIGURACIONES TÍPICAS DE LOS AEROGENERADORES COMERCIALES	14
FIGURA 3.2 AEROGENERADOR A) EJE HORIZONTAL A BARLOVENTO, B) EJE HORIZONTAL A SOTAVENTO Y C) EJE VERTICAL	18
FIGURA 3.3 A) MÁQUINA DE INDUCCIÓN RIFÁSICA DE DOS POLOS Y B) CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN CONECTADA EN ESTRELLA.	20
FIGURA 3.4 CURVA CARACTERÍSTICA C_p - λ DE LA TURBINA DE VIENTO	32
FIGURA 3.5 MODELO DE DOS MASAS	34
FIGURA 3.6 AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D	40
FIGURA 4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE LA POTENCIA Y LA FRECUENCIA	53
FIGURA 5.1 AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D	55
FIGURA 5.2 SISTEMA DE CONTROL PARA EL ÁNGULO DE DISPARO DE RECTIFICADOR	60
FIGURA 5.3 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL AEROGENERADOR ALFA R	61
FIGURA 5.4 SISTEMA DE CONTROL PARA EL ANGULO DE DISPARO DEL INVERSOR	63
FIGURA 5.5 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL AEROGENERADOR ALFA I	65
FIGURA 6.1 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE POTENCIA ACTIVA	68
FIGURA 6.2 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABES DE ESTADO DEL AEROGENERADOR Y LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN ANTE CONSIGNAS DE AGC	69
FIGURA 6.3 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABES DE ESTADO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA Y DEL CONTROLADOR PI PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA	70
FIGURA 6.4 POTENCIA REACTIVA ANTE CONSIGNAS DE POTENCIA ACTIVA Y FP CONSTANTE	72
FIGURA 6.5 FP ANTE CONSIGNAS DE POTENCIA ACTIVA	72
FIGURA 6.6 PRUEBA DE LIMITACIÓN DE GENERACIÓN A PARQUE EÓLICI INSTALADO EN JUCHITÁN	73
FIGURA 6.7 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABES DE ESTADO DEL AEROGENERADOR Y LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO	75
FIGURA 6.8 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABES DE ESTADO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA Y DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO	77
FIGURA 6.9 POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA REACTIVA ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO	78
FIGURA 6.10 POTENCIA REACTIVA Y FACTOR DE POTENCIA ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO	78
FIGURA 6.11 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA	80
FIGURA 6.12 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA CAPACITIVO GRAFICANDO POTENCIA REACTIVA	81
FIGURA 6.13 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABES DE ESTADO DEL AEROGENERADOR Y LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA	82
FIGURA 6.14 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABES DE ESTADO DEL CONVERTIDOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA	83



FIGURA 6.15 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA INDUCTIVO	84
FIGURA 6.16 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA INDUCTIVO GRAFICANDO POTENCIA REACTIVA	85
FIGURA 6.17 MAGNITUD DE VOLTAJE DE BUS Y VOLTAJE EN INVERSOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA INDUCTIVO	86
FIGURA 6.18 MAGNITUD DE VOLTAJE DE BUS Y VOLTAJE EN INVERSOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA CAPACITIVO	87

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1 CONCEPTOS DE AEROGENERADORES	13
--	----



LISTA DE ACRÓNIMOS Y SÍMBOLOS.

Ángulo de Carga del Rotor	δ
Ángulo de Control del Inversor	α_I
Ángulo de Control del Rectificador	α_R
Ángulo de Posicionamiento de los Álabes	β
Centro Nacional de Control de Energía	CENACE
Coefficiente de Amortiguamiento	ζ
Coefficiente de Eficiencia de Potencia	C_p
Coefficiente de Inercia del Eje de Alta Velocidad (Generador)	J_g
Coefficiente de Inercia del Eje de Baja Velocidad (Turbina)	J_{tur}
Coefficiente de Rigidez del Eje de Alta Velocidad (Generador)	K_g
Coefficiente de Rigidez del Eje de Baja Velocidad (Turbina)	K_{tur}
Comisión Federal de Electricidad	CFE
Constante de Tiempo	τ
Constante Integral	K_i
Constante Proporcional	K_p
Control Automático de Generación	AGC
Corriente de Directa	I_{CD}
Corriente en el Eje de q y d en Terminales del Estator	i_{qs}, i_{ds}
Corriente en el Eje de q y d en Terminales del Rotor	i'_{qr}, i'_{dr}
Densidad del Aire	ρ_{aire}
Eficiencia del Acoplamiento Mecánico	η_{gbx}
Enlace de Flujo	ψ
Enlaces de flujo en el Eje de q y d en Terminales del Estator	ψ_{qs}, ψ_{ds}
Enlaces de flujo en el Eje de q y d en Terminales del Rotor	ψ'_{qr}, ψ'_{dr}
Estrategia de Control Proporcional e Integral	PI
Frecuencia Eléctrica Base del Lado de Alta Velocidad (Generador)	$\omega_{b,hs}$
Frecuencia Eléctrica Base del Lado de Baja Velocidad (Turbina)	$\omega_{b,ls}$
Frecuencia Natural	ω_n
Función Asociada a las Variables de Estado	f
Función de Transferencia	$G(s)$
Ganancia	K
Generador de Inducción de Rotor Devanado	GIRD
Generador de Inducción de Rotor Devanado	GIRD
Generador de Inducción Doblemente Alimentado	GIDA
Generador de Inducción Jaula de Ardilla	GIJA
Generador de Inducción Jaula de Ardilla	GIJA
Generador Síncrono de Imanes Permanentes	GSIM
Generador Síncrono de Rotor Devanado	GSRD
Hertz	Hz
Horas	hr



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Inercia	H
Inercia de la Turbina de Viento	H_{tur}
Inercia del Generador Eléctrico	H_g
Inercia Total del Generador y la Turbina de Viento	H_{Total}
Kilo Watt	kW
Kilowatt	KW
Magnitud del Primer Sobre Impulso de la Respuesta de Segundo Orden	a
Magnitud del Segundo Sobre Impulso de la Respuesta de Segundo Orden	b
Mega Watt	MW
Megawatt	MW
Metros	m
Metros	m
Número de Espiras en el Devanado del Estator	N_s
Número de Espiras en el Devanado del Rotor	N_r
Número de Pares de Polos	n_{pp}
Número de Variables Algebraicas	a
Número de Variables de Estado	n
Operador Diferencial	p
Operador diferencial	p
Par Base	T_b
Par Electromagnético	T_e
Par Mecánico	T_L, T_m
Par Mecánico de la Turbina de Viento	T_{tur}
Par Mecánico del Lado de Alta Velocidad	T_{hs}
Par Mecánico del Lado de Baja Velocidad	T_{ls}
Paso de Tiempo	h
Periodo de Tiempo	T
Posición Angular del Rotor	θ_r
Potencia Activa de Referencia	P_{ref}
Potencia Activa Generada	P_s
Potencia de la Turbina de Viento	P_{tur}
Potencia del Viento	P_{viento}
Potencia Mecánica Base	P_b
Potencia Reactiva de Referencia	Q_{ref}
Potencia Reactiva Generada	Q_s
Radio de la Turbina	R_a
Reactancia de Dispersión del Estator	X_{ls}
Reactancia de Dispersión del Rotor	X'_{lr}
Reactancia del Estator	X_{ss}
Reactancia del Rotor	X'_{rr}
Reactancia del Transformador del Inversor	X_{TI}
Reactancia del Transformador del Rectificador	X_{TR}
Reactancia Mutua	X_M
Relación de Engranaje	a_{gbx}
Resistencia del Estator	r_s



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Resistencia del Rotor	r'_r
Resistencia del Transformador del Inversor	R_{TI}
Resistencia del Transformador del Rectificador	R_{TR}
Resistencia en el Eje de q y d en Terminales del Estator y Rotor	r_s, r'_r
Segundos	s
Señal de Error	e
Sistema Interconectado Nacional	SIN
Subíndice para las Cantidades del Inversor	I
Subíndice para las Cantidades del Rectificador	R
Subíndice para las Cantidades en la Coordenada Cero	0
Subíndice para las Cantidades en la Coordenada de Cuadratura	q
Subíndice para las Cantidades en la Coordenada de Directa	d
Subíndice para las Variables del Estator	s
Subíndice para las Variables del Rotor	r
Tiempo de Establecimiento	t_s
Tiempo de Retardo	L
Tiempo del Primer Sobreimpulso de la Respuesta de Segundo Orden	T_a
Tiempo del Segundo Sobreimpulso de la Respuesta de Segundo Orden	T_b
Tiempo Entre los Dos Primeros Sobreimpulsos de la Respuesta de Segundo Orden	T_p
Turbina de Viento	T_v
Variable Algebraica	g
Variable de Estado	x
Variables de Estado del Controlador PI	u, v, w
Velocidad Angular Eléctrica Base	ω_b
Velocidad Angular Eléctrica Base	ω_b
Velocidad Angular en el Marco de Referencia Arbitrario	ω
Velocidad Angular en el Marco de Referencia Arbitrario	ω
Velocidad de la Turbina de Viento	ω_{tur}
Velocidad del Rotor del Generador Eléctrico	ω_r, ω_g
Velocidad del Rotor del Generador Eléctrico	ω_g, ω_r
Velocidad del Viento	V_{viento}
Velocidad Síncrona	ω_s
Velocidad Síncrona	ω_s
Voltaje de Corriente Directa	V_{CD}
Voltaje Inducido en el Rotor	E
Voltajes en el Eje de d y q en el Bus Infinito	V_{dbus}, V_{qbus}
Voltajes en el Eje de d y q en Terminales del Estator	V_{ds}, V_{qs}
Voltajes en el Eje de q y d en Terminales de Rotor	V'_{qr}, V'_{dr}
Voltajes en el Eje de q y d en Terminales del Estator	V_{qs}, V_{ds}



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El excesivo consumo de combustibles fósiles en décadas anteriores y el creciente interés por el cuidado del medio ambiente, han impulsado la investigación y el desarrollo de energías alternativas para la generación de electricidad. La fuente de energía no contaminante que más auge ha tenido hasta el momento es la energía eólica, la cual a lo largo de los años ha tenido grandes avances tecnológicos y, por lo tanto, cada vez los equipos que conforman un parque eólico son más eficientes.

En el presente capítulo se presentan los antecedentes y motivación relacionados con el trabajo de investigación realizado en esta tesis. Se presentan los objetivos, la justificación y la descripción de los capítulos contenidos en esta tesis.

1. 1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

La primera turbina de viento utilizada para generar electricidad fue creada a principios del siglo XX. La tecnología se fue mejorando paso a paso hasta cerca del año 1970. Para finales del año 1990, la energía eólica ha resurgido como uno de los más importantes recursos energéticos sostenibles [2].

La energía del viento está incrementando su importancia a nivel mundial. Este rápido desarrollo de la tecnología del viento y del mercado tiene implicaciones importantes para un gran número de personas e instituciones como por ejemplo: científicos quienes investigan la potencia del viento, ingenieros eléctricos en universidades, profesionales quienes deben entender la complejidad de los efectos positivos y negativos en la inclusión de la energía del viento en el sistema de potencia, fabricantes de turbinas de viento y desarrolladores de proyectos con respecto a la energía del viento [1].



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

En la actualidad un gran número de parques eólicos se encuentran en funcionamiento en todo el mundo y nuevos proyectos están en proceso de construcción con la finalidad de contar con una fuente de energía que contribuya al control de emisiones de CO_2 y gases de efecto invernadero [2].

En 1994, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) instaló La Venta I, el primer parque eólico en Oaxaca, con 7 aerogeneradores de 225 kW de la marca Vestas, los cuales incorporaron un generador asíncrono con una turbina eólica de 27 m de diámetro montados en una torre con altura de 30 m y una capacidad instalada de 1.57 MW. [3]

Actualmente se tiene una capacidad instalada de 3527 MW de generación eólica en México y se espera que para el 2022 se tengan 12000 MW [4]. Lo cual equivale a un 26 % de la demanda eléctrica actual del Sistema Interconectado Nacional (SIN).

Hoy en día existen diferentes tipos de tecnologías aplicadas en los parques eólicos instalados alrededor del mundo. Estas tecnologías varían principalmente dependiendo de la característica del recurso eólico en el sitio, por lo que para tomar una decisión acertada en cuanto a cuál de éstas utilizar, es necesario que se realicen estudios de prefactibilidad. En base a los resultados de los estudios se consideran las variaciones del recurso durante un determinado periodo de tiempo y con ello se realiza la selección del tipo de aerogenerador a instalar. Un componente de suma importancia para el análisis y diseño de cualquier proyecto asociado a parques eólicos son las máquinas eléctricas, en donde por lo general en este tipo de proyectos las más utilizadas son las máquinas síncronas y las de inducción [1].

El modelado de los aerogeneradores de inducción se puede representar con un modelo transitorio completo utilizando un conjunto de seis variables de estado, el cual es reportado en [5]. Sin embargo, ha sido demostrado en [6] y [7] que los transitorios en el estator pueden ser despreciados debido a que desaparecen más rápidamente que los transitorios en las variables del rotor. Tomando en cuenta lo anterior, se puede determinar un modelo reducido del generador de inducción que es descrito por un conjunto de tres variables de estado, el cual provee buenos resultados para estudios de estabilidad comparados con el modelo completo.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

La frecuencia de un sistema eléctrico de potencia está directamente relacionada con el equilibrio entre generación y carga. Si en un momento dado aumenta la carga al incrementar la potencia eléctrica demandada en el sistema, entonces aumenta el par electromagnético en los generadores [8]. Siempre debe existir un balance entre la carga-generación para mantener la frecuencia lo más cerca posible a los 60 Hz y la entidad encargada de esta función en México es el Centro Nacional de Control de Energía (CENACE). Para el SIN se tienen dos formas de controlar frecuencia, la primera es la llamada regulación primaria y la segunda es la regulación secundaria que actúa por medio del CAG.

La regulación primaria tiene por objeto corregir automáticamente los desequilibrios instantáneos entre producción y consumo. Se aporta mediante la variación de potencia de los generadores de forma inmediata y autónoma por actuación de los reguladores de velocidad de las turbinas como respuesta a las variaciones de frecuencia [8].

La regulación secundaria restaura la frecuencia al valor de referencia realizando acciones de control automáticas y corrige la desviación que la regulación primaria no puede hacer.

Este trabajo de investigación es la continuación del trabajo de tesis realizado en [14].

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo proponer un Modelo Dinámico de un Aerogenerador tipo D incorporando un Generador de Inducción, en donde se evalúe y analice el comportamiento en estado estable y dinámico.

1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- Desarrollar el modelo de un aerogenerador de velocidad variable tipo D conocido como *full-converter*, conectado a un bus infinito.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

- Incorporar al modelo un sistema de control por medio de controladores PI para realizar el control de potencia activa y factor de potencia.
- Incorporar el modelo de dos masas del eje mecánico para describir el acoplamiento mecánico de la turbina de viento y el generador eléctrico.
- Obtener soluciones en estado estable y dinámico del modelo del aerogenerador tipo D, realizando casos de estudio que permitan evaluar el comportamiento del modelo.

1.3 CONTENIDO DE LA TESIS

A continuación, se describe en forma breve el contenido de cada uno de los capítulos que compone la presente investigación.

En el capítulo uno se describe una breve reseña de la energía eólica, se presenta la revisión bibliográfica acerca del análisis y modelado de los parques eólicos, así como una breve descripción del control de frecuencia. Se describe parte de la historia de los parques eólicos en México y su evolución a través de los años. Se plantean los objetivos de la tesis y por último se describe el contenido de cada uno de los capítulos.

En el capítulo dos se presentan algunos de los métodos numéricos de un paso más usados en la solución de problemas de ingeniería, en donde se destaca el método de *Runge-Kutta* de Cuarto orden, el cual es uno de los métodos que presentan mayor exactitud en la solución de ecuaciones diferenciales y es utilizado en esta tesis programado en MATLAB para obtener aproximaciones del comportamiento dinámico y los valores de estado estable.

En el capítulo tres se presenta el modelo matemático de cada uno de los elementos que componen el aerogenerador de velocidad variable tipo D, en donde se describe detalladamente la forma en que se acoplan los elementos tales como la turbina de viento, generador de inducción, caja de engranajes y los convertidores de potencia. Se presentan las ecuaciones diferencio-algebraicas de los elementos que son representados por los modelos en el marco de referencia síncrono.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Los sistemas de regulación de frecuencia son presentados en el capítulo cuatro, los cuales consisten en la regulación primaria y la regulación secundaria.

El modelo matemático del aerogenerador tipo D, conectado a un bus infinito, es presentado en el capítulo cinco. Dicho modelo es reportado por medio de un conjunto de ecuaciones diferencio-algebraicas. En este capítulo también se presentan los sistemas de control de potencia activa y potencia factor de potencia del aerogenerador, así como, la sintonización de los controladores.

En el capítulo seis se presentan los casos de estudio realizados con el modelo del aerogenerador tipo D, donde se evalúa el comportamiento de las variables de estado ante perturbaciones en el sistema. En este capítulo también se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos en el desarrollo de esta tesis, así como los trabajos futuros.



CAPÍTULO 2

MÉTODOS NUMÉRICOS PARA LA SOLUCIÓN DE ECUACIONES DIFERENCIALES

2. 1 INTRODUCCIÓN

Los métodos numéricos son técnicas mediante las cuales es posible formular problemas de tal forma que puedan resolverse usando operaciones aritméticas [9]. Con base en lo anterior para la solución de complejas ecuaciones diferenciales que se encuentran en la mayoría de problemas en la práctica, se emplea el uso de los métodos numéricos, con lo cual se realizan con precisión y rapidez.

En este capítulo se describen algunos de los métodos numéricos más empleados en la solución de problemas de ingeniería que presentan ecuaciones diferenciales ordinarias.

2. 2 MÉTODO DE EULER

El método de Euler es un método numérico de un paso, es decir, que solo se refieren a un punto anterior y a su derivada para determinar el valor buscado. Este método es el más simple para resolver un problema de valor inicial, es un método de primer orden. Regularmente este método sirve como base para construir métodos más complejos.

Este método suele acumular bastantes errores, por lo que para utilizarlo es necesario tomar un paso de integración muy pequeño para garantizar que los errores acumulados sean pequeños [10]. Por lo tanto, si se tiene un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias de la siguiente forma,



$$\dot{y} = f(x_i, y_i) \quad (2.1)$$

La ecuación de la solución para cada instante de tiempo dada por el método de Euler es [9],

$$y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)h \quad (2.2)$$

Donde,

$$h = \frac{t_f - t_i}{N} \quad (2.3)$$

h Paso de integración.

t_i Tiempo inicial.

t_f Tiempo final.

N Número de sub-intervalos desde el tiempo inicial hasta el tiempo final.

2.3 MÉTODO DE HEUN

El método de Heun presenta una mejora al método de Euler, la cual consiste en realizar el cálculo de dos derivadas del intervalo, una en el punto inicial y la otra en el punto final. Posteriormente se promedian las dos derivadas y se obtiene una



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

aproximación mejorada de la pendiente en el intervalo completo. Este método se muestra gráficamente en la Figura 2.1 [9].

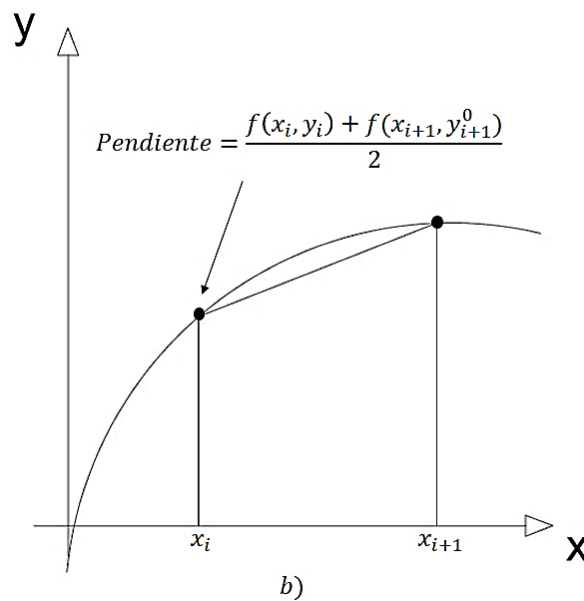
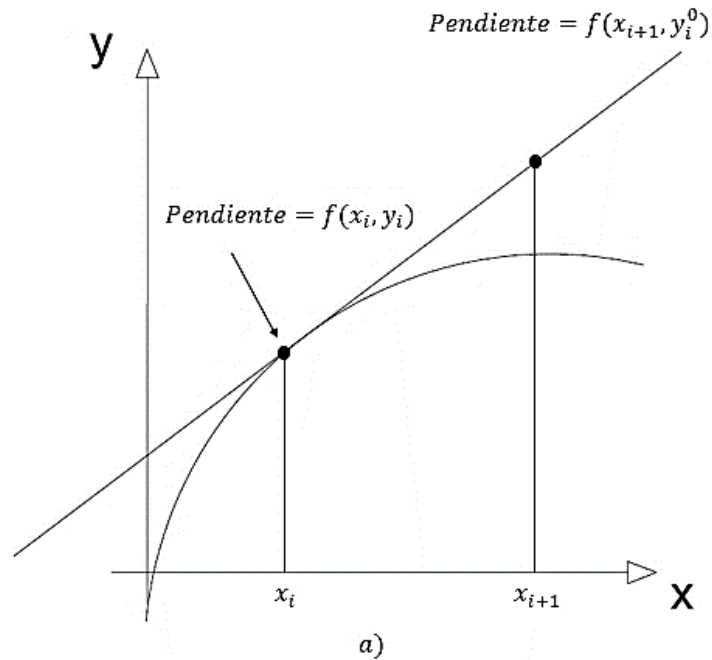


FIGURA 2.1 ESQUEMA GRÁFICO DEL MÉTODO DE HEUN. A) PREDICTOR Y B) CORRECTOR



El método de Heun es considerado un método predictor-corrector y las ecuaciones que lo describen se expresan a continuación,

$$y_{i+1}^0 = y_i + f(x_i, y_i)h \quad (2.4)$$

$$y_{i+1} = y_i + \frac{f(x_i, y_i) + f(x_{i+1}, y_{i+1}^0)}{2} h \quad (2.5)$$

2.4 MÉTODO DE RUNGE-KUTTA DE CUARTO ORDEN

Los métodos de *Runge-Kutta* (RK) tienen la exactitud del esquema de la serie de Taylor sin necesitar del cálculo de derivadas superiores. Existen muchas variaciones, pero todas ellas se pueden ajustar a la forma general de la ecuación (2.5) [9],

$$y_{i+1} = y_i + \phi(x_i, y_i, h)h \quad (2.6)$$

Donde $\phi(x_i, y_i, h)$ se le llama función de incremento y puede interpretarse como el promedio de la pendiente sobre el intervalo.

El método de cuarto orden es de los más populares en los métodos de RK. Es uno de los métodos más difundidos y a la vez más exactos para obtener soluciones aproximadas al problema de valor inicial [11].

En la siguiente ecuación se expresa el método de RK de cuarto orden,



$$y_{i+1} = y_i + \left[\frac{1}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \right] h \quad (2.7)$$

Donde

$$k_1 = f(x_i, y_i) \quad (2.7a)$$

$$k_2 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_1\right) \quad (2.7b)$$

$$k_3 = f\left(x_i + \frac{1}{2}h, y_i + \frac{1}{2}hk_2\right) \quad (2.7c)$$

$$k_4 = f(x_i + h, y_i + hk_3) \quad (2.7d)$$

2.5 SUMARIO

En el capítulo dos se presentó la descripción general de tres de los métodos numéricos más utilizados para la solución de problemas que presentan ecuaciones diferenciales ordinarias. El método de RK de cuarto orden es uno de los más exactos y se emplea en esta tesis para la solución de las ecuaciones diferenciales en el modelo del aerogenerador de velocidad variable tipo D.



CAPÍTULO 3

MODELADO DEL AEROGENERADOR TIPO D

3.1 INTRODUCCIÓN

La producción comercial de energía eléctrica utilizando aerogeneradores comenzó en Dinamarca a principios de la década de los setenta con producciones pequeñas del orden de los 20 *kW* por aerogenerador. En la década de los noventa se puso a disposición la primera clase de aerogeneradores del orden de *MW* [12].

Un aerogenerador consta de una turbina eólica, una caja de engranaje (en algunos casos), un generador eléctrico, un dispositivo de compensación de potencia reactiva y sistemas de control interno de los aerogeneradores.

Los tipos de aerogeneradores, los modelos de los elementos que conforman los aerogeneradores y los sistemas de control de los mismos son presentados en este capítulo.

3.2 TIPOS DE AEROGENERADORES

Actualmente los aerogeneradores se pueden clasificar de acuerdo con el tipo de operación, es decir, si operan a una sola velocidad o a velocidad variable y por el tipo de control que utilizan, estos tipos de aerogeneradores se mencionan a continuación,

Velocidad Fija: operan a la velocidad síncrona del sistema al cual están conectados, no presentan cambios de velocidad conforme incrementa o disminuye la velocidad del viento. Otro de los factores que influyen en la velocidad del rotor es el diseño del aerogenerador y la relación de engranaje en el sistema de acoplamiento mecánico.

Otra de las características de los aerogeneradores de velocidad fija es que están equipados con generadores de inducción (jaula de ardilla o rotor devanado), los cuales



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

están conectados directamente a la red, con un arrancador basado en electrónica de potencia y un banco de capacitores para compensación de potencia reactiva.

Los aerogeneradores de velocidad fija son de diseño simple, robusto y confiable. Las desventajas son que presentan un consumo incontrolable de potencia reactiva, estrés mecánico y limitado control de calidad de la energía [13].

Velocidad Variable: están diseñados para alcanzar la máxima eficiencia aerodinámica sobre distintos valores de velocidad de viento.

Estos aerogeneradores son equipados típicamente con generadores de inducción o generadores síncronos y son conectados a la red a través de convertidores de potencia. Los convertidores de potencia controlan la velocidad del generador, es decir, las fluctuaciones de potencia causadas por las variaciones de la velocidad de viento son absorbidas principalmente por los cambios en la velocidad del rotor del generador y por consecuencia en la velocidad de la turbina de viento.

Las ventajas de los aerogeneradores de velocidad variable son el aumento de captura de energía, mejor calidad de energía y reducción del esfuerzo mecánico en la turbina de viento. Las desventajas son las pérdidas que se generan por la electrónica de potencia, el uso de más componentes de electrónica de potencia y por consiguiente el incremento de costos [13].

En esta tesis se utiliza un aerogenerador de velocidad variable y se modela un GIRD, el cual, se conecta a un bus infinito a través de un convertidor de potencia de escala completa.

En la figura 3.1 se presentan las distintas configuraciones de aerogeneradores comerciales, tomando en cuenta el control de velocidad y el control de potencia.

En la tabla 3.1 se presentan los diferentes tipos de configuraciones de aerogeneradores, tomando en cuenta tanto el control de velocidad, como el control de potencia.



Control de Velocidad		Control de Potencia		
		Control Pasivo	Control Activo	Control de Entrada en Pérdida Activo
Velocidad Fija	Tipo A	Tipo A0	Tipo A1	Tipo A2
Velocidad Variable	Tipo B	Tipo B0	Tipo B1	Tipo B2
	Tipo C	Tipo C0	Tipo C1	Tipo C2
	Tipo D	Tipo D0	Tipo D1	Tipo D2

TABLA 3.1 CONCEPTOS DE AEROGENERADORES.

De la tabla anterior los tipos de aerogeneradores que se encuentran sombreados no son usados en la generación de energía eólica actual.

3.2.1 TIPO A: VELOCIDAD FIJA

Corresponde a un aerogenerador de velocidad fija con un Generador de Inducción Jaula de Ardilla (GIJA) conectado a la red a través de un transformador. Este tipo de generadores incorporan un banco de capacitores para compensar la potencia reactiva que demanda el generador y un arrancador basado en dispositivos de electrónica de potencia para disminuir los transitorios del arranque, con lo cual se evita un posible colapso de voltaje en el punto de conexión en el caso de una red débil [14].

3.2.1.1 TIPO A0: CONTROL PASIVO

Este tipo de configuración es un concepto tradicional aplicado por muchos constructores *Daneses* de turbinas de viento durante los años 1980's y 1990's. Han sido muy populares porque son relativamente de bajo costo, de diseño simple y robusto. El



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

control pasivo no puede realizar arranques asistidos, lo cual implica que la potencia de la turbina no puede ser controlada durante la secuencia de conexión [13].

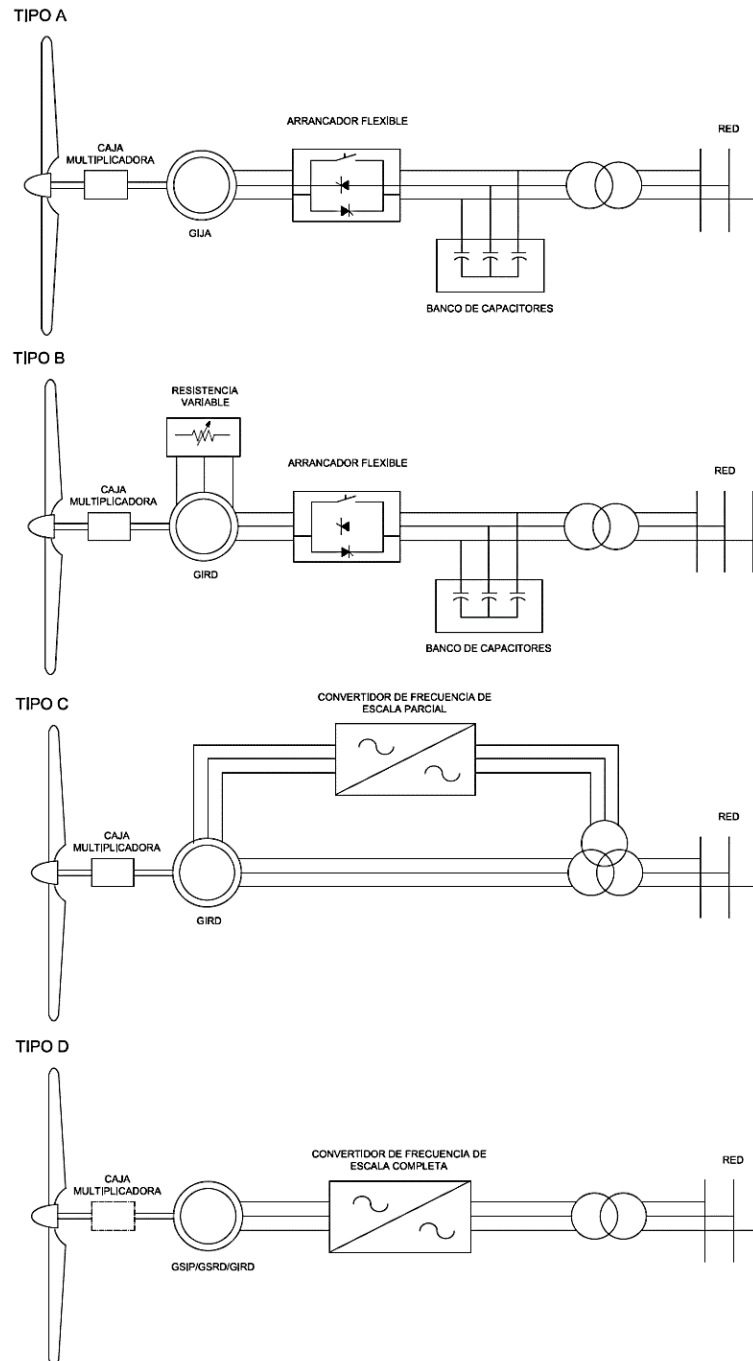


FIGURA 3.1 CONFIGURACIONES TÍPICAS DE LOS AEROGENERADORES COMERCIALES.



3.2.1.2 TIPO A1: CONTROL ACTIVO

Esta configuración también se encuentra dentro del mercado. Sus principales ventajas son que facilita el control de potencia, cuenta con arranque controlado y paro de emergencia. Su gran desventaja es que, con altas velocidades de viento, incluso con pequeñas variaciones de velocidad de viento presenta grandes variaciones en la potencia de salida. El mecanismo de control de álabes no es lo suficientemente rápido para evitar las fluctuaciones de potencia. Las pequeñas variaciones en el viento pueden ser compensadas moviendo el ángulo de ataque de los álabes, pero esto no es posible cuando se presentan ráfagas de viento alto [13].

3.2.1.3 TIPO A2: CONTROL DE ENTRADA EN PÉRDIDA DE ACTIVO

Esta configuración recientemente se ha vuelto popular, básicamente porque mantiene las mismas características de calidad de potencia que el sistema de regulación primaria. Las mejoras residen en una mejor utilización del sistema en general, como resultado el uso del control activo. El acoplamiento flexible de los álabes al rotor de la turbina facilita los arranques y paros de emergencia. Una de las desventajas es su alto costo por su mecanismo de giro de los álabes y su controlador [13].

Como se muestra en la Figura 3.1 y la Tabla 3.1, el concepto de velocidad variable es usado por las tres configuraciones, Tipo B, Tipo C y Tipo D.

3.2.2 TIPO B: VELOCIDAD VARIABLE LIMITADO

Esta configuración presenta la característica de una resistencia variable adicional para el rotor, la cual puede ser variada por un convertidor controlado ópticamente, montado en el eje del rotor, así la resistencia total del rotor es controlable. Este acoplamiento óptico elimina la necesidad de utilizar costosos anillos de deslizamiento que necesitan escobillas y mantenimiento. La resistencia del rotor se puede cambiar y así controlar el deslizamiento del generador, de esta manera, la potencia de salida en el sistema es controlada. El rango de control de velocidad dinámica depende del tamaño



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

de la resistencia variable del rotor, típicamente, el rango de velocidad es de 0 a 10 % por encima de la velocidad síncrona.

La energía proveniente de la unidad de conversión de potencia externa es disipada como pérdida de calor [13].

3.2.3 TIPO C: VELOCIDAD VARIABLE CON UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DE ESCALA PARCIAL

Esta configuración es conocida como el concepto de Generador de Inducción Doblemente Alimentado (GIDA) que corresponde al aerogenerador de velocidad variable con un GIRD y un convertidor de potencia de escala parcial (clasificado en aproximadamente un 30 % de la potencia nominal del generador) en el circuito del rotor. El convertidor realiza la compensación de potencia reactiva y la conexión a la red. Los convertidores de potencia más pequeños hacen este concepto atractivo desde el punto de vista económico [13].

3.2.4 TIPO D: VELOCIDAD VARIABLE CON UN CONVERTIDOR DE POTENCIA DE ESCALA COMPLETA

Esta configuración corresponde al aerogenerador de velocidad variable, con un generador conectado a la red a través de un convertidor de potencia de escala completa. El convertidor de potencia realiza la compensación de potencia activa, potencia reactiva y la conexión a la red. El generador puede excitarse eléctricamente, si este corresponde a un Generador Síncrono de Rotor Devanado (GSRD) o a un GIRD. Sin embargo, también puede ser excitado por medio de imanes permanentes, para el caso de un Generador Síncrono de Imanes Permanentes (GSIM) [13].

Como se puede observar en la Figura 3.1, las primeras tres configuraciones incorporan una caja multiplicadora en el acoplamiento mecánico entre la turbina de viento y el generador eléctrico. Sin embargo, esta caja multiplicadora puede ser eliminada en el Tipo D. En el caso de que el aerogenerador de velocidad variable no incorpore la caja



multiplicadora, es necesario que el generador a utilizar sea un generador multipolos para que, mediante la variación en el número de polos del generador, éste realice la variación de velocidad del mismo. Esta consideración provoca que el generador a utilizar sea de una mayor dimensión y, por lo tanto, más pesado y de mayor costo [14]. En esta tesis se reporta el modelo matemático del aerogenerador tipo D1.

3.3 TIPOS DE TURBINAS DE VIENTO

Las turbinas de viento son un dispositivo que convierte la energía cinética del viento en energía mecánica, trasladando la energía mecánica del eje de la turbina al eje del generador a través de una caja de engranajes y convirtiendo la energía mecánica en energía eléctrica.

Las turbinas de viento básicamente se clasifican en dos:

- Turbinas con eje vertical.
- Turbinas con eje horizontal.

3.3.1 TURBINAS CON EJE VERTICAL

La única turbina eólica de eje vertical que ha tenido éxito comercial es la de rotor Darrieus, nombrada así por su inventor el francés G. M. Darrieus, el cual la implementó en la década de los 1920's. La forma de los álabes es la que resultaría de sostener una cuerda en ambos extremos y girarla alrededor del eje vertical, semejante a un batidor de huevo gigante como se muestra en la figura 3.2 (c) [15].

La principal ventaja de este tipo de turbina es que no requieren ningún tipo de sistema de control para mantener su orientación dirigida hacia el flujo del viento. Otra de sus ventajas es que toda la maquinaria pesada como el generador, caja de engranajes y otros componentes mecánicos se encuentra alojados en una cámara subterránea, en la cual el acceso al mantenimiento es mucho más cómodo y accesible que en los aerogeneradores de eje horizontal. Por otro lado, el diseño de esta turbina hace que los álabes se encuentren bajo tensión en todo momento y por lo tanto los álabes son

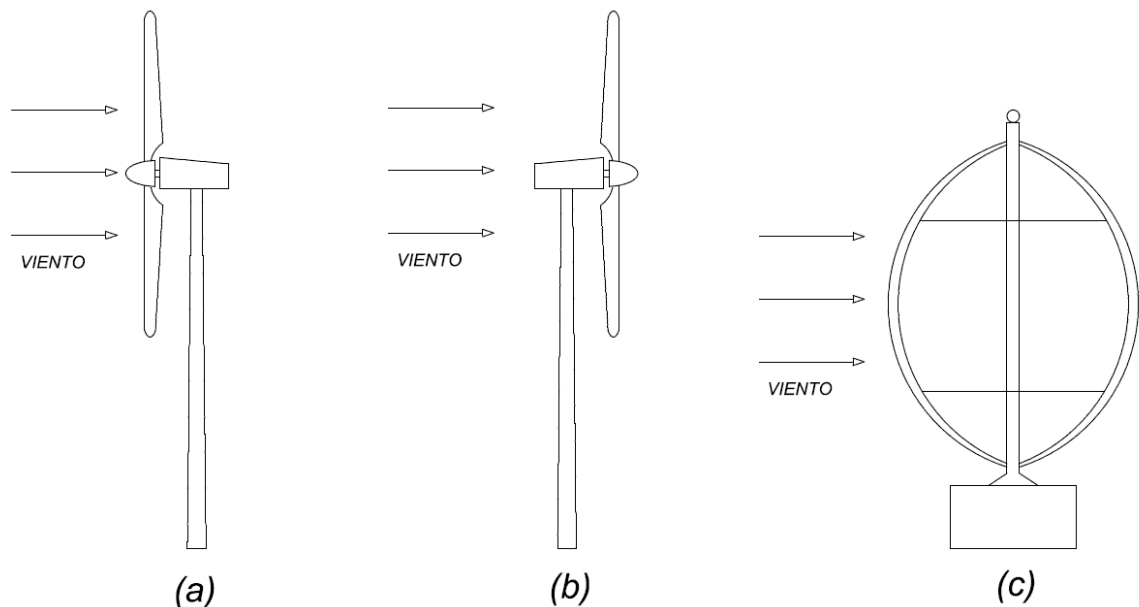


FIGURA 3.2: AEROGENERADOR DE A) EJE HORIZONTAL A BARLOVENTO, B) EJE HORIZONTAL A SOTAVENTO Y C) EJE VERTICAL.

relativamente ligeros y económicos debido a que por sus características no tienen que controlar la constante de flexión asociada con los álabes en los aerogeneradores de eje horizontal [15].

Este tipo de aerogeneradores presentan varias desventajas, la principal es que los álabes de la turbina están relativamente cercanos al suelo, donde las velocidades de viento son bajas, además de ser bajas presentan mayor turbulencia, lo cual incrementa el estrés de los álabes [15].

Con velocidades de viento altas este tipo de aerogeneradores no pueden dejar pasar el viento y reducir la potencia generada.

3.3.1 TURBINAS CON EJE HORIZONTAL

Los aerogeneradores de eje horizontal se pueden clasificar dependiendo de la dirección, en la cual, el viento incide en la turbina. Para el caso cuando la góndola y la turbina se encuentren a favor del viento se dice que el aerogenerador está a sotavento,



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

como se muestra en la figura 3.2 (b). Este caso es conocido como la posición natural de la turbina de viento. El aerogenerador a sotavento tiene como ventaja el no requerir de sistemas de control para la orientación de la turbina con respecto a la dirección del viento ya que dicha orientación se da naturalmente por medio de una veleta la cual determina la dirección del viento. Sin embargo, esta configuración presenta un problema importante, el cual se debe a los efectos de sombra de la torre. Este efecto se presenta cada vez que un álabe de la turbina de viento pasa por detrás de la torre [15].

Por otro lado, los aerogeneradores a barlovento operan con el viento en contra, como se muestra en la figura 3.3 (a). Este tipo de aerogeneradores cuenta con un complejo sistema de control para el direccionamiento de la turbina eólica, el cual siempre está tratando de colocarla frente al flujo de viento, lo que hace que el funcionamiento de este tipo de aerogeneradores sea mucho más suave, comparado con los aerogeneradores a sotavento y que además se libere más potencia [15].

La gran mayoría de los aerogeneradores modernos operan a barlovento debido a su buen funcionamiento, sin embargo, son más costosos debido a los sistemas de control tan complejos con los que cuentan [14].

Una clasificación importante de los aerogeneradores está directamente relacionada en cuanto a diseño de la turbina de viento, la cual puede estar constituida por un número diferente de álabes rotatorios ya sean uno, dos o tres álabes. La velocidad que alcanzan los tres tipos de turbinas mencionadas varía dependiendo del número de álabes, esto es, los rotores con uno o dos álabes giran a mayor velocidad que los de tres y además tienen a favor un ahorro en el costo de la turbina, así como en la instalación de la misma. Sin embargo, tienen en su contra una mayor complejidad en cuanto a diseño ya que el rotor debe ser basculante, es decir, debe contar con un contrapeso para evitar oscilaciones producidas por el paso de los álabes frente a la torre. En los aerogeneradores de media y gran potencia predominan los aerogeneradores de eje horizontal de rotor tripala a barlovento [14].



3.4 MODELO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

La máquina de inducción es una de las más usadas en la industria, con una tecnología bien establecida, una de las principales ventajas es su construcción robusta y sin escobillas, sin necesidad de alimentación de campo de CD separada [16]. Por estas razones la máquina de inducción es muy usada en grandes parques eólicos.

El modelo general de la máquina de inducción simétrica trifásica de dos polos conectada en estrella se muestra en la figura 3.3. Los devanados del estator desplazados 120° entre sí son idénticos con un número de vueltas N_s y una resistencia r_s .

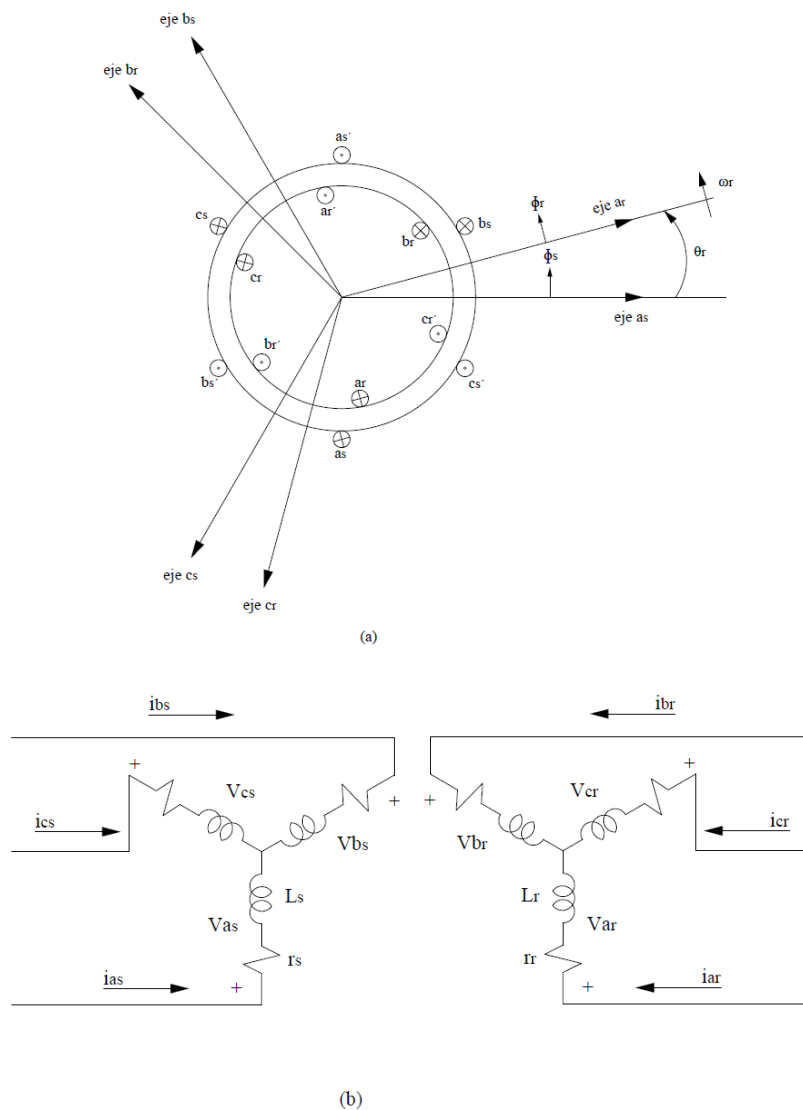


FIGURA 3.3 A) MÁQUINA DE INDUCCIÓN TRIFÁSICA DE DOS POLOS Y B) CIRCUITO EQUIVALENTE DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN CONECTADA EN ESTRELLA.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Para el caso del rotor sus tres devanados son idénticos, desplazados 120° entre sí con un número de vueltas N_r y una resistencia r_r . Tanto los devanados del rotor como del estator presentan una distribución sinusoidalmente debido a un entre hierro uniforme.

El modelo dinámico de la máquina de inducción utilizado en esta tesis es el reportado en [5], el cual es conocido como el modelo transitorio completo de sexto orden. Tomando en cuenta lo anterior se presentan las ecuaciones de voltaje de la máquina de inducción en un marco de referencia arbitrario en coordenadas $qd0$ como sigue,

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (3.1)$$

$$V_{ds} = r_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (3.2)$$

$$V_{0s} = r_s i_{0s} + \frac{p}{\omega_b} \psi_{0s} \quad (3.3)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - \omega_r) \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (3.4)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} - (\omega - \omega_r) \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (3.5)$$

$$V'_{0r} = r'_r i'_{0r} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{0r} \quad (3.6)$$

En donde ω_b es la velocidad angular eléctrica base usada para calcular las reactancias inductivas. Los enlaces de flujo se presentan a continuación, en donde se utilizan las reactancias inductivas para realizar el cálculo de los mismos,



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\psi_{qs} = X_{ls}i_{qs} + X_M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.7)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls}i_{ds} + X_M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.8)$$

$$\psi_{0s} = X_{ls}i_{0s} \quad (3.9)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr}i'_{qr} + X_M(i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.10)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr}i'_{dr} + X_M(i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.11)$$

$$\psi'_{0r} = X'_{lr}i'_{0r} \quad (3.12)$$

Expresando las ecuaciones 3.7-3.12 en forma matricial se tiene,

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 & 0 \\ 0 & X_{ss} & 0 & 0 & X_M & 0 \\ 0 & 0 & X_{ls} & 0 & 0 & 0 \\ X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & X_M & 0 & 0 & X'_{rr} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X'_{lr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{0s} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \\ I'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Donde,

$$X_{ss} = X_{ls} + X_M \quad (3.14)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$X'_{rr} = X'_{lr} + X_M \quad (3.15)$$

En donde X_{ls} y X'_{lr} son las reactancias de dispersión del estator y el rotor, X_M la reactancia mutua y X_{ss} y X'_{rr} las reactancias del estator y el rotor respectivamente.

Considerando que los enlaces de flujo son seleccionados como variables independientes, la matriz anterior se puede resolver para las corrientes de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I_{0s} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \\ I'_{0r} \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 & 0 \\ 0 & X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M & 0 \\ 0 & 0 & \frac{D}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & -X_M & 0 & 0 & X_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{D}{X'_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Donde:

$$D = X_{ss}X'_{rr} - X_M^2 \quad (3.17)$$

Sustituyendo (3.16) para las corrientes de las ecuaciones (3.1) - (3.6), se obtienen las ecuaciones de voltaje en términos de los enlaces de flujo por segundo como se muestra a continuación,



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{0s} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \\ V'_{0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega}{\omega_b} & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ -\frac{\omega}{\omega_b} & \frac{r_s X'_{rr}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & -\frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{r_s}{X_{ls}} + \frac{p}{\omega_b} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & \frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & 0 \\ 0 & -\frac{r'_r X_M}{D} & 0 & -\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} & \frac{r'_r X_{ss}}{D} + \frac{p}{\omega_b} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{r'_r}{X'_{lr}} + \frac{p}{\omega_b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Expresando (3.18) en base a las ecuaciones dinámicas correspondientes a los enlaces de flujos en el dominio $qd0$ se presenta como sigue,

$$\begin{bmatrix} \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ \frac{d\psi_{0s}}{dt} \\ \frac{d\psi'_{qr}}{dt} \\ \frac{d\psi'_{dr}}{dt} \\ \frac{d\psi'_{0r}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_b \frac{r_s X'_{rr}}{D} & -\omega & 0 & \omega_b \frac{r_s X_M}{D} & 0 & 0 \\ \omega & -\omega_b \frac{r_s X'_{rr}}{D} & 0 & 0 & \omega_b \frac{r_s X_M}{D} & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_b \frac{r_s}{X_{ls}} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_b \frac{r'_r X_M}{D} & 0 & 0 & -\omega_b \frac{r'_r X_{ss}}{D} & -(\omega - \omega_g) & 0 \\ 0 & \omega_b \frac{r'_r X_M}{D} & 0 & (\omega - \omega_g) & -\omega_b \frac{r'_r X_{ss}}{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\omega_b \frac{r'_r}{X'_{lr}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{qs} \\ \psi_{ds} \\ \psi_{0s} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \\ \psi'_{0r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ V_{0s} \\ V'_{qr} \\ V'_{dr} \\ V'_{0r} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

En [5] se presenta la ecuación de oscilación que representa la aceleración de la máquina de inducción en valores por unidad como se muestra a continuación,

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \left(\frac{T_e - T_L}{2H} \right) \omega_b \quad (3.20)$$

Expresando en valores por unidad el par electromagnético T_e se obtiene la siguiente expresión,



$$T_e = \psi'_{qr} I'_{dr} - \psi'_{dr} I'_{qr} \quad (3.21)$$

Integrando (3.20) se obtiene la velocidad de la máquina de inducción ω_b , con lo cual, se puede plantear una nueva variable de estado que proporcione la posición angular del rotor, esta variable se conoce como el ángulo del rotor de la máquina y se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{d\theta_g}{dt} = \omega_g \quad (3.22)$$

El modelado de una máquina de inducción se puede resumir por el conjunto de ecuaciones diferenciales presentadas en (3.19), (3.20) y (3.21).

3.4.1 MODELO REDUCIDO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN

A través de los años se ha prestado considerable atención al desarrollo de modelos reducidos con el propósito de predecir el comportamiento dinámico de alguno o todos los parámetros de las maquinas eléctricas durante grandes periodos de funcionamiento [17].

El modelo reducido de la máquina de inducción es utilizado para reducir el esfuerzo computacional que se requiere para analizar sistemas a gran escala con un considerable número de máquinas conectadas al mismo. Reduciendo el orden del modelo algunas de las ecuaciones diferenciales se transforman en algebraicas.

La reducción del modelo se enfoca directamente en eliminar los transitorios en el estator de la máquina debido a que su comportamiento dinámico (transitorio) es muy breve y en un periodo muy corto de tiempo se alcanza el estado estable.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Al eliminar los transitorios en el estator, las cantidades del mismo solo presentan componentes a la frecuencia fundamental y las ecuaciones de voltaje del estator de la máquina aparecen como ecuaciones algebraicas.

Por otro lado, considerando que la máquina de inducción opera en condiciones balanceadas, se pueden eliminar las componentes ψ_{0s} y ψ'_{0r} de la ecuación (3.19) ya que son iguales a cero.

3.4.1.1 MODELO REDUCIDO DEL GENERADOR DE INDUCCIÓN DE ROTOR DEVANADO

Los aerogeneradores de velocidad variable cuentan con un sistema de paso variable, el cual permite para cada velocidad de viento adaptar el ángulo de las palas, de modo que se extraiga de forma controlada el óptimo de energía de la corriente de viento. Así, con velocidades de viento bajas se adapta el paso para extraer el máximo posible de energía y, con alto viento, se adapta el ángulo de paso para captar una cantidad controlada de energía, de modo que la máquina produce la potencia nominal de forma controlada y estable hasta la velocidad de corte [18].

Para el caso de los aerogeneradores de velocidad variable, uno de los generadores que se puede incorporar es el GIRD. El cual se conecta al sistema eléctrico a través de un convertidor de potencia basado en dispositivos de estado sólido.

En esta tesis se presenta el GIRD, que corresponde al modelo reducido de la máquina de inducción reportado en [17].

Las ecuaciones de voltaje escritas en un marco de referencia arbitrario para la máquina de inducción, despreciando los transitorios eléctricos en el estator y donde las ecuaciones del eje 0 son eliminadas se muestran a continuación,

$$V_{qs} = r_s i_{qs} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{ds} \quad (3.23)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$V_{ds} = r_s i_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \psi_{qs} \quad (3.24)$$

$$V'_{qr} = r'_r i'_{qr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{qr} \quad (3.25)$$

$$V'_{dr} = r'_r i'_{dr} + \left(\frac{\omega - \omega_r}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} + \frac{p}{\omega_b} \psi'_{dr} \quad (3.26)$$

Donde

$$\psi_{qs} = X_{ls} i_{qs} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.27)$$

$$\psi_{ds} = X_{ls} i_{ds} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.28)$$

$$\psi'_{qr} = X'_{lr} i'_{qr} + X_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (3.29)$$

$$\psi'_{dr} = X'_{lr} i'_{dr} + X_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (3.30)$$

Tomando en cuenta que ω_e es la velocidad angular en el marco de referencia síncrono con $\frac{\omega_e}{\omega_b} = 1$ se solucionan las ecuaciones (3.23) y (3.24) para los enlaces de flujo en el estator como sigue,



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\psi_{ds} = V_{qs} - r_s I_{qs} \quad (3.31)$$

$$\psi_{qs} = r_s I_{ds} - V_{ds} \quad (3.32)$$

Considerando las corrientes de componente cero tanto del rotor como del estator cero, debido a la operación balanceada, la ecuación (3.16) se puede desarrollar de la siguiente manera,

$$I_{qs} = \frac{1}{D} (X'_{rr} \psi_{qs} - X_M \psi'_{qr}) \quad (3.33)$$

$$I_{ds} = \frac{1}{D} (X'_{rr} \psi_{ds} - X_M \psi'_{dr}) \quad (3.34)$$

$$I'_{qr} = \frac{1}{D} (X_{ss} \psi'_{qr} - X_M \psi_{qs}) \quad (3.35)$$

$$I'_{dr} = \frac{1}{D} (X_{ss} \psi'_{dr} - X_M \psi_{ds}) \quad (3.36)$$

Sustituyendo los enlaces de flujo del estator (3.31) y (3.32) en (3.33) y (3.34) se obtienen las siguientes ecuaciones,

$$I_{qs} = \frac{1}{D} (X'_{rr} (r_s I_{ds} - V_{ds}) - X_M \psi'_{qr}) \quad (3.37)$$



$$I_{ds} = \frac{1}{D} (X'_{rr} (V_{qs} - r_s I_{qs}) - X_M \psi'_{dr}) \quad (3.38)$$

Expresando en forma matricial las ecuaciones (3.35), (3.36), (3.37) y (3.38) se presentan las corrientes del estator y el rotor en términos de los enlaces de flujo del rotor y los voltajes del estator [19].

$$\begin{bmatrix} I_{qs} \\ I_{ds} \\ I'_{qr} \\ I'_{dr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D & -X'_{rr} r_s & 0 & 0 \\ X'_{rr} r_s & D & 0 & 0 \\ 0 & X_M r_s & D & 0 \\ -X_M r_s & 0 & 0 & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & -X'_{rr} & -X_M & 0 \\ X'_{rr} & 0 & 0 & -X_M \\ 0 & X_M & X_{ss} & 0 \\ -X_M & 0 & 0 & X_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs} \\ V_{ds} \\ \psi'_{qr} \\ \psi'_{dr} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

Las ecuaciones diferenciales para el modelo reducido de la máquina de inducción son únicamente los correspondientes a los enlaces de flujo del rotor, debido a que se desprecian los transitorios en el estator. Las ecuaciones mencionadas se muestran a continuación,

$$\frac{d\psi'_{qr}}{dt} = \omega_b \left(V'_{qr} - r'_r I'_{qr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_g}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} \right) \quad (3.40)$$

$$\frac{d\psi'_{dr}}{dt} = \omega_b \left(V'_{dr} - r'_r I'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_g}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} \right) \quad (3.41)$$

La ecuación de oscilación para este modelo se expresa como sigue,

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{T_m - T_e}{2H} \quad (3.42)$$



En donde T_m corresponde al par mecánico aplicado a la flecha del rotor, T_e al par electromagnético y H a la inercia del generador. Las ecuaciones presentadas para este modelo se encuentran reportadas en [19].

3.5 SISTEMA MECÁNICO TURBINA GENERADOR

El sistema mecánico de la turbina eólica es el tren de accionamiento, el cual consiste en la masa rotatoria de los ejes de la turbina y del generador, incluyendo posiblemente un sistema de engranajes. La mayor fuente de inercia de este sistema se encuentra en la turbina eólica y en el rotor del generador. Los engranes contribuyen solo una fracción relativamente pequeña, por esta razón la inercia de la caja de engranajes es a menudo despreciada y solo la relación de engranaje es incluida en el modelo [13]

Para el acoplamiento mecánico Turbina-Generador se presenta el modelo de dos masas el cual corresponde a un aerogenerador de velocidad variable, el cual tiene una caja multiplicadora con una relación de engranaje.

Las características estáticas de una turbina de viento pueden ser descritas por la relación entre el total de la potencia del viento y la potencia mecánica de la turbina de viento [13]. La potencia del viento dentro del área de barrido del rotor de la turbina de viento está dada por la siguiente ecuación,

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho_{aire} \pi R_a^2 V_{viento}^3 \quad (3.43)$$

Donde ρ_{aire} es la densidad del aire, R_a es el radio de la turbina eólica y V_{viento} es la velocidad del viento. El viento al pasar por los álabes de la turbina eólica reduce su velocidad extrayendo una fracción de la potencia del viento. Esta fracción es denominada como el coeficiente de eficiencia de la potencia C_p , el cual, es conocido como una función



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

de la velocidad específica de las aspas λ y del ángulo de posicionamiento de los álabes β .

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (3.44)$$

Donde

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.45)$$

y

$$\lambda = \frac{\omega_{tur} R_a}{V_{viento}} \quad (3.46)$$

Donde c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 y c_6 son valores constantes, los cuales se definen en el Apéndice (A). Considerando diferentes valores de λ se puede obtener la curva característica de la turbina de viento para diferentes ángulos β , como se muestra en la figura 3.4.

La potencia mecánica de la turbina de viento P_{turb} , es descrita por la siguiente ecuación:

$$P_{turb} = C_p(\lambda, \beta) P_{viento} \quad (3.47)$$

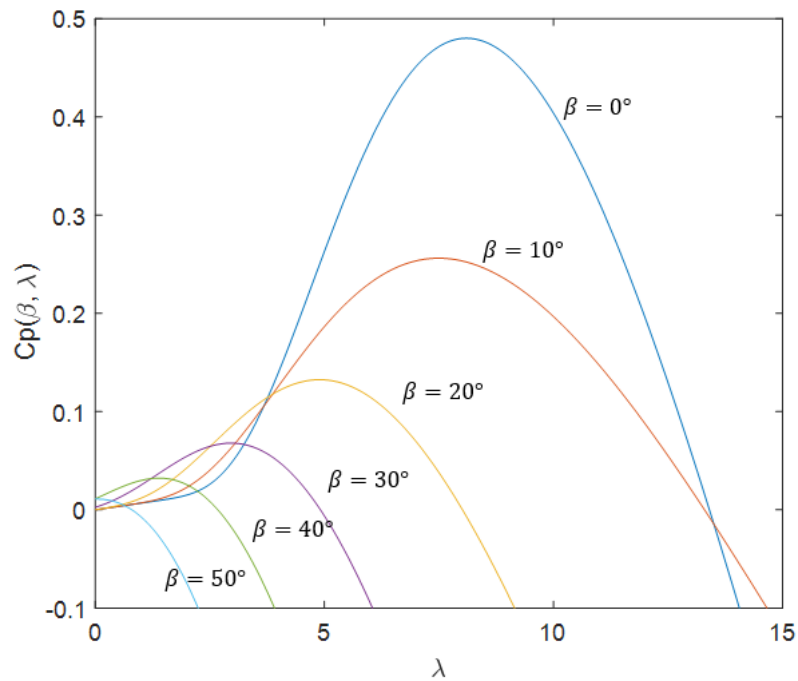


FIGURA 3.4 CURVA CARACTERÍSTICA $C_p - \lambda$ DE LA TURBINA DE VIENTO

También se puede considerar la potencia mecánica P_{turb} en función del par mecánico como se muestra en la siguiente expresión,

$$T_{tur} = \frac{P_{tur}}{\omega_{tur}} \quad (3.48)$$

Donde ω_{turb} y ω_g son iguales para el modelo de una masa, debido a que se encuentran acopladas por la misma flecha.

Si se considera que en el modelo de dos masas $\omega_{turb} \neq \omega_g$ [20], incorporando una caja multiplicadora con una relación de engranaje, el acoplamiento mecánico entre la turbina y el generador puede ser descrito por medio de la eficiencia de la caja multiplicadora como se muestra a continuación,



$$T_m \omega_g = \eta_{gbx} T_{tur} \omega_{tur} \quad (3.49)$$

El par mecánico del generador se define como:

$$T_m = \frac{\eta_{gbx} T_{tur}}{a_{gbx}} \quad (3.50)$$

Donde $a_{gbx} = \frac{\omega_g}{\omega_{tur}}$ y η_{gbx} es la eficiencia del acoplamiento mecánico.

3.5.1 MODELO DE DOS MASAS

El modelo de dos masas considera la operación de la masa de la turbina eólica y del generador eléctrico de manera independiente acoplados mecánicamente por una caja multiplicadora con una relación de engranaje a_{gbx} , como se muestra en la Figura 3.5. La caja multiplicadora contiene diferentes etapas de engranajes. La incorporación de la caja multiplicadora en el modelo de dos masas proporciona dos velocidades diferentes asociadas al lado de la turbina eólica (lado de baja velocidad (l_s)) y al lado del generador eléctrico (lado de alta velocidad (h_s)) cuya relación está dada por el valor de la relación de engranaje a_{gbx} [21] [22].

Los sentidos de torsión mecánica y electromagnética presentes en cada etapa del sistema de dos masas se muestran en la Figura 3.5, los cuales son el par mecánico proporcionado por la turbina eólica T_m , el par mecánico del lado de baja velocidad T_{l_s} , el par mecánico de alta velocidad T_{h_s} y el par electromagnético T_e . En esta tesis, todos los pares anteriormente mencionados son utilizados en el sistema por unidad. El término H_{tur} representa la inercia de la turbina eólica y el término H_g la inercia del generador, estos parámetros son proporcionados por el fabricante y están dados en segundos (s).

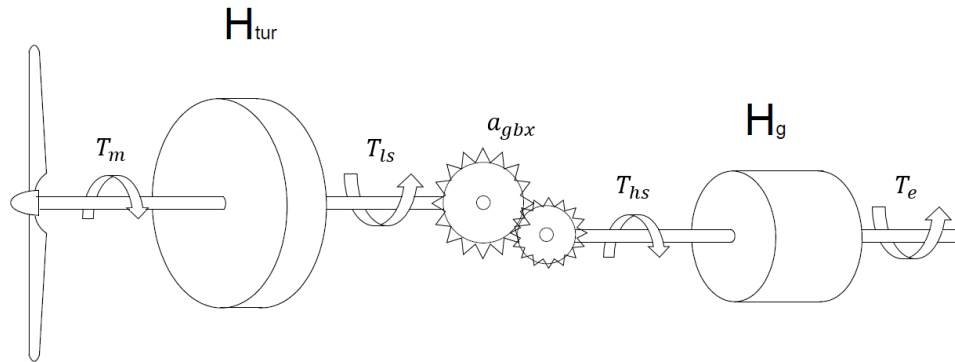


FIGURA 3.5 MODELO DE DOS MASAS

Los momentos de inercia anteriormente mencionados están en función de los coeficientes de inercia del eje de baja velocidad J_{tur} , del eje de alta velocidad J_g , respectivamente, y de la potencia base del sistema P_b . Por lo tanto, los momentos de inercia correspondientes a los lados de baja y alta velocidad se determinan por medio de las siguientes ecuaciones [13],

$$H_{tur} = \frac{J_{tur}\omega_{b,ls}^2}{2P_b} \quad (3.51)$$

$$H_g = \frac{J_g\omega_{b,hs}^2}{2P_b} \quad (3.52)$$

Con

$$\omega_{b,ls} = \frac{\omega_b}{n_{pp}\eta_{gbx}} \quad (3.53)$$

$$\omega_{b,hs} = \frac{\omega_b}{n_{pp}} \quad (3.54)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

En donde $\omega_b = 2\pi f$ es la frecuencia eléctrica base del sistema, n_{pp} es el número de pares de polos del generador y η_{gbx} es la eficiencia de la caja multiplicadora.

Las ecuaciones dinámicas que representan al modelo de dos masas son las correspondientes a las velocidades de la turbina ω_{tur} y del generador ω_g . Para plantear estas ecuaciones es necesario solucionar las ecuaciones (3.51) y (3.52) para J_{tur} y J_g , respectivamente. Entonces, al considerar los sentidos de torsión mecánicos y electromagnéticos ilustrados en la Figura 3.5 se obtiene como resultado las siguientes ecuaciones,

$$J_{tur} \frac{d\omega_{tur}}{dt} = -T_m + T_{ls} - K_{tur}\omega_{tur} \quad (3.55)$$

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = -T_{hs} - K_g\omega_g + T_e \quad (3.56)$$

Donde K_{tur} y K_g son los coeficientes de rigidez de los ejes de baja y alta velocidad, respectivamente. Considerando que la relación de engranaje a_{gbx} está dada por,

$$a_{gbx} = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{tur}} \quad (3.57)$$

Entonces de (3.57) se plantean las siguientes relaciones,

$$\omega_g = a_{gbx}\omega_{ls} \quad (3.58)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$T_{hs} = \frac{T_{ls}}{a_{gbx}} \quad (3.59)$$

Las ecuaciones (3.58) y (3.59) son utilizadas para referenciar el lado de alta velocidad al lado de baja, es decir, se utilizan para expresar la velocidad de lado de alta velocidad en términos del lado de baja. Para lograr esta referencia se sustituyen estas ecuaciones en (3.56) y se obtiene el siguiente resultado:

$$a_{gbx}^2 J_g \frac{d\omega_{ls}}{dt} = -T_{ls} - a_{gbx}^2 K_g \omega_{ls} + a_{gbx} T_e \quad (3.60)$$

Considerando que el eje del lado de baja velocidad es perfectamente rígido, se puede asumir que $\omega_{tur} = \omega_{ls}$. Entonces, la ecuación anterior queda de la siguiente manera,

$$a_{gbx}^2 J_g \frac{d\omega_{tur}}{dt} = -T_{ls} - a_{gbx}^2 K_g \omega_{tur} + a_{gbx} T_e \quad (3.61)$$

Con el objetivo de referenciar el lado de alta velocidad al lado de baja, se puede considerar que ahora se cuenta con un modelo de una masa, el cual se obtiene sumando (3.55) y (3.61), resultando la siguiente expresión para la ecuación dinámica de la velocidad de la turbina eólica,

$$\frac{d\omega_{tur}}{dt} = \frac{-T_m - (K_{tur} + a_{gbx}^2 K_g) \omega_{tur} + a_{gbx} T_e}{J_{tur} + a_{gbx}^2 J_g} \quad (3.62)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Si se considera que es un sistema ideal y no existen pérdidas mecánicas, es decir, $K_{tur} = 0$ y $K_g = 0$ se tiene,

$$\frac{d\omega_{tur}}{dt} = \frac{-T_m + a_{gbx}T_e}{J_{tur} + a_{gbx}^2 J_g} \quad (3.63)$$

La ecuación anterior es la expresión resultante para representar la velocidad de la turbina eólica por medio de una ecuación dinámica, la cual está en función de las masas correspondientes a la turbina y al generador.

Para determinar la ecuación dinámica correspondiente a la velocidad del generador, es necesario referenciar el lado de baja velocidad al lado de alta velocidad utilizando las siguientes relaciones obtenidas de (3.57),

$$\omega_{tur} = \frac{\omega_g}{a_{gbx}} \quad (3.64)$$

$$T_{ls} = a_{gbx} T_{hs} \quad (3.65)$$

Sustituyendo (3.64) y (3.65) en (3.55), se logra referenciar el lado de baja velocidad a lado de alta obteniendo la siguiente expresión,

$$\frac{J_{tur}}{a_{gbx}^2} \frac{d\omega_g}{dt} = \frac{-T_m}{a_{gbx}} + T_{hs} - \frac{K_{tur}\omega_g}{a_{gbx}^2} \quad (3.66)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Para referenciar el lado de baja velocidad al lado de alta se puede considerar que ahora se cuenta con un modelo de una masa, el cual se obtiene sumando (3.56) y (3.66), resultando la siguiente expresión para la ecuación dinámica de la velocidad del generador eléctrico,

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{\frac{-T_m}{a_{gbx}} + T_e - \left(K_g + \frac{K_{tur}}{a_{gbx}^2}\right)\omega_g}{J_g + \frac{J_{tur}}{a_{gbx}^2}} \quad (3.67)$$

Considerando un sistema ideal en el cual no existen pérdidas mecánicas, donde $K_{tur} = 0$ y $K_g = 0$ se tiene,

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{\frac{-T_m}{a_{gbx}} + T_e}{J_g + \frac{J_{tur}}{a_{gbx}^2}} \quad (3.68)$$

La ecuación anterior es la expresión resultante para representar la velocidad del generador eléctrico por medio de una ecuación dinámica, la cual está en función de las masas correspondientes a la turbina y al generador [21] [22].

Debido a que las variables de estado que representan el modelo del generador de inducción están dadas en por unidad, es necesario que las variables de estado correspondientes al acoplamiento mecánico también sean expresadas en las mismas unidades. Para realizar el cambio es necesario expresar las ecuaciones (3.63) y (3.68) en términos de los momentos de inercia (H_g y H_{tur}) en lugar de las inercias (J_g y J_{tur}). Al realizar este cambio en las ecuaciones de ω_g y ω_{tur} , las ecuaciones correspondientes en por unidad son las siguientes:



$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{\frac{-T_m}{a_{gbx}} + T_e}{\frac{J_g \omega_{b,hs}^2}{P_b} + \frac{J_{tur} \omega_{b,ls}^2}{P_b a_{gbx}^2}} \quad (3.69)$$

$$\frac{d\omega_{tur}}{dt} = \frac{-T_m + a_{gbx} T_e}{\frac{J_{tur} \omega_{b,ls}^2}{P_b} + \frac{J_g a_{gbx}^2 \omega_{b,hs}^2}{P_b}} \quad (3.70)$$

Las ecuaciones dinámicas de la velocidad de la turbina y del generador dependen del par mecánico proporcionado por la turbina eólica T_m , el cual se calcula con la siguiente expresión,

$$T_m = \frac{P_{tur}}{\omega_{tur}} \quad (3.71)$$

Donde,

$$P_{tur} = C_p(\lambda, \beta) P_{viento} \quad (3.72)$$

Para considerar que la turbina eólica está aplicando un par mecánico al generador, este debe ser negativo.

3.6 MODELO DEL CONVERTIDOR DE POTENCIA EN EL DOMINIO $q d 0$

En esta tesis se analiza el modelo de un aerogenerador tipo D, también conocido como *full converter*, el cual se conforma por un generador de inducción de rotor devanado conectado en serie con un convertidor de potencia. Para realizar la conexión del convertidor lado inversor se tiene un transformador para conectarse a un bus infinito y



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

del lado del inversor otro transformador para conectarlo con la máquina de inducción. El modelo del convertidor de potencia se ilustra en la figura 3.6.

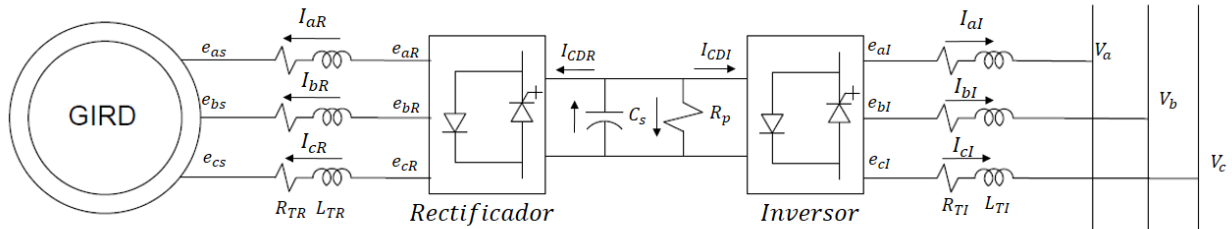


FIGURA 3.6 DIAGRAMA DEL AEROGENERADOR TIPO D

Las principales características que presenta este tipo de aerogenerador son:

- Control sobre potencia activa y reactiva.
- Control sobre la frecuencia.
- Toda la potencia que genera la máquina atraviesa el convertidor.
- Convertidor más costoso.
- Mayores pérdidas en el convertidor.
- En general mejores prestaciones que los doblemente alimentados.
- Según su diseño pueden prescindir de caja multiplicadora. (maquinas multipolares)
- Costo elevado.

Para obtener la ecuación diferencial del voltaje en el capacitor C_s se aplica la Ley de Corrientes de Kirchhoff en el punto de interconexión del Inversor y el Rectificador, el cual es punto común para el capacitor C_s y la resistencia del convertidor R_p , como se muestra en la siguiente expresión,

$$I_{XCS} - I_{Rp} - I_{CDI} - I_{CDR} = 0 \quad (3.73)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Desarrollando la corriente del capacitor $I_{X_{CS}}$ en términos de la reactancia del mismo se tiene que,

$$i(t) = C \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{\omega X_{CS}} \frac{dV}{dt} \quad (3.74)$$

$$\frac{1}{\omega X_{CS}} V_{CD} = -\frac{V_{CD}}{R_p} - I_{CDI} - I_{CDR} \quad (3.75)$$

Despejando el Voltaje de CD (V_{CD}) se obtiene la ecuación diferencial del Voltaje en el Capacitor,

$$V_{CD} = -\omega X_{CS} \left(\frac{V_{CD}}{R_p} + I_{CDI} + I_{CDR} \right) \quad (3.76)$$

Para obtener la ecuación de corrientes de fase en el Inversor se aplica la Ley de Voltajes de Kirchhoff en el transformador del inversor como se muestra a continuación [23],

$$V_{abc} = e_{abcI} - R_{TI} i_{abcI} - L_{TI} \dot{i}_{abcI} \quad (3.77)$$

Desarrollando el término de la Inductancia del transformador del inversor L_{TI} se tiene,

$$V_{abc} = e_{abcI} - R_{TI} i_{abcI} - \frac{X_{TI}}{\omega} \frac{di_{abcI}}{dt} \quad (3.78)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Despejando los términos asociados a la inductancia del transformador del inversor se tiene,

$$\frac{X_{TI}}{\omega} \frac{di_{abcI}}{dt} = e_{abcI} - R_{TI}i_{abcI} - V_{abc} \quad (3.79)$$

Reagrupando términos en la ecuación anterior, se obtiene la ecuación diferencial de la corriente en el Inversor,

$$\frac{di_{abcI}}{dt} = \omega \left(\frac{e_{abcI}}{X_{TI}} - \frac{R_{TI}i_{abcI}}{X_{TI}} - \frac{V_{abc}}{X_{TI}} \right) \quad (3.80)$$

En donde el voltaje de fase se define como,

$$V_{abc} = \sqrt{2}V_s \cos(\omega t + \theta_s) \quad (3.81)$$

Donde V_s es el valor rms del voltaje de fase del bus, ω la frecuencia del sistema y θ_s el ángulo de fase de referencia.

Para representar en forma matricial las ecuaciones de corriente del Inversor, la ecuación (3.80) se plantea de la siguiente manera,

$$\frac{di_{abcI}}{dt} = -A_{abc}i_{abcI} + \frac{\omega}{X_{TI}}e_{abcI} - \frac{\omega}{X_{TI}}V_{abc} \quad (3.82)$$

En donde A_{abc} está definida como,



$$A_{abc} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

El vector de voltaje e_{abcI} incluye los voltajes de fase del inversor y el vector de voltaje V_{abc} incluye los voltajes de fase en el bus de conexión del convertidor, los cuales se definen en las siguientes ecuaciones,

$$e_{abcI} = \begin{bmatrix} kV_{CD} \cos(\omega t + \alpha) \\ kV_{CD} \cos(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ kV_{CD} \cos(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

$$V_{abc} = \begin{bmatrix} V_s \cos(\omega t + \theta_s) \\ V_s \cos(\omega t + \theta_s - \frac{2\pi}{3}) \\ V_s \cos(\omega t + \theta_s + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.85)$$

Para transformar la ecuación de corriente del Inversor (3.82) al marco de referencia $qd0$ se aplica la siguiente relación de transformación,

$$f_{qd0} = k_s f_{abc} \quad (3.86)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Donde k_s es la matriz de transformación al dominio $qd0$ definido como [5]

$$k_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen}(\omega t) & \text{sen}(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Aplicando (3.86) a (3.82) se obtiene,

$$\frac{di_{qd0I}}{dt} = -A_{qd0}i_{qd0I} + \frac{\omega}{X_{TI}}e_{qd0I} - \frac{\omega}{X_{TI}}V_{qd0} \quad (3.88)$$

Al igual que la ecuación (3.82), se deben transformar las ecuaciones (3.83), (3.84) y (3.85) al marco de referencia $qd0$ utilizando la ecuación de transformación (3.86) como sigue,

$$A_{qd0} = k_s A_{abc} k_s^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} \end{bmatrix} \quad (3.89)$$

$$e_{qd0I} = k_s e_{abcI} = \begin{bmatrix} kV_{CD} \cos(\alpha) \\ -kV_{CD} \text{sen}(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.90)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$V_{qd0} = k_s V_{abc} = \begin{bmatrix} V_s \cos(\theta_s) \\ -V_s \sin(\theta_s) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.91)$$

La transformación al dominio $qd0$ del vector de las ecuaciones diferenciales correspondientes a las corrientes de fase $\frac{di_{abc}}{dt}$ de la ecuación de corrientes del convertidor da como resultado,

$$\frac{di_{qd0}}{dt} = \begin{bmatrix} I_{d\omega} \\ -I_{q\omega} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{dI_d}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.92)$$

Sustituyendo (3.89) - (3.91) en (3.88) se obtiene,

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_q}{dt} \\ \frac{dI_d}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{Tl}\omega}{X_l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_{Tl}\omega}{X_l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_{Tl}\omega}{X_l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{\omega}{X_s} \begin{bmatrix} kV_{CD} \cos(\alpha) \\ -kV_{CD} \cos(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{\omega}{X_s} \begin{bmatrix} V_s \cos(\theta_s) \\ -V_s \sin(\theta_s) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{d\omega} \\ -I_{q\omega} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.93)$$

La corriente I_{CD} está en función de las componentes fundamentales de las corrientes de fase y las funciones de conmutación s asociadas al convertidor,

$$I_{CD} = [S_{a1} \quad S_{b1} \quad S_{c1}] \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} \quad (3.94)$$



En donde,

$$S_{abc,1} = \begin{bmatrix} k\cos(\omega t + \alpha) \\ k\cos(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ k\cos(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \quad (3.95)$$

Expresando la ecuación anterior por fases se tiene,

$$S_{abc,1} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} k\cos(\omega t + \alpha) \\ k\cos(\omega t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ k\cos(\omega t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}^T \quad (3.96)$$

Transformando las funciones de conmutación (3.95) y las corrientes de fase (3.94) al dominio $qd0$, utilizando la matriz de transformación k_p , se tiene,

$$S_{qd0} = S_{abc}k_p^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2}k\cos(\alpha) \\ -\frac{3}{2}k\sin(\alpha) \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad (3.97)$$

$$i_{qd0} = k_p i_{abc} = \begin{bmatrix} I_q \\ I_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.98)$$

Multiplicando (3.97) por (3.98) se obtiene la corriente de CD en el dominio $qd0$,



$$I_{CD_{qd0}} = \frac{3}{2}k\cos(\alpha)I_q - \frac{3}{2}k\sin(\alpha)I_d \quad (3.99)$$

Transformando la ecuación diferencial de voltaje del capacitor (3.76) al dominio $qd0$ e incorporando (3.99), la ecuación diferencial del voltaje del capacitor se define como,

$$\frac{dV_{CD_{qd0}}}{dt} = -M_{kR}\cos(\alpha)I_{qR} + M_{kR}\sin(\alpha)I_{dR} - M_{kI}\cos(\alpha)I_{qI} + M_{kI}\sin(\alpha)I_{dI} - \frac{X_{cs}\omega V_{CD}}{R_p} \quad (3.100)$$

En donde,

$$M_k = \frac{3}{2}k\omega X_{cs} \quad (3.101)$$

La ecuación diferencial de la corriente en el rectificador se desarrolla con el mismo principio que la ecuación diferencial de la corriente del inversor y se expresa como sigue,

$$\frac{di_{qd0R}}{dt} = -A_{qd0}i_{qd0R} + \frac{\omega}{X_{TR}}e_{qd0R} - \frac{\omega}{X_{TR}}V_{qd0s} \quad (3.102)$$

El modelo del convertidor de potencia en el dominio $qd0$ está dado por la siguiente expresión matricial,



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\begin{bmatrix} \frac{dI_{qR}}{dt} \\ \frac{dI_{dR}}{dt} \\ \frac{dV_{CD}}{dt} \\ \frac{dI_{qI}}{dt} \\ \frac{dI_{dI}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{TR}\omega}{X_{TR}} & -\omega & \frac{\omega k_R}{X_{TR}} \cos(\alpha_R) & 0 & 0 \\ \omega & \frac{-R_{TR}\omega}{X_{TR}} & -\frac{\omega k_R}{X_{TR}} \sin(\alpha_R) & 0 & 0 \\ -M_{kR} \cos(\alpha_R) & M_{kR} \sin(\alpha_R) & -\frac{X_{CS}\omega_s}{R_p} & -M_{kI} \cos(\alpha_I) & M_{kI} \sin(\alpha_I) \\ 0 & 0 & \frac{\omega k_I}{X_{TI}} \cos(\alpha_I) & \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} & -\omega \\ 0 & 0 & -\frac{\omega k_I}{X_{TI}} \sin(\alpha_I) & \omega & \frac{-R_{TI}\omega}{X_{TI}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{qR} \\ I_{dR} \\ V_{CD} \\ I_{qI} \\ I_{dI} \end{bmatrix} \dots \quad (3.103)$$

$$\dots - \frac{\omega}{X_{TR}} \begin{bmatrix} V_{qbus} \\ -V_{dbus} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{\omega}{X_{TI}} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_{qs} \\ -V_{ds} \end{bmatrix}$$



CAPÍTULO 4

REGULACIÓN DE FRECUENCIA

4.1 INTRODUCCIÓN

La frecuencia eléctrica del SIN debe permanecer dentro de los rangos de 60.1 Hz y 59.9 Hz para que el suministro eléctrico se realice en condiciones de calidad aceptables. Variaciones en la frecuencia alejadas del valor nominal (60 Hz) pueden provocar el mal funcionamiento de diversos equipos industriales o domésticos [8]. En este capítulo se describen los fundamentos del control de frecuencia, donde se presentan los modelos de regulación primaria y secundaria para el control de frecuencia.

4.2 BALANCE CARGA GENERACIÓN.

El balance carga generación en el sistema eléctrico debe mantenerse de manera continua, cualquier diferencia en este balance ocasiona una desviación de frecuencia. Para cumplir con los requisitos de balance y corregir sus diferencias, las unidades generadoras deben ser operadas y controladas en diferentes horizontes de tiempo, de tal forma de cumplir con el consumo y regular la frecuencia del sistema [24].

Actualmente el balance carga-generación se realiza en diferentes etapas sucesivas, manteniendo una relación entre ellas,

- Despacho de Generación
- Regulación del Sistema

El despacho de generación consiste en satisfacer la demanda pronosticada del sistema eléctrico, cumpliendo con el predespacho (asignación de generación establecida por el esquema de generación diario) y la regulación del sistema consta de la regulación primaria y secundaria que se mencionan en las siguientes secciones.



4.3 REGULACIÓN PRIMARIA

La regulación primaria tiene por objeto corregir automáticamente los desequilibrios instantáneos entre producción y consumo. Se aporta mediante la variación de potencia de los generadores de forma inmediata y autónoma por actuación de los reguladores de velocidad de las turbinas como respuesta a las variaciones de frecuencia [8].

El tiempo en que actúa la regulación primaria va de los 2 a los 30 segundos (dependiendo del tipo de generador) después de ocurrida la falla. Este control tiene directa relación con las reservas de potencia que se activan automáticamente en los primeros segundos después de ocurrido un cambio en la frecuencia del sistema (ya sea por variaciones normales de la demanda o producto de una contingencia). Normalmente la regulación primaria es asignada a un grupo de generadores los cuales deben ser capaces de realizar la regulación de frecuencia del sistema [25]. Cabe destacar que las unidades que participan en la regulación primaria de frecuencia deben ser despachadas con valores menores al nominal para que mantengan una reserva y puedan actuar ante variaciones en la frecuencia.

Una vez finalizado el proceso la regulación primaria de frecuencia, el sistema logra alcanzar un equilibrio entre la potencia activa generada y la potencia consumida, pero aún existe una desviación de la frecuencia eléctrica del sistema con respecto a su valor nominal, por lo que es necesario otra etapa en el proceso de control de frecuencia ante una perturbación. Esta segunda etapa es la regulación secundaria de frecuencia [25].

Cabe mencionar que, aunque las turbinas eólicas pueden participar en la regulación primaria de frecuencia, dada la no controlabilidad del viento, la “calidad” de la regulación no se compara con la entregada por una central convencional, debido a que las grandes centrales presentan mayor respuesta inercial.

4.3.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL GENERADOR

El conjunto eje-turbina de un generador síncrono gira sometido a dos pares opuestos: el par mecánico T_m aportado por la turbina tiende a acelerar el eje, mientras



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

que el par electromagnético T_e tiende a frenarlo. La ecuación básica de este movimiento es [8],

$$J \frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = (T_m - T_e) \quad (4.1)$$

Donde J es el momento de inercia y θ_r es el ángulo del rotor. En lugar de la segunda derivada del ángulo se puede escribir,

$$\frac{d^2 \theta_r}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\omega_r - \omega_0)}{dt} = \frac{d\Delta\omega_r}{dt} \quad (4.2)$$

Donde ω_r es la velocidad del rotor, ω_0 es la velocidad de referencia y $\Delta\omega_r$ es la desviación de velocidad. Por lo tanto, se puede escribir la ecuación 4.1 como,

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e) \quad (4.3)$$

Para expresar las ecuaciones anteriores en el sistema por unidad se toma como potencia base S_{base} para la potencia nominal de la máquina, como frecuencia base ω_{base} la frecuencia de referencia y como par base $T_{base} = S_{base} / \omega_{base}$. Dividiendo el miembro de la izquierda de la ecuación anterior entre ω_{base} y el miembro de la derecha entre $S_{base} / T_{base} \omega_{base}^2$. La ecuación 4.3 se expresa en valores por unidad como sigue,



$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(T_m - T_e) \quad (4.4)$$

Donde H es la constante de inercia, definida como,

$$H = \frac{\frac{1}{2}J\omega_{base}^2}{S_{base}} \quad (4.5)$$

La constante de inercia H es un parámetro muy utilizado en el control de sistemas eléctricos, y representa la energía cinética acumulada en el eje a la velocidad de sincronismo dividida entre la potencia base [8].

Dado que el sistema de control regula la potencia eléctrica, que es un término más fácil de medir que el par electromagnético, es conveniente expresar la ecuación 4.3 en términos de potencia en vez de par. Para ello considerando la relación entre potencia y par como $P = \omega_r T$. Considerando una desviación pequeña a partir de un estado inicial determinado por el subíndice 0, se puede desarrollar la siguiente ecuación,

$$P_0 + \Delta P = (\omega_0 + \Delta\omega_r)(T_0 + \Delta T) \quad (4.6)$$

Considerando sólo los incrementos, y despreciando los de segundo orden se tiene,

$$\Delta P = \omega_0 \Delta T + T_0 \Delta\omega_r \quad (4.7)$$

En el eje



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\Delta P_m - \Delta P_e = \omega_0(\Delta T_m - \Delta T_e) + (T_{m0} - T_{e0})\Delta\omega_r \quad (4.8)$$

Considerando un régimen permanente donde $T_{m0} = T_{e0}$ y en por unidad $\omega_0 = 1$, la ecuación 4.7 se expresa como,

$$\Delta P_m - \Delta P_e = (\Delta T_m - \Delta T_e) \quad (4.9)$$

Tomando en cuenta pequeños incrementos alrededor del régimen permanente, la ecuación 4.3 se puede escribir como,

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(\Delta P_m - \Delta P_e) \quad (4.10)$$

La ecuación 4.10 se conoce como la ecuación de oscilación de la máquina síncrona, y el diagrama de bloques de dicha ecuación se presenta en la Figura 4.1

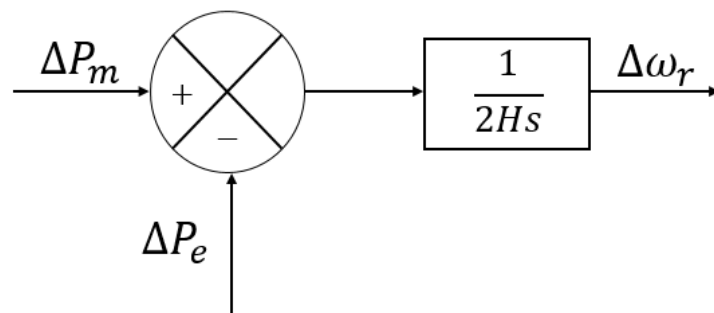


FIGURA 4.1 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA ENTRE LA POTENCIA Y LA FRECUENCIA.



4.4 REGULACIÓN SECUNDARIA

La regulación secundaria de frecuencia se define como la acción manual o automática destinada a compensar el error final de frecuencia resultante de la acción de la regulación primaria que ejercen los controladores de velocidad de las unidades generadoras dispuestas para tal fin. El tiempo de respuesta de esta acción es del orden de varios minutos, no pudiendo exceder los 15 minutos, y a su vez debe ser sostenible durante 30 minutos. Es función de la regulación secundaria restablecer la frecuencia del SIN a su valor nominal, permitiendo a las unidades generadoras participantes en la regulación primaria restablecer su producción de acuerdo con el orden económico del despacho [25].

En la operación del SIN, la Regulación Secundaria se realiza con el CAG que reside en el Sistema de Información de Tiempo Real para la Administración y Control de la Energía (SITRACEN) [26].

4.4.1 CONTROL AUTOMÁTICO DE LA GENERACIÓN EN UN SISTEMA AISLADO

En un sistema eléctrico aislado no es necesario mantener los flujos de potencia programados con ningún área vecina, por lo que la única función del control secundario es restaurar la frecuencia de referencia. Esto puede conseguirse añadiendo una acción de control suplementaria sobre la frecuencia en, al menos, uno de los generadores del sistema. Ante cualquier variación de carga la regulación secundaria es más lenta que la regulación primaria, por lo que puede considerarse que actúa una vez que ésta se ha estabilizado. Al devolver la frecuencia del sistema a su valor de referencia (60 Hz), la regulación secundaria restaura automáticamente la generación de todas las plantas que únicamente participan en la regulación primaria [8].

El control secundario debe realizarse de forma centralizada. En caso contrario los generadores competirán entre sí para alcanzar la frecuencia de referencia y el sistema de control será inestable [8]. Por lo tanto, existe un único lazo de regulación, situado en el CENAL, que mide la frecuencia, y que emite a todas las unidades que participan en la regulación secundaria las consignas de ajuste de generación.



CAPÍTULO 5

MODELO DEL AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D.

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el modelo del aerogenerador de velocidad variable tipo D, en el cual se presentan las variables de estado de todos los elementos que conforman el modelo, así como las variables de estado para los controladores del convertidor de potencia de escala completa.

También se presentan los sistemas de control de potencia activa y potencia reactiva, los cuales emplean una estrategia proporcional e integral (PI).

5.2 MODELO DEL AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D

En la sección 3.2 se describe de forma general la clasificación de los aerogeneradores, donde se muestra el aerogenerador tipo D1 que se modela en este trabajo de investigación. Como se puede observar en la Figura 5.1 el aerogenerador de velocidad variable incorpora una turbina eólica acoplada a un GIRD por medio de una caja multiplicadora, un convertidor de potencia de escala completa en serie para el control de potencia activa y factor de potencia, conectado a un bus infinito y al generador de inducción.

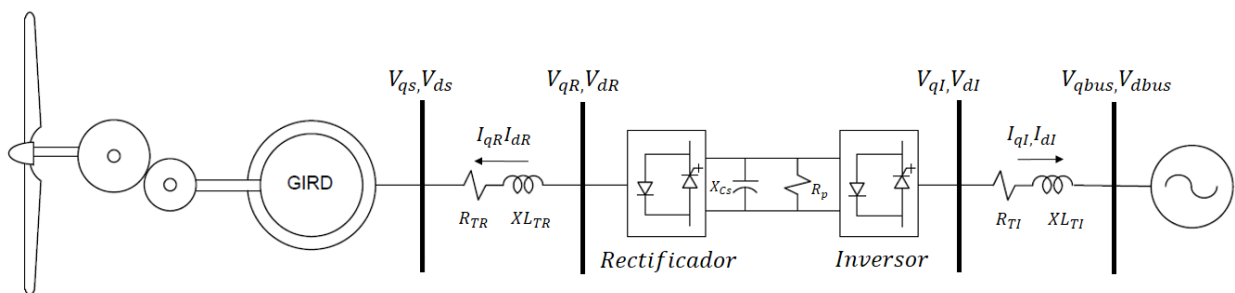


FIGURA 5.1 AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE TIPO D



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

El modelo del GIRD corresponde al modelo reducido reportado en la Sección 3.3.1.1, en el cual se desarrollan las variables de estado que lo describen, las cuales son las correspondientes a las componentes q y d de los enlaces de flujo en el rotor ψ'_{qr} y ψ'_{dr} dadas por las ecuaciones (3.40) y (3.41), en el marco de referencia rotatorio síncrono. El acoplamiento mecánico turbina-generator corresponde al modelo de dos masas reportado en la Sección 3.4.2, el cual proporciona las ecuaciones diferenciales de la velocidad del generador ω_g y de la velocidad de la turbina ω_{tur} , dadas por las ecuaciones (3.71) y (3.66), respectivamente. El modelo correspondiente al convertidor de potencia en configuración *back to back* es un modelo de quinto orden en el marco de referencia $qd0$ y las ecuaciones diferenciales que los describen son las componentes q y d de la corriente del rectificador I_{qR} e I_{dR} , el voltaje en el capacitor V_{CD} y las componentes q y d de la corriente del inversor I_{qI} e I_{dI} , las cuales se describen en la Sección 3.6.

Se plantea un sistema de control el cual incorpora controladores PI para realizar el ajuste de potencia activa y factor de potencia, ajustando los ángulos de disparo de los elementos de conmutación del convertidor lado máquina para la potencia activa y del convertidor lado sistema para el factor de potencia

A continuación, se presentan el conjunto de ecuaciones diferenciales que describen al modelo del Aerogenerador de Velocidad Variable tipo D,

$$\frac{d\psi'_{qr}}{dt} = \omega_b \left(V'_{qr} - r'_r I'_{qr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_g}{\omega_b} \right) \psi'_{dr} \right) \quad (5.1)$$

$$\frac{d\psi'_{dr}}{dt} = \omega_b \left(V'_{dr} - r'_r I'_{dr} - \left(\frac{\omega_e - \omega_g}{\omega_b} \right) \psi'_{qr} \right) \quad (5.2)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\frac{d\omega_g}{dt} = \frac{\frac{-T_m}{a_{gbx}} + T_e}{\frac{J_g \omega_{b,hs}^2}{P_b} + \frac{J_{tur} \omega_{b,ls}^2}{P_b a_{gbx}^2}} \quad (5.3)$$

$$\frac{d\omega_{tur}}{dt} = \frac{-T_m + a_{gbx} T_e}{\frac{J_{tur} \omega_{b,ls}^2}{P_b} + \frac{J_g a_{gbx}^2 \omega_{b,hs}^2}{P_b}} \quad (5.4)$$

$$\frac{dI_{qR}}{dt} = -\frac{R_{TR}}{X_{TR}} \omega I_{qR} - \omega I_{dR} + \frac{\omega K_R}{X_{TR}} \cos(\alpha_R) V_{CD} - \frac{\omega}{X_{TR}} V_{qbus} \quad (5.5)$$

$$\frac{dI_{dR}}{dt} = \omega I_{qR} - \frac{R_{TR}}{X_{TR}} \omega I_{dR} - \frac{\omega K_R}{X_{TR}} \sin(\alpha_R) V_{CD} + \frac{\omega}{X_{TR}} V_{dbus} \quad (5.6)$$

$$\frac{dV_{CDqdo}}{dt} = -M_{kR} \cos(\alpha_R) I_{qR} + M_{kR} \sin(\alpha_R) I_{dR} - M_{kI} \cos(\alpha_I) I_{qs} + M_{kI} \sin(\alpha_I) I_{ds} - \frac{X_{cs} \omega V_{CD}}{R_p} \quad (5.7)$$

$$\frac{dI_{qI}}{dt} = -\frac{R_{TI}}{X_{TI}} \omega I_{qI} - \omega I_{dI} + \frac{\omega K_I}{X_{TI}} \cos(\alpha_I) V_{CD} - \frac{\omega}{X_{TI}} V_{qs} \quad (5.8)$$

$$\frac{dI_{dI}}{dt} = \omega I_{qI} - \frac{R_{TI}}{X_{TI}} \omega I_{dI} - \frac{\omega K_I}{X_{TI}} \sin(\alpha_I) V_{CD} + \frac{\omega}{X_{TI}} V_{ds} \quad (5.9)$$

$$\frac{du}{dt} = P_{ref} - P_s \quad (5.10)$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$\frac{dv}{dt} = Q_{ref} - Q_s \quad (5.11)$$

Las ecuaciones 5.10 y 5.11 corresponden al sistema de control de potencia activa y factor de potencia que se describen en la sección 5.3.

Las componentes de q y d del voltaje en terminales del rectificador y del inversor están dadas por las siguientes ecuaciones,

$$V_{qR} = K_R \cos(\alpha_R) V_{CD} \quad (5.12)$$

$$V_{dR} = -K_R \sin(\alpha_R) V_{CD} \quad (5.13)$$

$$V_{qI} = K_I \cos(\alpha_I) V_{CD} \quad (5.14)$$

$$V_{dI} = -K_I \sin(\alpha_I) V_{CD} \quad (5.15)$$

Para calcular el voltaje de cuadratura y directa en terminales del estator V_{qs}, V_{ds} , se aplica la Ley de Voltajes de Kirchhoff en el transformador lado maquina como sigue,

$$-(V_{qR}, V_{dR}) + (V_{qTR}, V_{dTR}) + (V_{qs}, V_{ds}) = 0 \quad (5.16)$$

Separando las componentes en cuadratura y directa y desarrollando los términos del voltaje en el transformador del inversor, se obtienen las siguientes expresiones,



$$V_{ds} + jV_{qs} = - (I_{dR} + jI_{qR})(R_{TR} + jX_{TR}) + (V_{qR}, V_{dR}) \quad (5.17)$$

$$V_{qs} = - X_{TR}I_{dR} - R_{TR}I_{qR} + V_{qR} \quad (5.18)$$

$$V_{ds} = - R_{TR}I_{dR} + X_{TR}I_{qR} + V_{dR} \quad (5.19)$$

Con el desarrollo de las ecuaciones anteriores, se puede observar, que el modelo del aerogenerador de velocidad variable tipo D está compuesto por medio de un conjunto de ecuaciones diferenciales ($n = 5$) y otro de ecuaciones algebraicas ($a = 4$), los cuales interactúan entre sí para poder simular el sistema en el dominio del tiempo.

5.3 SISTEMA DE CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y FP DEL AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE

En esta sección se presenta el sistema de control de potencia activa y factor de potencia FP para el aerogenerador de velocidad variable tipo D desarrollado en esta tesis. El control de potencia activa se realiza por medio de un control para el ángulo de disparo de los elementos de conmutación del rectificador del convertidor.

Para el control de factor de potencia se utiliza un control para el ángulo de disparo de los elementos de conmutación del inversor del convertidor.

Los dos controladores emplean una estrategia proporcional e integral (PI), en donde los valores de referencia de potencia activa y de potencia reactiva son comparados con los valores obtenidos a cada instante de tiempo. También se presentan las técnicas de sintonización utilizadas para calcular las constantes K_p y K_i correspondientes a cada controlador PI [14].



5.3.1 SISTEMA DE CONTROL DE POTENCIA ACTIVA POR MEDIO DEL ÁNGULO DE DISPARO DEL RECTIFICADOR α_I

El control de potencia activa incorporado en el aerogenerador tipo D es regulado por medio del convertidor de potencia que opera como rectificador, el cual utiliza un controlador *PI*. El objetivo de este controlador es controlar el ángulo de disparo de los elementos de conmutación del rectificador α_R .

En la figura 5.2 se ilustra la estructura del controlador *PI* del convertidor que opera como rectificador, en la cual se observa el cálculo de la señal de error por medio de una diferencia entre la potencia activa de referencia P_{ref} y la potencia activa generada P_s . El valor del error calculado ajusta el valor de la variable a controlar α_R en cada instante de tiempo hasta que llega a un valor constante cuando el error es igual a cero.

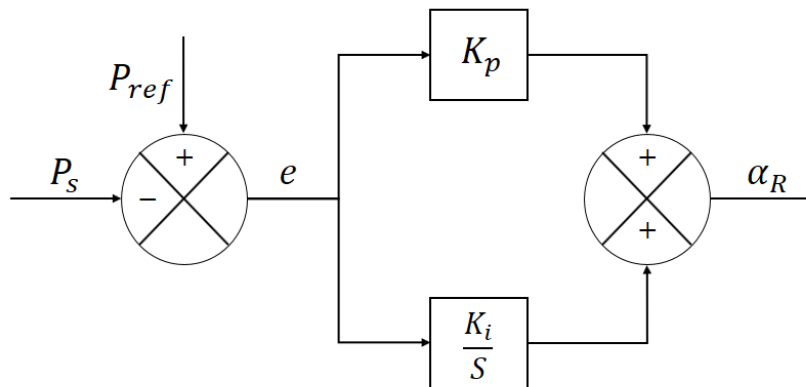


FIGURA 5.2 SISTEMA DE CONTROL PARA EL ÁNGULO DE DISPARO DEL RECTIFICADOR α_R

Las ecuaciones de las variables de estado que representan el controlador mostrado en la figura 5.2 para el ángulo de disparo del rectificador α_R se describen a continuación,

$$\frac{du}{dt} = P_{ref} - P_s \quad (5.20)$$



$$\alpha_R = K_p(P_{ref} - P_s) + K_i u \quad (5.21)$$

5.3.1.1 SINTONIZACIÓN DE LAS GANANCIAS DEL CONTROLADOR PI PARA EL ÁNGULO α_R .

Para realizar la sintonización de las ganancias del controlador PI para el ángulo α_R se utiliza la primera regla de Ziegler-Nichols [27], la cual se basa en el análisis de la respuesta del sistema a una entrada escalón.

Para obtener la respuesta al escalón del aerogenerador se aplica un escalón al valor del ángulo α_R en un instante de tiempo determinado cuando el sistema ha alcanzado un valor de estado estable con un valor inicial de α_R . En la figura 5.3 se ilustra la respuesta del sistema ante una entrada escalón, al momento de modificar el ángulo de disparo de los elementos de conmutación de α_R , se observa que el valor del estado estable anterior para la potencia de salida es de -0.45 y el nuevo valor de estado estable es de -0.08, con estos valores se realiza gráficamente el cálculo de las ganancias proporcional e integral.

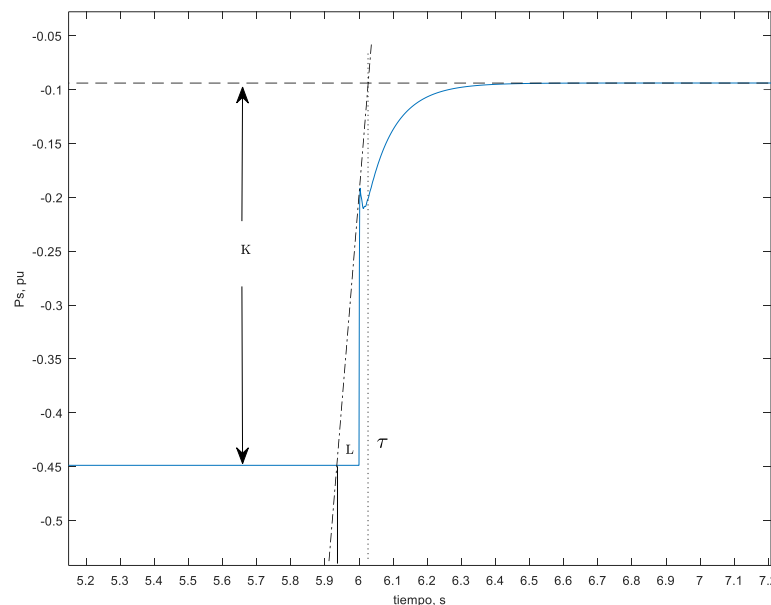


FIGURA 5.3 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL AEROGENERADOR (α_R)



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

La respuesta al escalón obtenida para el controlador de la potencia activa por medio de α_R presenta un comportamiento de un sistema de primer orden como se observa en la Figura 5.3, por lo que se puede utilizar la técnica de sintonización de Ziegler-Nichols para la sintonización de las ganancias. Para realizar tal sintonización se necesita calcular los valores de las constantes K, L y τ , los cuales representan la ganancia del valor en estado estable de la variable a controlar, el tiempo de retardo y la constante de tiempo, respectivamente [27].

Los valores anteriores se determinan gráficamente trazando una línea horizontal donde indique el nuevo valor de estado estable (línea segmentada), trazando una línea tangente a la curva (línea punto-segmento) y una línea vertical en el punto de intersección de las dos anteriores (línea punteada). Los valores de K, L y τ se obtienen midiendo manualmente sus magnitudes en la gráfica. La combinación de estas tres líneas aproxima la respuesta al escalón obtenida a un comportamiento ideal de un sistema de primer orden.

Las ganancias del controlador PI , K_p y K_i se calculan mediante las siguientes ecuaciones establecidas para esta técnica de sintonización,

$$K_p = \frac{0.9}{R_{pi}L} \quad (5.22)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (5.23)$$

Donde,

$$R_{pi} = \frac{K}{\tau} \quad (5.24)$$



$$T_i = \frac{L}{0.3} \quad (5.25)$$

5.3.2 SISTEMA DE CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA POR MEDIO DEL ÁNGULO DE DISPARO DEL INVERSOR α_I

El control de factor de potencia incorporado en el aerogenerador tipo D es regulado por medio del convertidor de potencia que opera como inversor, el cual, utiliza un controlador *PI*. El objetivo de este controlador es controlar el ángulo de disparo de los elementos de conmutación del inversor α_I .

En la figura 5.4 se ilustra la estructura del controlador *PI* del convertidor que opera como inversor, en la cual se observa el cálculo de la señal de error por medio de una diferencia entre la potencia reactiva de referencia Q_{ref} y la potencia reactiva generada Q_s . El valor del error calculado ajusta el valor de la variable a controlar α_I en cada instante de tiempo hasta que llega a un valor constante cuando el error es igual a cero.

Las ecuaciones de las variables de estado que representan el controlador mostrado en la figura 5.4 para el ángulo de disparo del inversor α_I se describen a continuación,

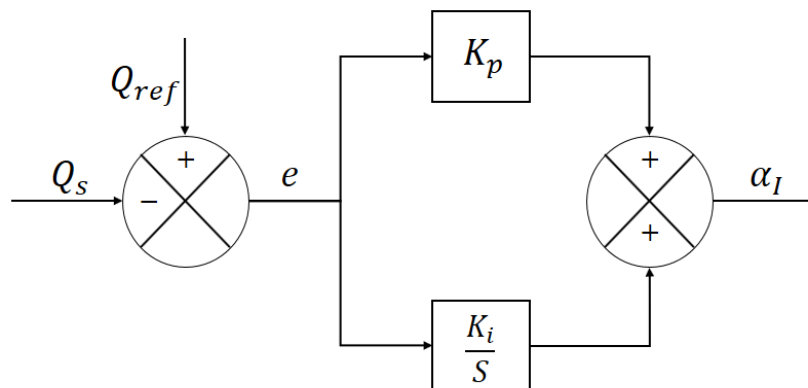


FIGURA 5.4 SISTEMA DE CONTROL PARA EL ÁNGULO DE DISPARO DEL INVERSOR α_I



$$\frac{dv}{dt} = Q_{ref} - Q_s \quad (5.26)$$

$$\alpha_I = K_p(Q_{ref} - Q_s) + K_i v \quad (5.26)$$

5.3.2.1 SINTONIZACIÓN DE LAS GANANCIAS DEL CONTROLADOR PI PARA EL ÁNGULO α_I .

Para realizar la sintonización de las ganancias del controlador PI para el ángulo α_I se utiliza la primera regla de Ziegler-Nichols [27], la cual se basa en el análisis de la respuesta del sistema a una entrada escalón.

Para obtener la respuesta al escalón del aerogenerador se aplica un escalón al valor del ángulo α_I en un instante de tiempo determinado cuando el sistema ha alcanzado un valor de estado estable con un valor inicial de α_I . En la figura 5.5 se ilustra la respuesta del sistema ante una entrada escalón, al momento de modificar el ángulo de disparo de los elementos de conmutación α_I , se observa que el valor del estado estable anterior para la potencia reactiva de salida es de 14.25 y el nuevo valor de estado estable es de 19.2, con estos valores se realiza gráficamente el cálculo de las ganancias proporcional e integral.

La respuesta al escalón obtenida para el controlador de la potencia reactiva presenta un comportamiento de un sistema de primer orden como se observa en la Figura 5.5, por lo que se puede utilizar la técnica de sintonización de Ziegler-Nichols para la sintonización de las ganancias. La sintonización del controlador del factor de potencia se realiza de la misma forma que la sintonización del controlador de potencia activa reportado en la sección 5.3.1.1.

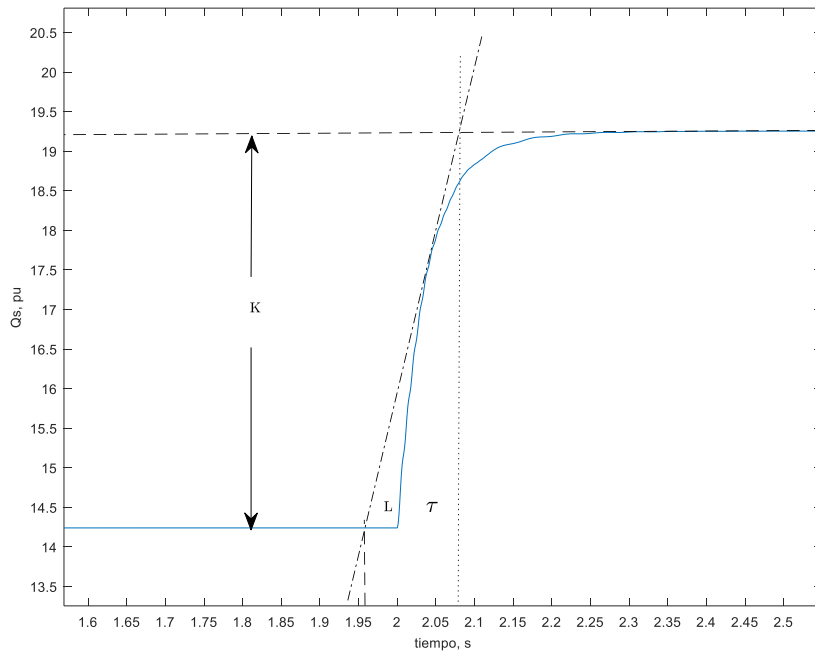


FIGURA 5.5 RESPUESTA AL ESCALÓN DEL AEROGENERADOR (α_1)



CAPÍTULO 6

CASOS DE ESTUDIO.

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los casos de estudio propuestos con el modelo del aerogenerador tipo D, los cuales consisten en modificar distintas variables de los elementos que componen el modelo para crear pequeñas perturbaciones y observar cómo se comportan las variables de estado, la respuesta que tiene el sistema y el comportamiento dinámico y de estado estable del aerogenerador, mismo que se obtiene utilizando el método numérico de *Runge-Kuta* de cuarto orden. Las simulaciones se realizan considerando un paso de integración de $h = 0.001s$ y una tolerancia establecida de $Tol = 1e - 10$ para determinar el punto de equilibrio de estado estable. Para proponer los casos de estudio se parte de las pruebas operativas que realiza el CENACE a las centrales eólicas, para validar que cumplan con los requerimientos mínimos establecidos en [28]. Estas pruebas consisten en el envío de consignas de limitación de potencia activa y envío de consignas de factor de potencia a la central eólica o térmica, para observar el tiempo de respuesta de la central y el cumplimiento de la consigna.

El protocolo de pruebas proporcionado por el CENACE en [29] indica que en primera instancia se debe verificar la disponibilidad del 100 % de los aerogeneradores que constituyen el parque eólico, posteriormente se debe verificar y confirmar que durante el periodo de realización de las pruebas que al menos se puede contar con el 50 % de generación respecto de la capacidad nominal del parque eólico. La prueba consiste en enviar consignas de potencia activa en MW desde la GCROR verificando un retroaviso recibido en la GCROR y corroborando que la potencia entregada en el punto de interconexión sea menor o igual a la consigna enviada en un tiempo máximo de 20 segundos. Los pasos anteriores se repiten con distintos valores de consignas para validar el correcto funcionamiento del parque eólico en la evaluación. Las pruebas de consignas de factor de potencia se realizan tomando en cuenta los mismos criterios que en las pruebas de consignas de potencia activa, solo que lógicamente, las consignas que



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

se envían son de factor de potencia. Si las pruebas anteriores son satisfactorias la central eólica puede declararse en operación normal o comercial. Estas pruebas no solo se realizan en la puesta en servicio del parque, si no también cuando se detecta que el parque eólico tiene problemas para seguir alguna consigna, o bien, también se realizan de forma periódica para confirmar el correcto funcionamiento de los parques eólicos después de mantenimientos programados a los sistemas de control y de comunicación.

Los parámetros de la turbina eólica, el generador de inducción, los transformadores y el convertidor de potencia de escala completa se reportan en el apéndice A y fueron proporcionados por la GCROR (Gerencia de Control Regional Oriental). El tipo de aerogenerador que se emplea para las simulaciones es de 850 kW de capacidad. Las simulaciones de todos los casos de estudio se realizaron con una versión estudiantil del *software* Matlab, empleando el método de Runge-Kutta de cuarto orden para la solución de las ecuaciones algebraicas y diferenciales.

6.2 REPRESENTACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL AEROGENERADOR TIPO D DENTRO DEL CAG.

En esta sección se presenta la operación dinámica y de estado estable del aerogenerador tipo D al realizar el envío de consignas de potencia activa P_{ref} , para representar la operación del aerogenerador tipo D dentro del CAG.

En términos generales el CAG monitorea las variables de potencia activa y frecuencia, con las cuales, ante variaciones de frecuencia le envía consignas de ajuste de potencia a los generadores, para que la frecuencia se restablezca a valores cercanos a los 60 Hz. Para este caso de estudio no se monitorea la frecuencia del sistema y solo se simula el envío de consignas de potencia activa de manera aleatoria, en intervalos de tiempo de 4 segundos.

Las condiciones iniciales de las variables de estado y de los voltajes y corrientes que intervienen en el modelo para este caso de estudio son cero. Se mantiene β constante, debido a que se pretende observar cómo se comporta el modelo con el control de potencia activa por medio del convertidor de potencia de escala completa. La



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

velocidad de viento se toma con un valor constante de 12 m/s y factor de potencia de 0.97 capacitivo.

En la figura 6.1 se muestran los resultados de la simulación al realizar el envío de consignas de potencia activa P_{ref} cada 4 segundos, reportando la solución en el tiempo de la potencia de salida del aerogenerador P_s contra la potencia de referencia P_{ref} . Como se puede observar la respuesta del aerogenerador para alcanzar el nuevo valor de estado estable ante cada consigna de potencia activa, es de aproximadamente dos segundos.

El sistema de control del ángulo de disparo de los elementos de conmutación del rectificador α_R utiliza la potencia de referencia P_{ref} para obtener en cada instante de tiempo el nuevo valor de la potencia de salida P_s , como se describe en la sección 5.3.1.

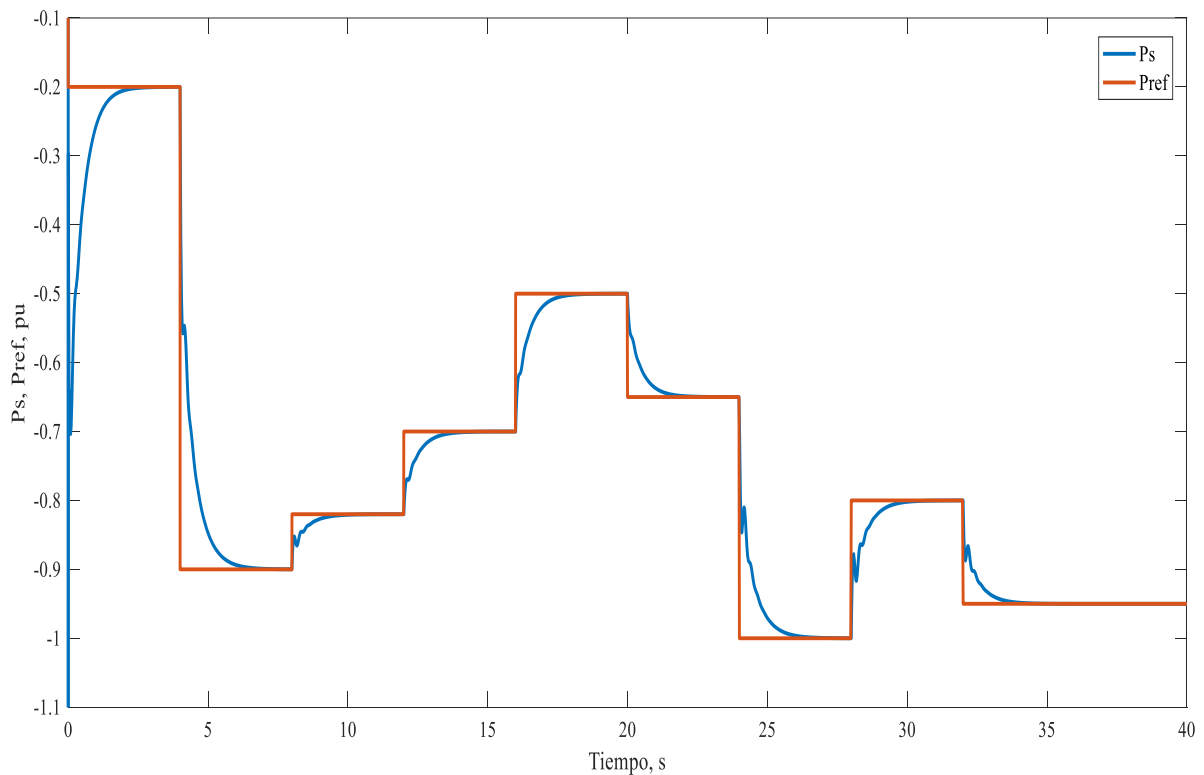


FIGURA 6.1 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE POTENCIA ACTIVA



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

El signo negativo de la potencia de salida del aerogenerador P_s indica que la potencia sale de la máquina de inducción y entra al convertidor de potencia, significa que la potencia es inyectada al sistema. En la figura 6.1 claramente se aprecia que el control implementado es capaz de ajustar la potencia de salida en cualquier rango dentro de los valores nominales del aerogenerador, también se observa que con distintos valores de consignas presenta el mismo patrón de respuesta. Ante escalones menores en la P_{ref} el valor del error al calcular la potencia de salida es menor.

Las soluciones en el tiempo de las variables de estado del modelo del aerogenerador tipo D se muestran en las figuras 6.2 y 6.3.

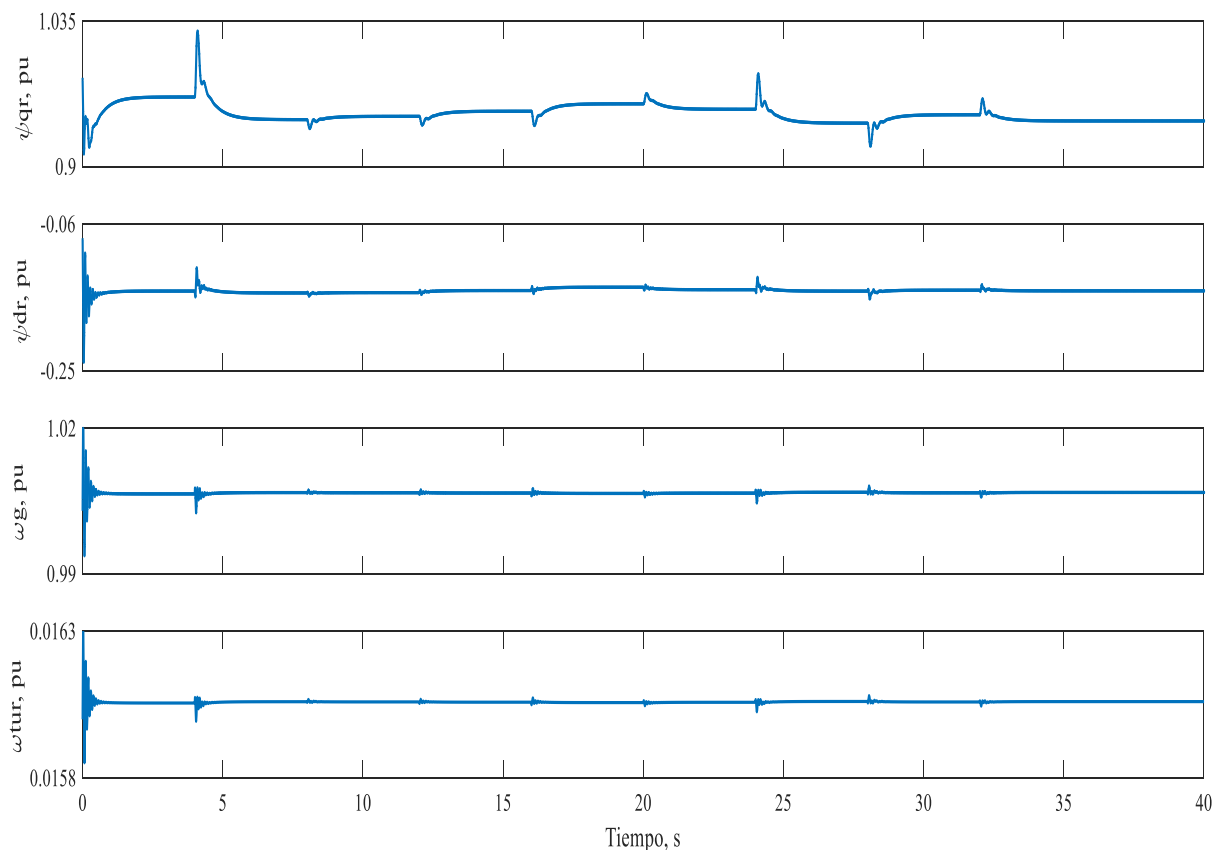


FIGURA 6.2 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABLES DE ESTADO DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN Y LA TURBINA EÓLICA, PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Como se aprecia en la figura 6.2 las variables de estado de la turbina y la máquina de inducción no presentan cambios ante los escalones de potencia de referencia P_{ref} , solo pequeños transitorios. Esto se debe a que las ecuaciones de la turbina y la máquina de inducción no son dependientes de las variables que componen el convertidor de potencia. Los enlaces de cuadratura y directa del rotor ψ_{qr}, ψ_{dr} son dependientes de la corriente y el voltaje de cuadratura y directa del rotor $i_{qr}, i_{dr}, V_{qr}, V_{dr}$. La velocidad del generador y la turbina dependen de los pares mecánicos y electromagnéticos T_m, T_e .

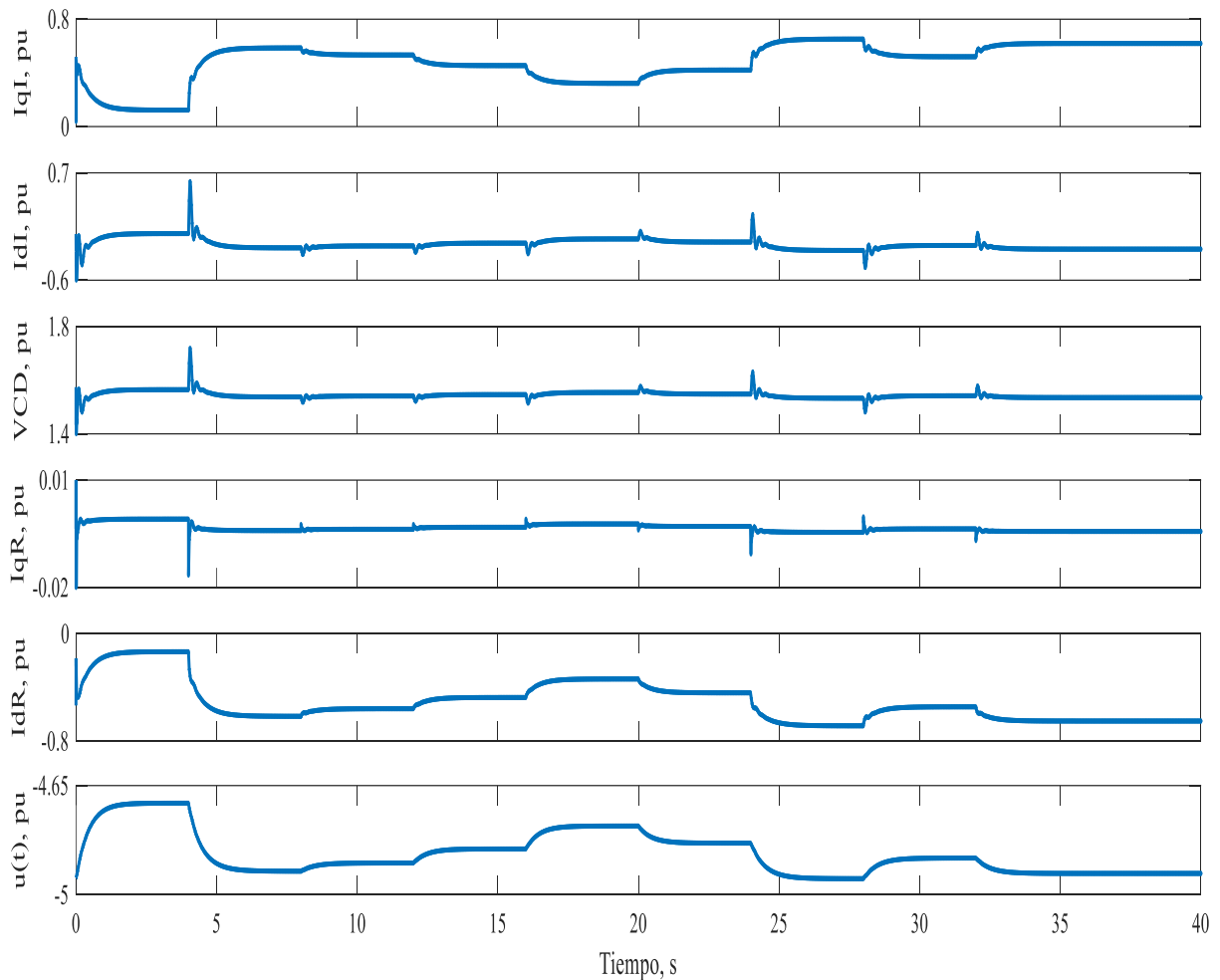


FIGURA 6.3 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABLES DE ESTADO DEL CONVERTIDOR Y DEL CONTROLADOR PI PARA EL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

En la figura 6.3 las variables de estado del convertidor de potencia presentan transitorios considerables ante la simulación de envío de las consignas de potencia activa para representar la operación del aerogenerador tipo D dentro del CAG, esto se debe a que para calcular la potencia de salida en el convertidor lado máquina, se utilizan las corrientes de cuadratura y directa del rectificador I_{qR}, I_{dR} . La gráfica de la corriente de directa del rectificador I_{dR} , presenta el mismo trazo que la variable de estado del controlador PI de potencia activa, debido a que, para el cálculo de la potencia activa, la magnitud de la I_{dR} es mayor que la magnitud de la I_{qR} por tener un factor de potencia + 0.97. Ante valores de factor de potencia cercanos a uno, la potencia reactiva que genere o absorba el convertidor será menor que, si se aplican factor de potencia más alejados al unitario.

La grafica de la corriente de cuadratura del inversor I_{qI} , presenta un trazo simétricamente invertido al de la I_{dR} , la simetría corresponde al comportamiento normal del convertidor de potencia, es decir, corresponde al planteamiento matemático y la convención de signos de los sentidos de las corrientes.

En la figura 6.4 se muestra la gráfica de la potencia reactiva de salida Q_s medida en terminales del convertidor lado sistema, con respecto del tiempo. En el intervalo del segundo 4, que corresponde a una consigna de potencia activa de 0.9 pu, el modelo demanda una potencia reactiva instantánea superior a la unidad, al aportar potencia reactiva al sistema, pero de manera instantánea opera el control de factor de potencia para normalizar el valor calculado con el factor de potencia capacitivo de 0.97, que es de 0.23 pu. El aerogenerador en todo momento se encuentra aportando potencia reactiva, debido al factor de potencia capacitivo, también se observa que el controlador del factor de potencia en todo momento normaliza la potencia reactiva a un valor constante.

En la figura 6.5 se muestra la gráfica del factor de potencia calculado en terminales del convertidor lado sistema. El mayor transitorio es en el primer intervalo de tiempo de 4 segundos donde se observa un valor de factor de potencia de 0.4, pero inmediatamente el control hace que se restablezca a 0.97. Se observa que el convertidor lado sistema responde ante todas las consignas de potencia activa, pero se restablece al valor de



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

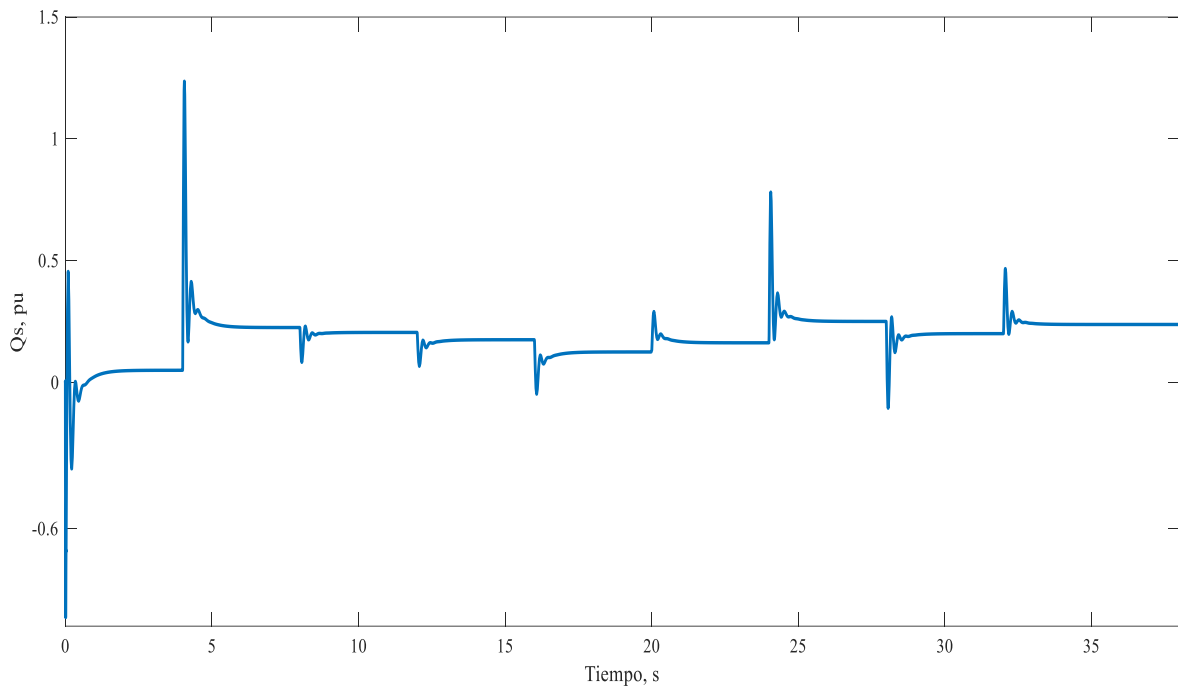


FIGURA 6.4 POTENCIA REACTIVA ANTE CONSIGNAS DE POTENCIA ACTIVA Y FP CONSTANTE

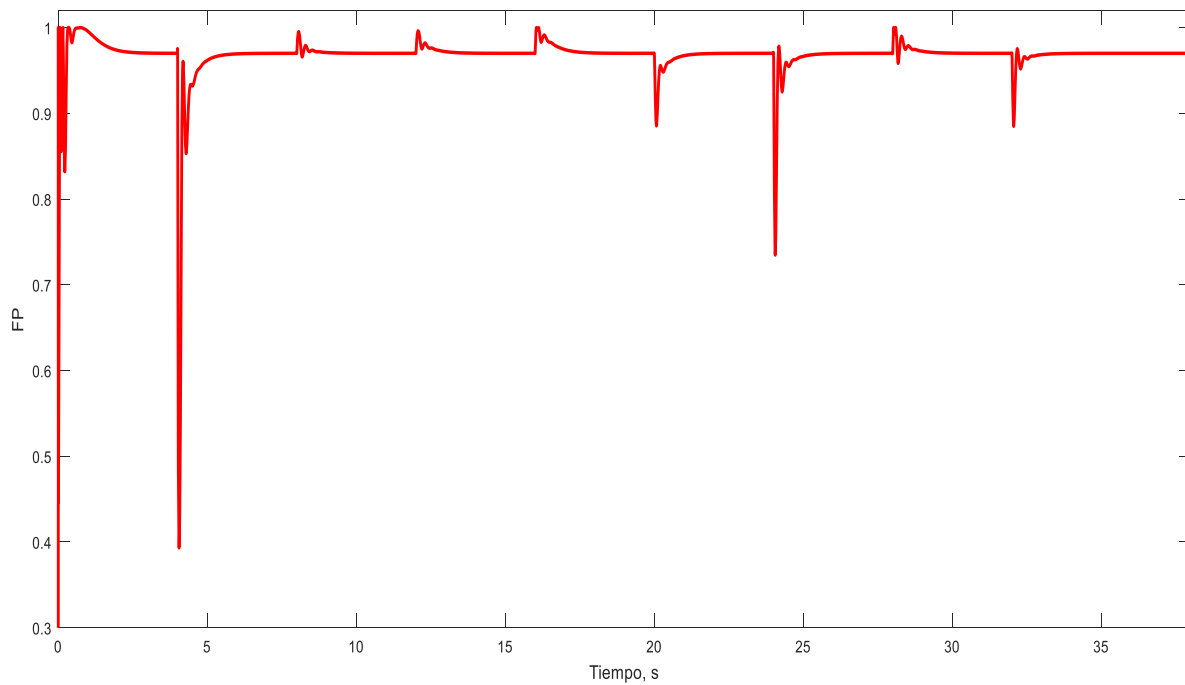


FIGURA 6.5 FP ANTE CONSIGNAS DE POTENCIA ACTIVA



la consigna de factor de potencia constante de 0.97.

En la figura 6.6 se presenta una prueba real de limitación de generación, realizada a un parque eólico instalado en Juchitán por personal de la GCROR. La gráfica muestra los valores de la consigna de potencia activa y los valores reales medidos en el SCADA (Sistema de Control y Adquisición de Datos) de la GCROR.

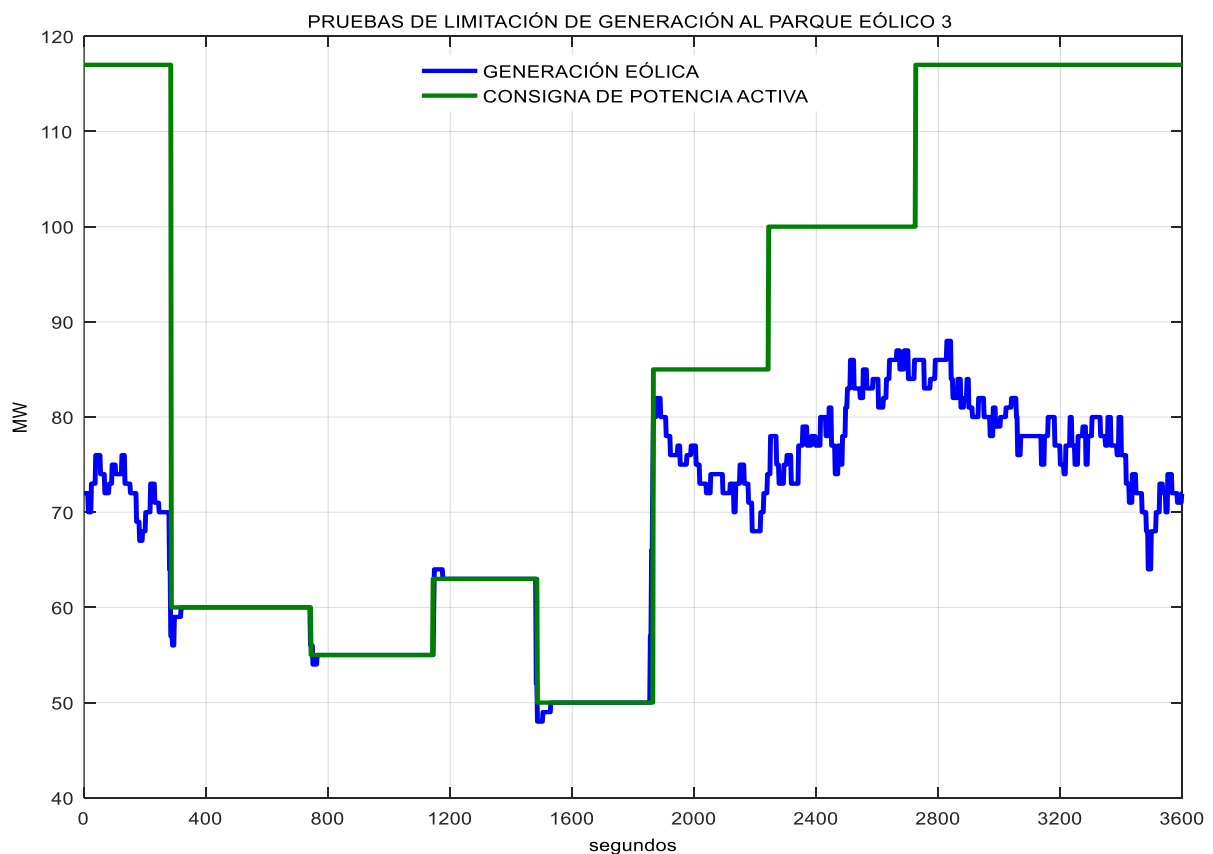


FIGURA 6.6 PRUEBA DE LIMITACIÓN DE GENERACIÓN A PARQUE EÓLICO INSTALADO EN JUCHITÁN

El parque eólico instalado en Juchitán del ámbito de la GCROR presenta una respuesta subamortiguada de segundo orden, distinta a la respuesta del aerogenerador tipo D presentado en esta tesis, pero se observa que la respuesta del parque eólico ante



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

consignas de potencia activa es muy similar a la obtenida con el modelo del aerogenerador tipo D.

Con los resultados obtenidos para el caso de estudio “representación de la operación del aerogenerador tipo d dentro del CAG” se concluye que el aerogenerador tipo D presenta una respuesta favorable ante consignas de potencia activa, muy similares a la respuesta que tiene el parque instalado en Juchitán en el ámbito de la GCROR. El tiempo de la respuesta que tiene el aerogenerador tipo D ante las consignas es de 2 segundos aproximadamente y el control para la potencia activa esta correctamente sintonizado debido a que responde para cualquier valor de potencia de referencia.

El modelo del aerogenerador tipo D se podría utilizar para conectarlo al CAG en el SIN, tomando en cuenta que se tendría que tener limitado el parque eólico donde se instale, para tener un margen para poder subir o bajar generación ante las consignas del CAG. Cabe mencionar que hasta el momento no existe una ley que obligue a las centrales eléctricas que instalen energías renovables, para participar en la regulación primaria y secundaria.

6.3 COMPORTAMIENTO DEL AEROGENERADOR TIPO D ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO CON UNA POTENCIA DE REFERENCIA FIJA

En esta sección se presenta la operación dinámica y de estado estable del aerogenerador tipo D al realizar incrementos en la velocidad del viento y manteniendo la potencia de referencia P_{ref} del aerogenerador constante. Las condiciones iniciales de las variables de estado y de los voltajes y corrientes que intervienen en el modelo para este caso de estudio son cero. Se toma un valor de la potencia de referencia P_{ref} constante de -1, un ángulo de ataque de los álabes β de cero y un factor de potencia capacitivo de 0.97. Los intervalos de velocidad de viento cambian cada dos segundos y van de 8 m/s hasta 17 m/s.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Para obtener las soluciones de la respuesta dinámica y de estado estable se utiliza el método de integración de Runge Kutta de cuarto orden y el software Matlab versión estudiantil.

En la figura 6.7 se muestra la solución en el tiempo para las variables de estado del aerogenerador y la máquina de inducción, al realizar los incrementos en la velocidad de viento y manteniendo el ángulo β , la potencia de referencia P_{ref} y el factor de potencia constantes.

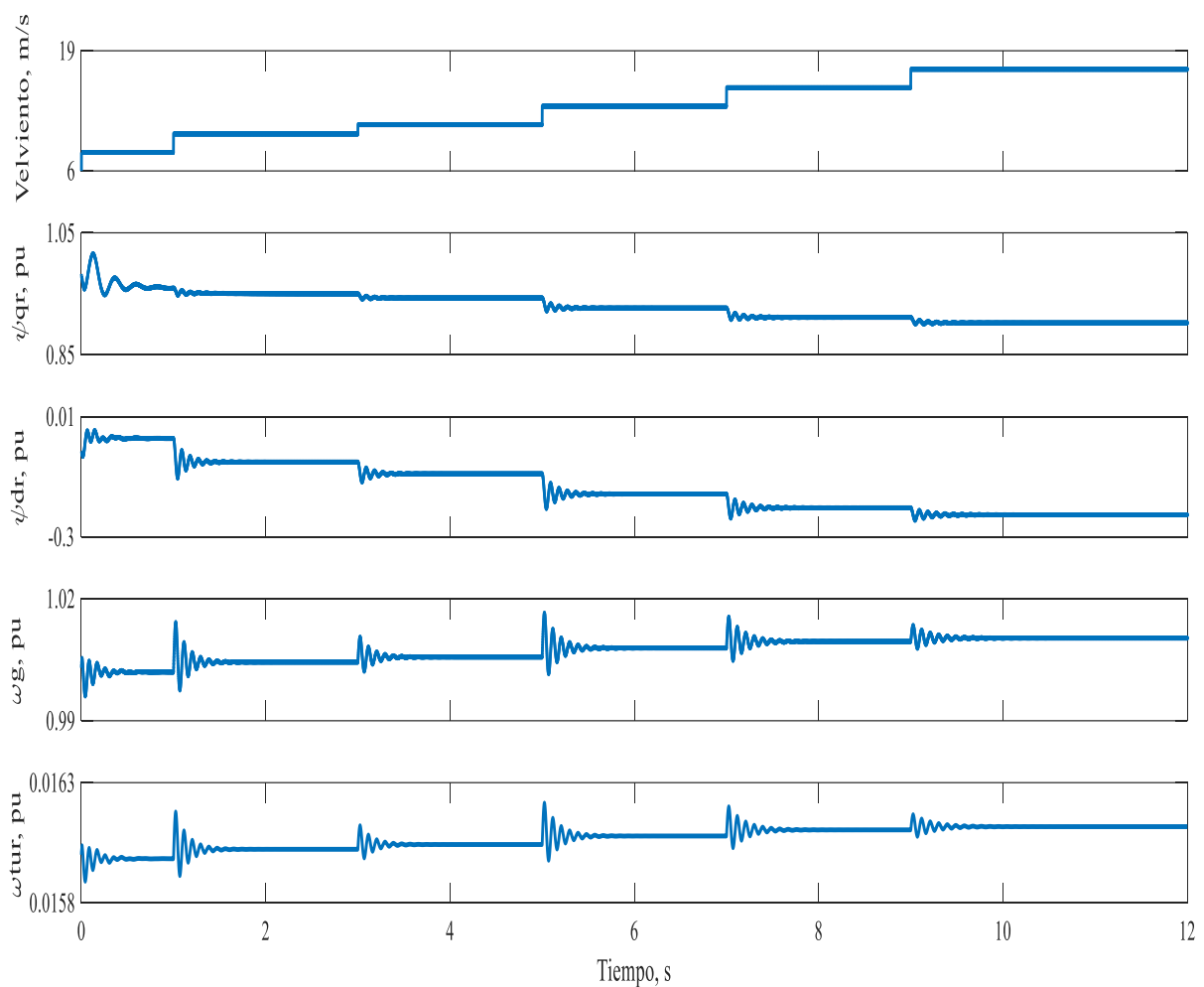


FIGURA 6.7 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABLES DE ESTADO DEL AEROGENERADOR Y LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Como se observa en la figura 6.7 todas las variables de estado de la máquina de inducción y del aerogenerador presentan un transitorio en el mismo intervalo de tiempo que la velocidad de viento, esto indica que, todas las variables de estado de la máquina de inducción y de la turbina eólica dependen de la velocidad de viento.

Debido a que las variables de estado de los ψ_{qr} y ψ_{dr} son dependientes inversamente de la variable de estado ω_g , al incrementar ω_g la magnitud de los enlaces de flujo disminuye, esta relación se muestra en las ecuaciones (5.1) y (5.2). Para el caso de la variable de estado de la velocidad del generador ω_g y la velocidad de la turbina ω_{tur} , dependen directamente de la velocidad de viento, en la figura 6.7 se observa claramente como incrementan las velocidades de la turbina y el generador conforme incrementa la velocidad de viento. Es mayor el incremento de ω_g debido a que tiene una caja de engranajes para modificar la relación de velocidad.

En la figura 6.8 se presenta la solución en el tiempo de las variables de estado del convertidor y el control de potencia activa ante diferentes velocidades de viento, donde se observa que ante cambios en la velocidad de viento no presentan ningún cambio. Esto se debe a que ninguna variable del convertidor de potencia es dependiente de la velocidad de viento y el cálculo de la potencia de salida para el control se calcula con las corrientes del convertidor lado máquina. Al igual que para el cálculo de la potencia reactiva de salida para el control del factor de potencia se calcula con las corrientes del convertidor lado sistema.

Al no presentar cambios de potencia ante incrementos de velocidad se asume que el convertidor está absorbiendo esa energía en forma de calor, al incrementar el flujo de la corriente que pasa a través de él, mismo que se observa en la figura 6.8 en la I_{qI} con un valor de 0.65 pu y la I_{dR} con valor de -0.65 pu.

El voltaje de CD del capacitor del convertidor opera por arriba de su valor nominal con 1.5 pu.

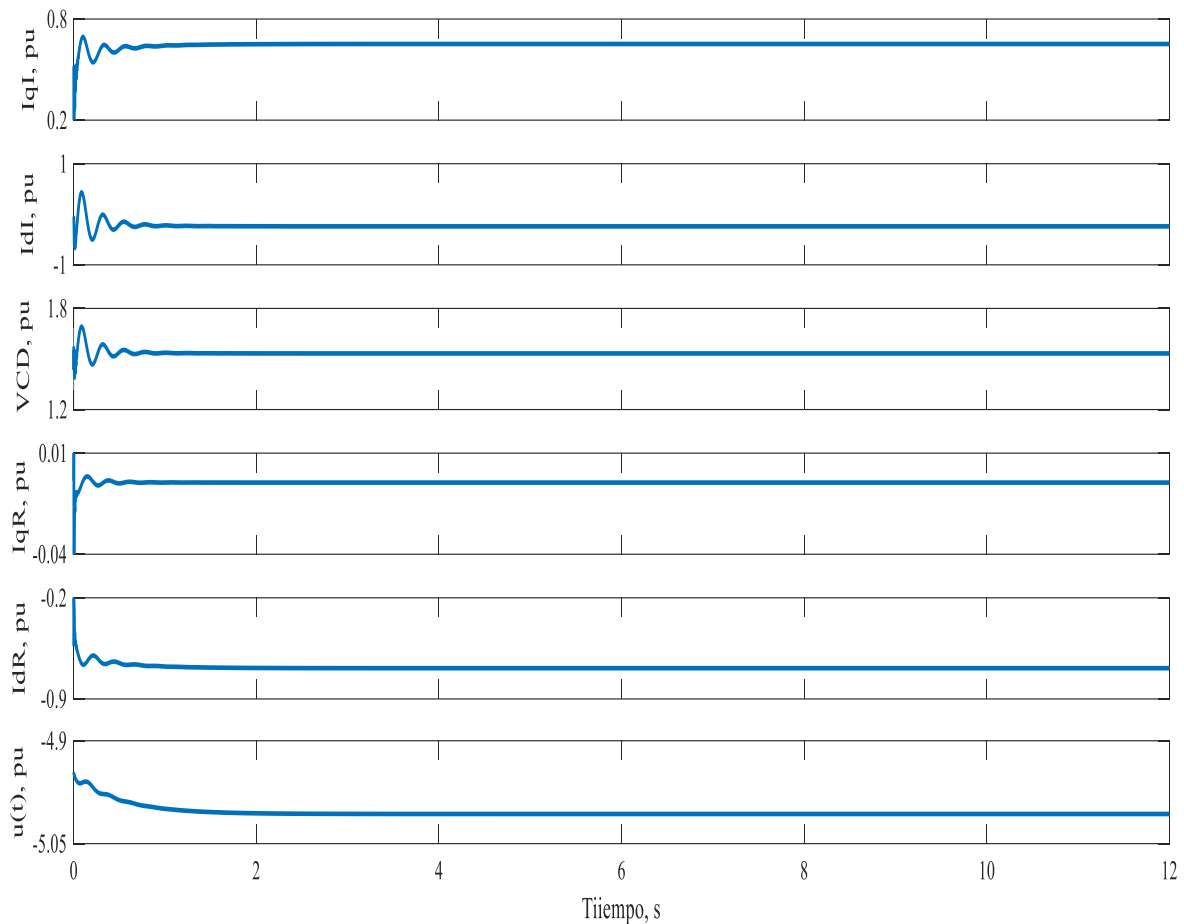


FIGURA 6.8 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABLES DE ESTADO DEL CONVERTIDOR Y EL CONTROL DE POTENCIA ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO

En la figura 6.9 se presenta la gráfica del comportamiento de la potencia activa y potencia reactiva para este caso de estudio, donde se observa que ambos controles operan a los valores establecidos. Las variaciones en la velocidad de viento no alteran los valores de la potencia activa y reactiva.

En la figura 6.10 se presenta la gráfica del comportamiento del factor de potencia y la potencia reactiva. Al igual que en la figura 6.9 no se observan alteraciones en los valores del factor de potencia ante cambios de velocidad de viento debido a que ninguna variable del convertidor de potencia es dependiente de la velocidad de viento.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

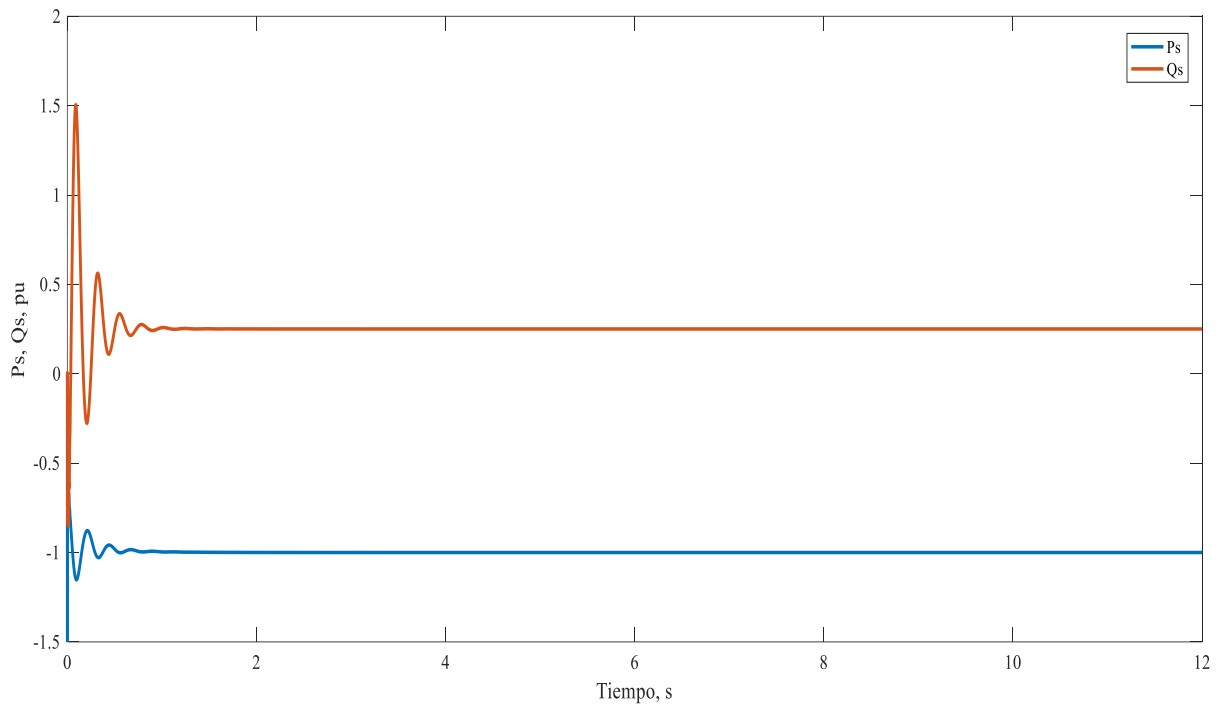


FIGURA 6.9 POTENCIA ACTIVA Y POTENCIA REACTIVA ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO

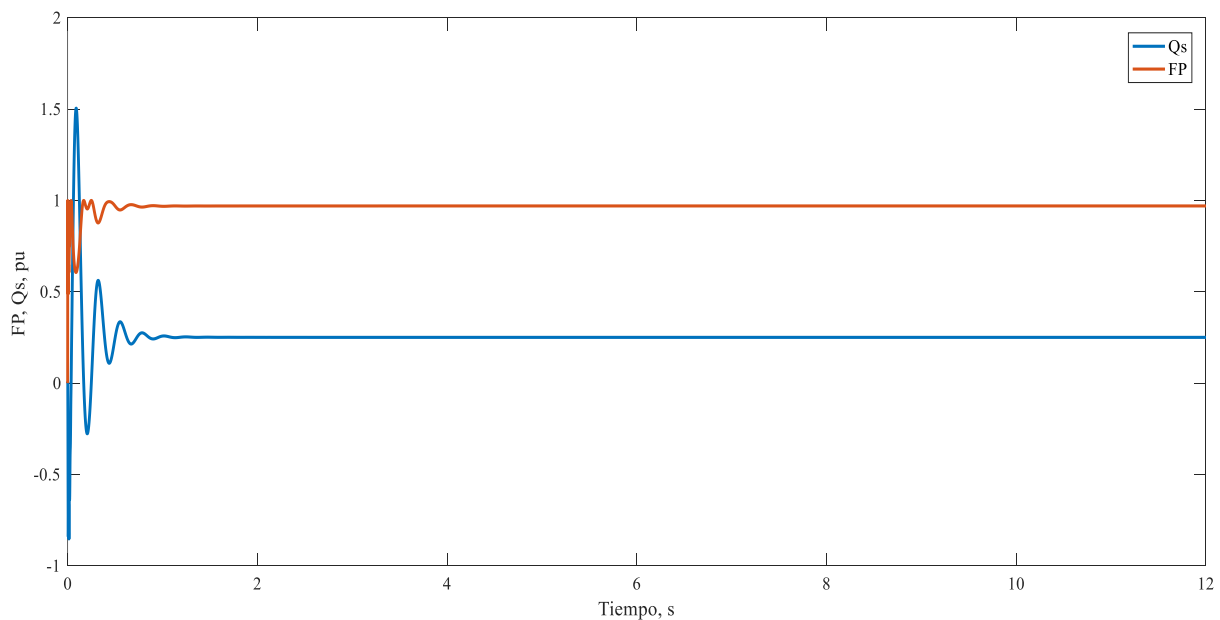


FIGURA 6.10 POTENCIA REACTIVA Y FACTOR DE POTENCIA ANTE DIFERENTES VELOCIDADES DE VIENTO



Para el caso de estudio “Comportamiento del aerogenerador tipo D ante diferentes velocidades de viento con una potencia de referencia fija” se concluye que el convertidor puede controlar de forma constante la potencia activa de salida y el factor de potencia sin importar que se presenten cambios en la velocidad de viento, siempre y cuando se tenga una velocidad superior a 8 m/s. Esta condición de operación no es recomendable debido a que el aerogenerador opera con variables fuera de sus valores nominales como lo es el VCD del capacitor. Al provocar mayor flujo de corriente en el convertidor se provoca calor en los elementos del mismo y se traduce en pérdidas para el sistema y desgaste de los elementos de la electrónica de potencia. Se recomienda que ante de cambios en la velocidad de viento se utilice el control del ángulo β en coordinación con el control de potencia activa por medio del convertidor lado máquina para evitar en la medida de lo posible el desgaste innecesario del aerogenerador tipo D. Esta coordinación de controles es planteada en los trabajos futuros.

6.4 ASIGNACIÓN DE CONSIGNAS DE F.P. PARA CONTROL DE VOLTAJE ANTE UNA P CONSTANTE.

En esta sección se presenta la operación dinámica y de estado estable del aerogenerador tipo D al realizar ajustes en el valor del factor de potencia, manteniendo la potencia de referencia P_{ref} del aerogenerador constante.

Las condiciones iniciales de las variables de estado y de los voltajes y corrientes que intervienen en el modelo para este caso de estudio son cero, se toma un valor de velocidad de viento constante de 12 m/s, ángulo β de cero y P_{ref} de -1 pu. Las consignas de FP se envían cada 4 segundos y de primera instancia se envían consignas capacitivas y posteriormente consignas inductivas.

En la figura 6.11 se muestran los resultados de la simulación al realizar la asignación de consignas de factor de potencia capacitivo. Se reporta la solución en el tiempo del factor de potencia medido en terminales del convertidor lado sistema contra la consigna de factor de potencia. Como se puede observar la respuesta del



aerogenerador a los cambios en el factor de potencia es de aproximadamente dos segundos.

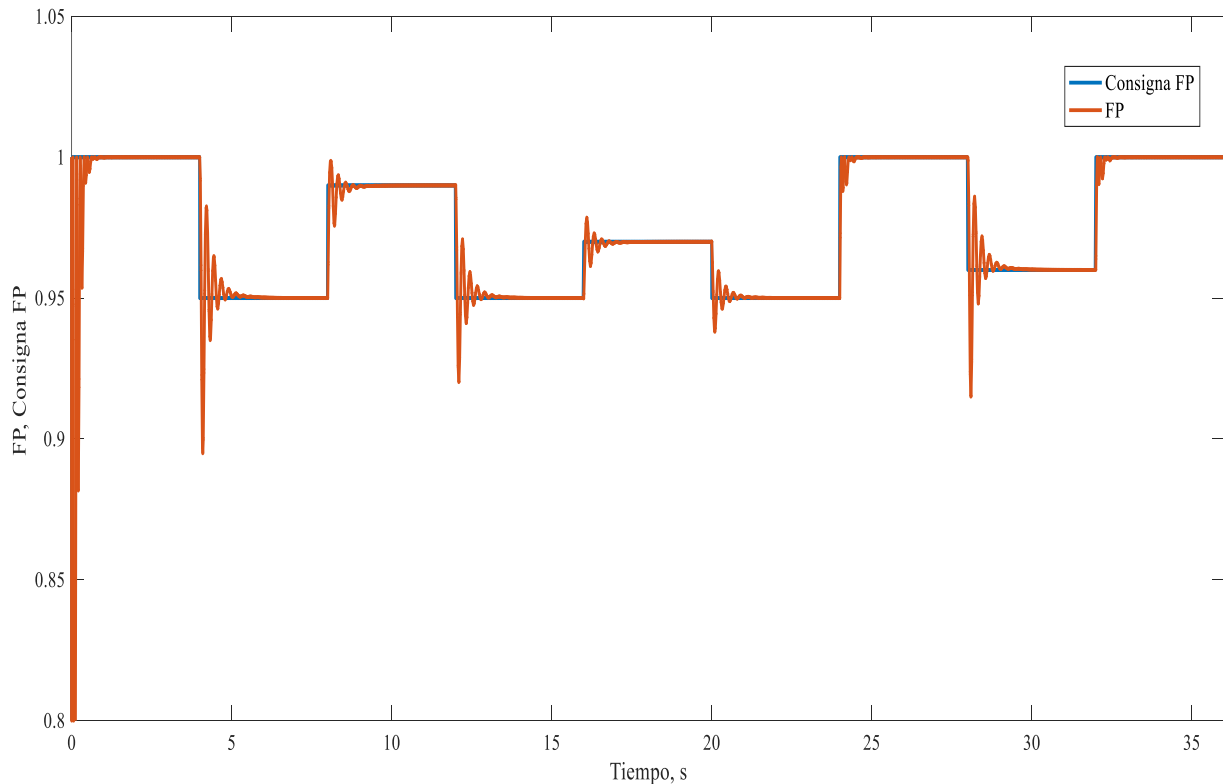


FIGURA 6.11 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA

El sistema de control del ángulo de disparo de los elementos de conmutación del inversor α_1 , utiliza la potencia de reactiva de referencia Q_{ref} para obtener en cada instante de tiempo el nuevo valor de la potencia reactiva de salida Q_s , como se describe en la sección 5.3.2.

En la figura 6.11 se observa que el control implementado es capaz de ajustar el factor de potencia en cualquier rango dentro de los valores nominales del aerogenerador, también se observa que, con distintos valores de consignas, presenta el mismo patrón de respuesta y ante escalones menores en el FP , el valor del error es menor, así como el transitorio. Los valores de consigna de factor de potencia se envían entre la banda de

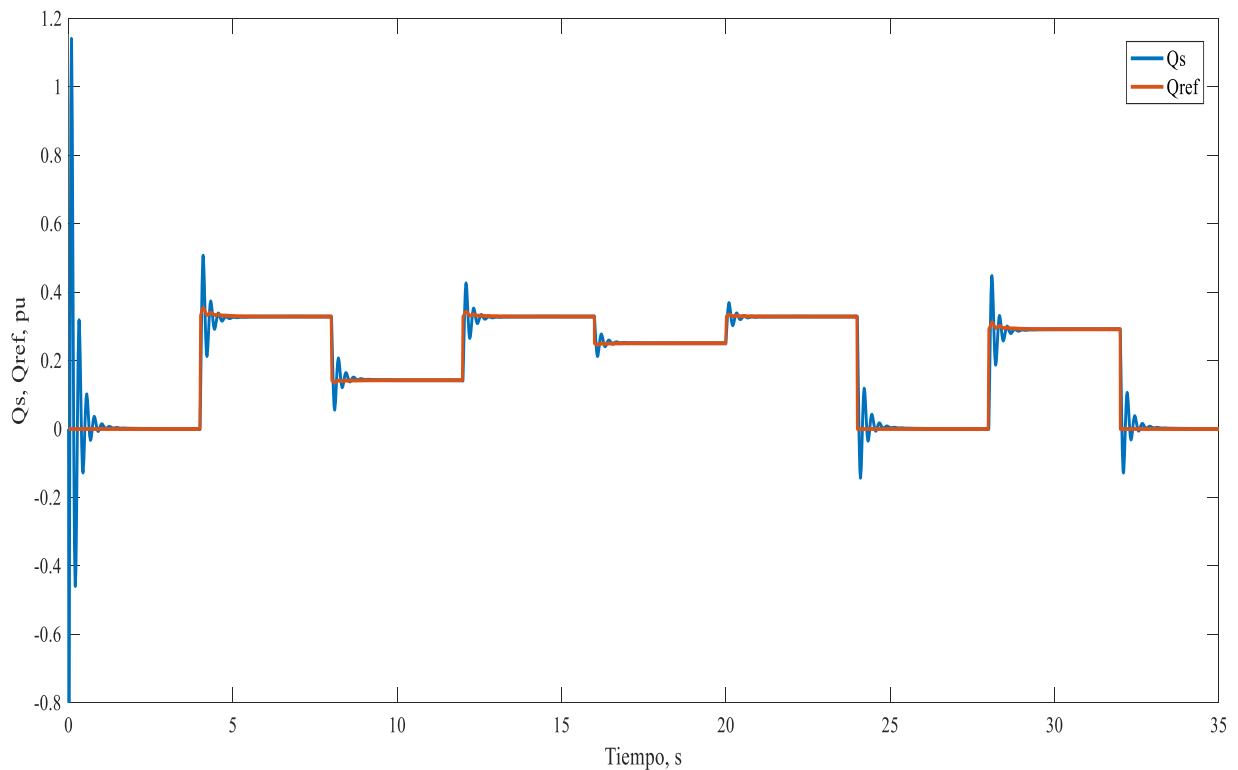


Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

0.95 a 1, debido a que es la banda en la que operan los parques en el ámbito de la GCROR, por cuestiones de diseño de los parques y control de voltaje en el SIN.

En la figura 6.12 se presenta la respuesta del aerogenerador ante consignas de factor potencia, pero ahora realizando el trazo de Q_s contra Q_{ref} , medida en terminales del convertidor lado sistema. Se observa que los valores de Q_s son cero o positivos, debido a que en todos los intervalos de tiempo se envían consignas de FP capacitivo.

En la figura 6.12 el último valor de consigna de FP es unitario y la Q_s calculada es de cero, comprobando que el control del factor de potencia está realizando correctamente su función.



**FIGURA 6.12 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA CAPACITIVO
GRAFICANDO POTENCIA REACTIVA**



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Las soluciones en el tiempo de las variables de estado del modelo del aerogenerador tipo D ante consignas de factor de potencia se muestran en las figuras 6.13 y 6.14.

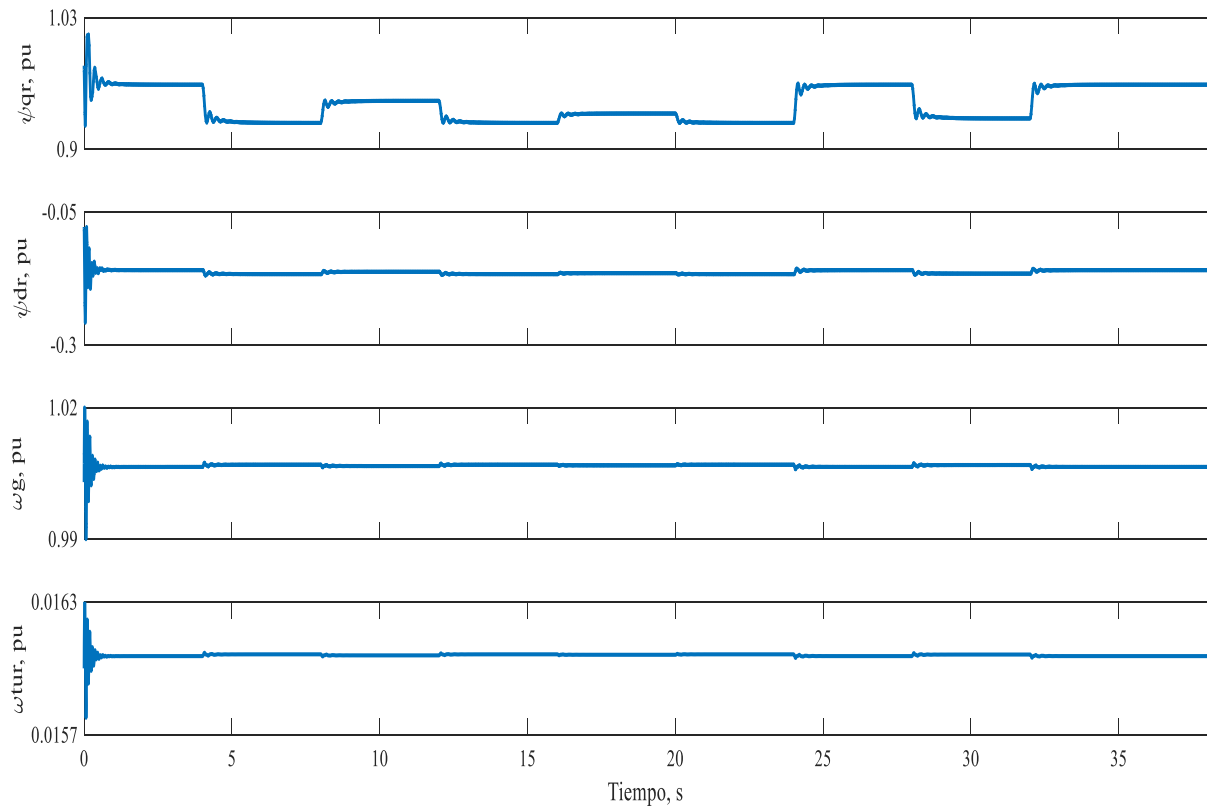


FIGURA 6.13 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABLES DE ESTADO DEL AEROGENERADOR Y LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA.

Como se puede observar en la figura 6.13 la variable de estado ψ_{qr} presenta el mismo seguimiento del factor de potencia y esto se debe a que el voltaje en el convertidor lado sistema le impacta directamente al voltaje en la máquina de inducción.

En la figura 6.14 se presenta la solución en el tiempo para las variables de estado del convertidor ante consignas de factor de potencia.

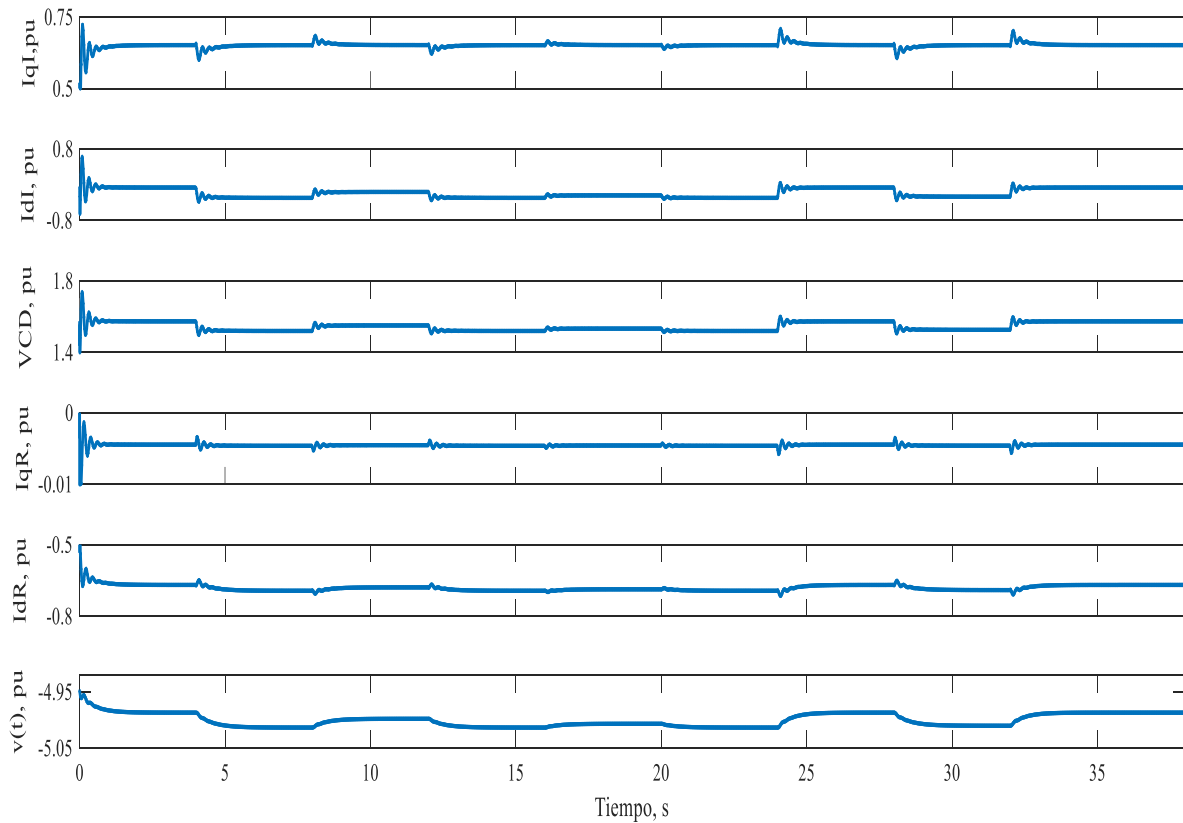


FIGURA 6.14 SOLUCIÓN EN EL TIEMPO PARA LAS VARIABLES DE ESTADO DEL CONVERTIDOR ANTE CONSIGNAS DE FP

Debido a que en el control de factor de potencia intervienen las corrientes del rectificador y el voltaje de cd del convertidor lado sistema I_{qI} , I_{dI} , estas son las variables de estado que se modifican ante las consignas de factor de potencia en todos los intervalos de tiempo.

La grafica de la corriente de directa del rectificador I_{dR} , presenta un trazo simétricamente invertido al de la I_{qI} , la simetría corresponde al comportamiento normal del convertidor de potencia, es decir, corresponde al planteamiento matemático y la convención de signos de los sentidos de las corrientes. La I_{dR} también presenta ajustes



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

con respecto a las consignas de factor de potencia y esto se debe a que al mover voltaje en el convertidor lado sistema también se modifica el valor de esta corriente.

En la figura 6.15 se muestran los resultados de la simulación al realizar la asignación de consignas de factor de potencia inductivo. Se reporta la solución en el tiempo del factor de potencia medido en terminales del convertidor lado sistema contra la consigna de factor de potencia. Como se puede observar la respuesta del aerogenerador a los cambios en el factor de potencia es de aproximadamente dos segundos.

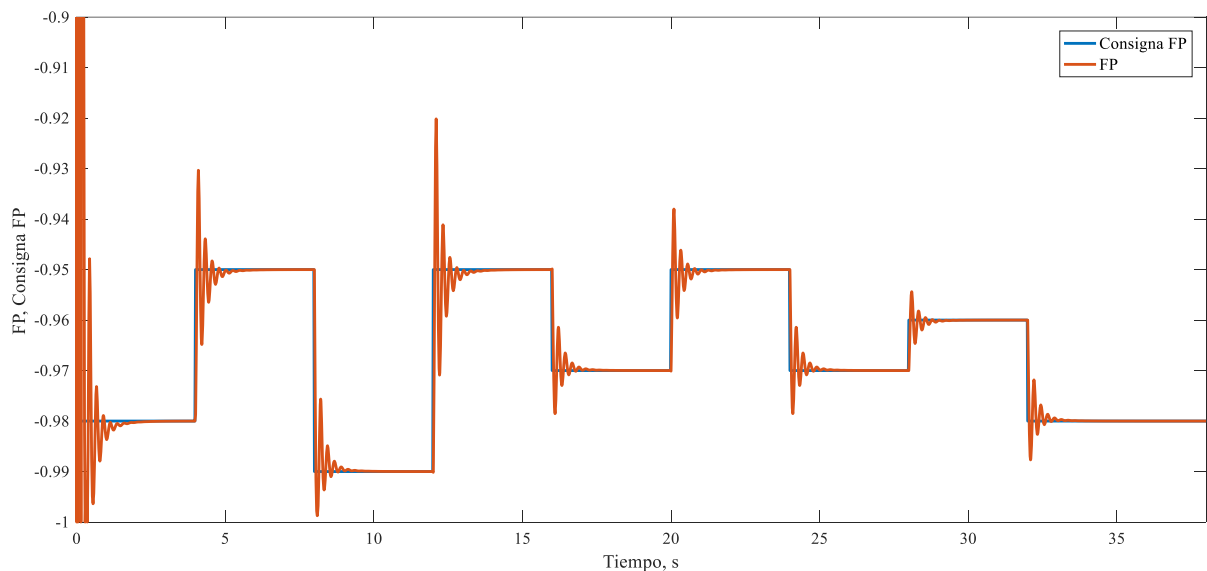


FIGURA 6.15 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA INDUCTIVO

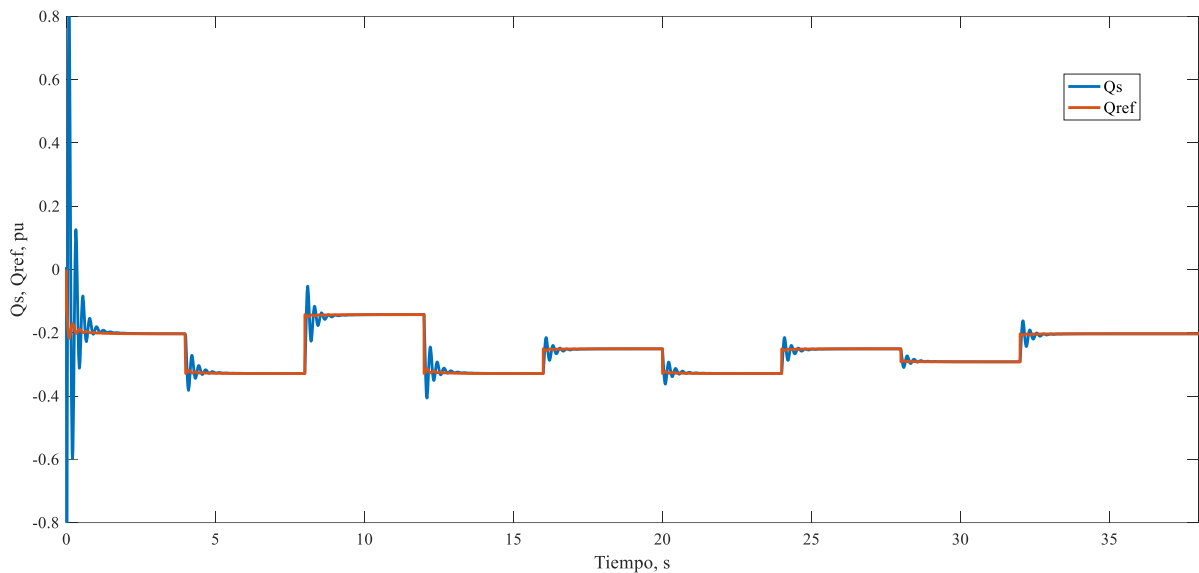
En la figura 6.15 se observa que el control implementado es capaz de ajustar el factor de potencia en cualquier rango dentro de los valores nominales del aerogenerador, también se observa que, con distintos valores de consignas, presenta el mismo patrón de respuesta y ante escalones menores en él *FP*, el valor del error es menor, así como el transitorio. Los valores de consigna de factor de potencia se envían entre la banda de



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

-0.95 a 1, debido a que es la banda en la que operan los parques en el ámbito de la GCROR, por cuestiones de diseño de los parques y control de voltaje en el SIN.

En la figura 6.16 se presenta la respuesta del aerogenerador ante consignas de factor potencia inductivo, pero ahora realizando el trazo de Q_s contra Q_{ref} , medida en terminales del convertidor lado sistema. Se observa que los valores de Q_s son negativos, debido a que en todos los intervalos de tiempo se envían consignas de FP inductivo.



**FIGURA 6.16 RESPUESTA DEL AEROGENERADOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA INDUCTIVO
GRAFICANDO POTENCIA REACTIVA**

Las variables de estado presentan el mismo trazo que para los valores de consigna de factor de potencia capacitivo solo que con distintos valores.

En la figura 6.17 se presentan las magnitudes del voltaje del bus infinito y del voltaje en terminales del convertidor lado sistema en por unidad ante consignas de factor de potencia inductivo. Se observa que el voltaje en terminales del inversor es menor que el voltaje del bus infinito, indicando que el flujo de potencia reactiva va del bus infinito a hacia el convertidor de potencia.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

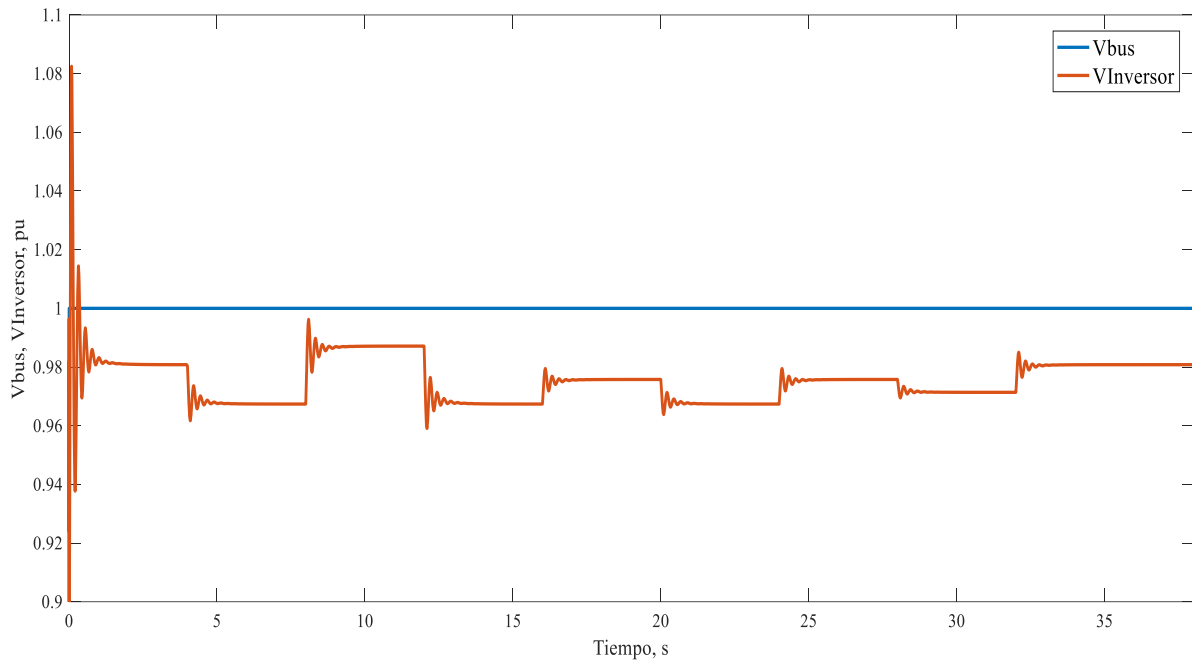


FIGURA 6.17 MAGNITUD DE VOLTAJE DE BUS Y VOLTAJE EN INVERSOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA INDUCTIVO

En la figura 6.18 se presentan las magnitudes del voltaje del bus infinito y del voltaje en terminales del convertidor lado sistema en por unidad, ante consignas de factor de potencia capacitivo. Se observa que el voltaje en terminales del inversor es mayor que el voltaje del bus infinito, indicando que el flujo de potencia reactiva va del convertidor de potencia hacia el bus infinito.

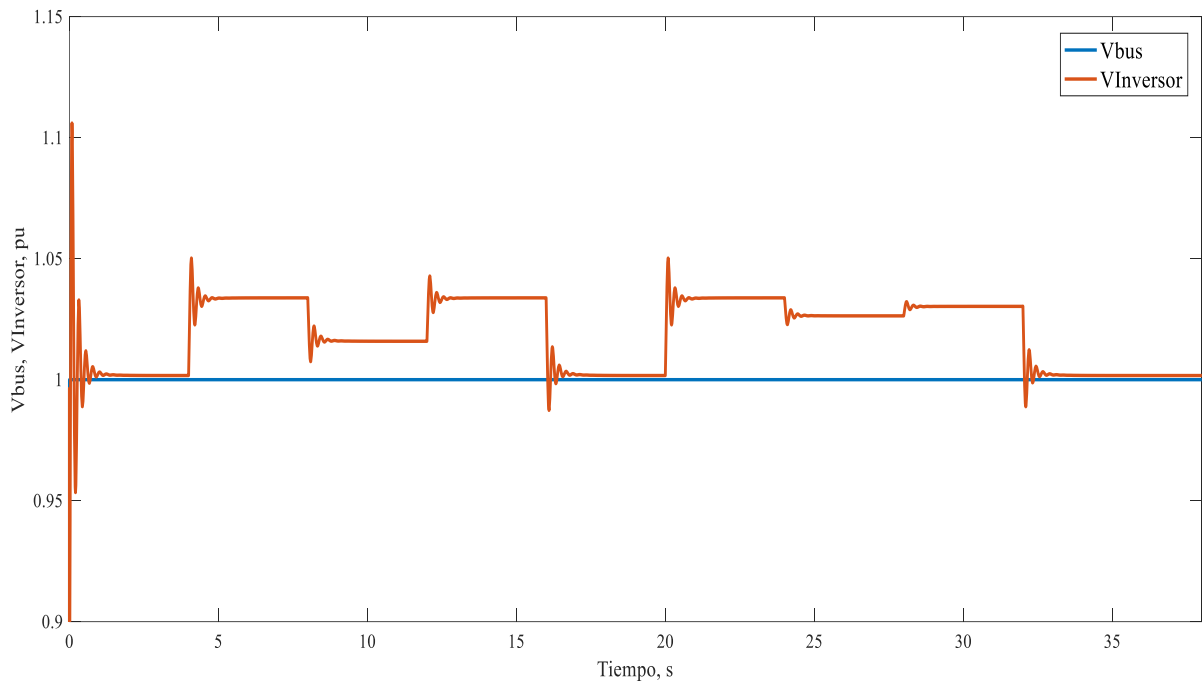


FIGURA 6.18 MAGNITUD DE VOLTAJE DE BUS Y VOLTAJE EN INVERSOR ANTE CONSIGNAS DE FACTOR DE POTENCIA CAPACITIVO

Con los resultados obtenidos para el caso de estudio “asignación de consignas de FP para control de voltaje ante una P constante” se concluye que el aerogenerador tipo D presenta una respuesta favorable ante consignas de factor de potencia. El tiempo de la respuesta que tiene el aerogenerador tipo D ante las consignas es de 2 segundos aproximadamente y el control para el factor de potencia está correctamente sintonizado debido a que responde para cualquier valor de factor de potencia de referencia.

6.5 CONCLUSIONES.

En el presente capítulo se analizó la respuesta dinámica del aerogenerador tipo D, al realizar tres casos de estudio. Se utilizó el método de integración de Runge Kutta de cuarto orden para obtener las soluciones a las ecuaciones diferenciales y algebraicas de los tres casos de estudio.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Para el caso de estudio “representación de la operación del aerogenerador tipo D dentro del CAG” se concluye que el aerogenerador tipo D presenta una respuesta favorable ante consignas de potencia activa, muy similares a la respuesta que tiene el parque instalado en Juchitán en el ámbito de la GCROR. El tiempo de la respuesta que tiene el aerogenerador tipo D ante las consignas es de 2 segundos aproximadamente y el control para la potencia activa está correctamente sintonizado debido a que responde para cualquier valor de potencia de referencia.

Para el caso de estudio “Comportamiento del aerogenerador tipo D ante diferentes velocidades de viento con una potencia de referencia fija” se concluye que el convertidor puede controlar de forma constante la potencia activa de salida y el factor de potencia sin importar que se presenten cambios en la velocidad de viento, siempre y cuando se tenga una velocidad superior a 8 m/s. No se recomienda esta condición de debido a que el aerogenerador opera con variables fuera de sus valores nominales como lo es el VCD del capacitor. Al provocar mayor flujo de corriente en el convertidor se provoca calor en los elementos del mismo y se traduce en pérdidas para el sistema y desgaste de los elementos de la electrónica de potencia. Se recomienda que ante de cambios en la velocidad de viento se utilice el control del ángulo β en coordinación con el control de potencia activa por medio del convertidor lado máquina para evitar en la medida de lo posible el desgaste innecesario del aerogenerador tipo D. Esta coordinación de controles es planteada en los trabajos futuros.

Para el caso de estudio “asignación de consignas de FP para control de voltaje ante una P constante” se concluye que el aerogenerador tipo D presenta una respuesta favorable ante consignas de factor de potencia. El tiempo de la respuesta que tiene el aerogenerador tipo D ante las consignas es de 2 segundos aproximadamente y el control para el factor de potencia está correctamente sintonizado debido a que responde para cualquier valor de factor de potencia de referencia.

Por último se presentaron las gráficas de comparación de voltajes en terminales del convertidor lado máquina contra el voltaje en el bus infinito, identificando para ambos casos el sentido de flujo de potencia reactiva.



CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

CONCLUSIONES.

En el presente trabajo de tesis se realizó el modelado dinámico del aerogenerador tipo D, que consiste en un aerogenerador de velocidad variable, conectado a un generador de inducción de rotor devanado GIRD por medio de una caja de engranajes. Se utilizó el modelo de las dos masas para describir el acopamiento mecánico turbina-generador. Este tipo de aerogenerador se conecta en serie por medio de transformadores a un convertidor de potencia de escala completa y a su vez, el convertidor se conecta en serie a un bus infinito por medio de otro transformador. El modelo del aerogenerador tipo D es un arreglo *back to back* y también es conocido como *full converter*, realizando el modelado en un marco de referencia $qd0$.

Se utilizaron controladores PI para realizar el control de potencia activa, por medio del ángulo de disparo de los elementos de conmutación del convertidor lado máquina y el control de factor de potencia, por medio del ángulo de disparo de los elementos de conmutación del convertidor lado sistema. Los sistemas de control de la potencia activa y factor de potencia se diseñaron considerando la respuesta del sistema a una entrada escalón y se utilizaron las técnicas de sintonización de Ziegler-Nichols, para una respuesta subamortiguada de primer orden.

Se realizaron tres casos de estudio con la finalidad de representar el comportamiento dinámico del aerogenerador tipo D, mismo que se obtuvo por medio del método de integración de Runge Kutta de cuarto orden y el *software* Matlab para resolver las ecuaciones diferenciales y algebraicas del modelo.

En el primer caso de estudio se concluye que el aerogenerador tipo D presenta una respuesta favorable ante consignas de potencia activa, muy similares a la respuesta que tiene el parque instalado en Juchitán en el ámbito de la GCROR. El tiempo de la respuesta que tiene el aerogenerador tipo D ante las consignas es de 2 segundos



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

aproximadamente y el control para la potencia activa esta correctamente sintonizado debido a que responde para cualquier valor de potencia de referencia.

En el segundo caso se presenta el comportamiento del aerogenerador ante diferentes velocidades de viento y se concluye que el convertidor puede controlar de forma constante la potencia activa de salida y el factor de potencia sin importar que se presenten cambios en la velocidad de viento, siempre y cuando se tenga una velocidad superior a 8 m/s. Esta condición de operación no es recomendable debido a que el aerogenerador opera con variables fuera de sus valores nominales como lo es el VCD del capacitor. Al provocar mayor flujo de corriente en el convertidor se provoca calor en los elementos del mismo y se traduce en pérdidas para el sistema y desgaste prematuro de los elementos de la electrónica de potencia. Se recomienda que ante cambios en la velocidad de viento se utilice el control del ángulo β en coordinación con el control de potencia activa por medio del convertidor lado máquina, para evitar en la medida de lo posible el desgaste innecesario del aerogenerador tipo D.

En el tercer caso de estudio se presenta una asignación de consignas de factor de potencia para control de voltaje ante una P constante y se concluye que el aerogenerador tipo D presenta una respuesta favorable ante consignas de factor de potencia. El tiempo de la respuesta que tiene el aerogenerador tipo D ante las consignas es de 2 segundos aproximadamente y el control para el factor de potencia esta correctamente sintonizado debido a que responde para cualquier valor de factor de potencia de referencia. Se muestra la comparación del flujo de potencia reactiva ante valores de factor de potencia inductivo y capacitivo, siendo del sistema hacia el convertidor para factor de potencia inductivo y del convertidor hacia el sistema para factor de potencia capacitivo.

Otra de los beneficios que tiene el modelo del aerogenerador tipo D, es que utiliza un GIRD, el cual para realizar las simulaciones en el software de Matlab se adaptó como un GIJA, al cortocircuitar las terminales del rotor. El GIJA en cuestión de costos es mucho más económico que un Generador Síncrono y que un Generador Síncrono de Imanes permanentes, debido al bajo costo ante mantenimiento y refacciones.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

El modelo del aerogenerador tipo D se podría utilizar para conectarlo al CAG en el SIN, tomando en cuenta que se tendría que mantener limitado el parque eólico donde se instale, para tener un margen de operación ante variaciones de frecuencia. Cabe mencionar que hasta el momento no existe una ley que obligue a las centrales eléctricas que instalen energías renovables, para participar en la regulación primaria y secundaria.

De manera general el modelo del aerogenerador tipo D presentado en esta tesis tiene mayores beneficios que el aerogenerador doblemente alimentado.

TRABAJOS FUTUROS.

En esta sección se presentan los trabajos futuros a desarrollar con el modelo del aerogenerador tipo D desarrollado en esta tesis,

- Realizar la comparación de la respuesta dinámica del aerogenerador doblemente alimentado contra la del aerogenerador *back to back*.
- Tomar los parámetros de algún parque instalado en el ámbito de la GCROR e incorporarlos al modelo desarrollado en esta tesis y con parámetros del CAG de tiempo real realizar una simulación de la respuesta del modelo.
- Realizar la coordinación de controles de β con el control de potencia activa por medio del convertidor lado máquina para operar de manera más eficiente el aerogenerador tipo D.



APÉNDICE A.

PARÁMETROS UTILIZADOS EN LOS CASOS DE ESTUDIO.

Generador de Inducción de Rotor Devanado

$$f = 60$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$n_{pp} = 2$$

$$r_s = 0.006322 \text{ pu}$$

$$r_r = 0.005545 \text{ pu}$$

$$X_{ls} = 0.057749 \text{ pu}$$

$$X_{lr} = 0.087915 \text{ pu}$$

$$X_m = 4.19617 \text{ pu}$$

$$H_g = 0.241 \text{ s}$$

Transformador del Inversor

$$R_I = 0.00077929 \text{ pu}$$

$$X_I = 0.0742 \text{ pu}$$

Transformador del Rectificador

$$R_R = 0.00077929$$

$$X_R = 0.0742 \text{ pu}$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

Convertidor de potencia

$$R_R = 0.01 \text{ pu}$$

$$R_I = 0.01 \text{ pu}$$

$$X_R = 0.15 \text{ pu}$$

$$X_I = 0.15 \text{ pu}$$

$$X_{Cs} = 0.88 \text{ pu}$$

$$R_p = 100/KR$$

Turbina Eólica

$$H_{\omega t} = 2.41 \text{ s}$$

$$R_a = 26 \text{ m}$$

$$\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$$

$$c1 = 0.5176$$

$$c2 = 116$$

$$c3 = 0.4$$

$$c4 = 5$$

$$c5 = 21$$

$$c6 = 0.0068$$

Controlador PI para el $P_s(\alpha_I)$

$$K_{pl} = 1.5220$$



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

$$K_{iI} = 19.1319$$

Controlador PI para $Q_s(\alpha_R)$

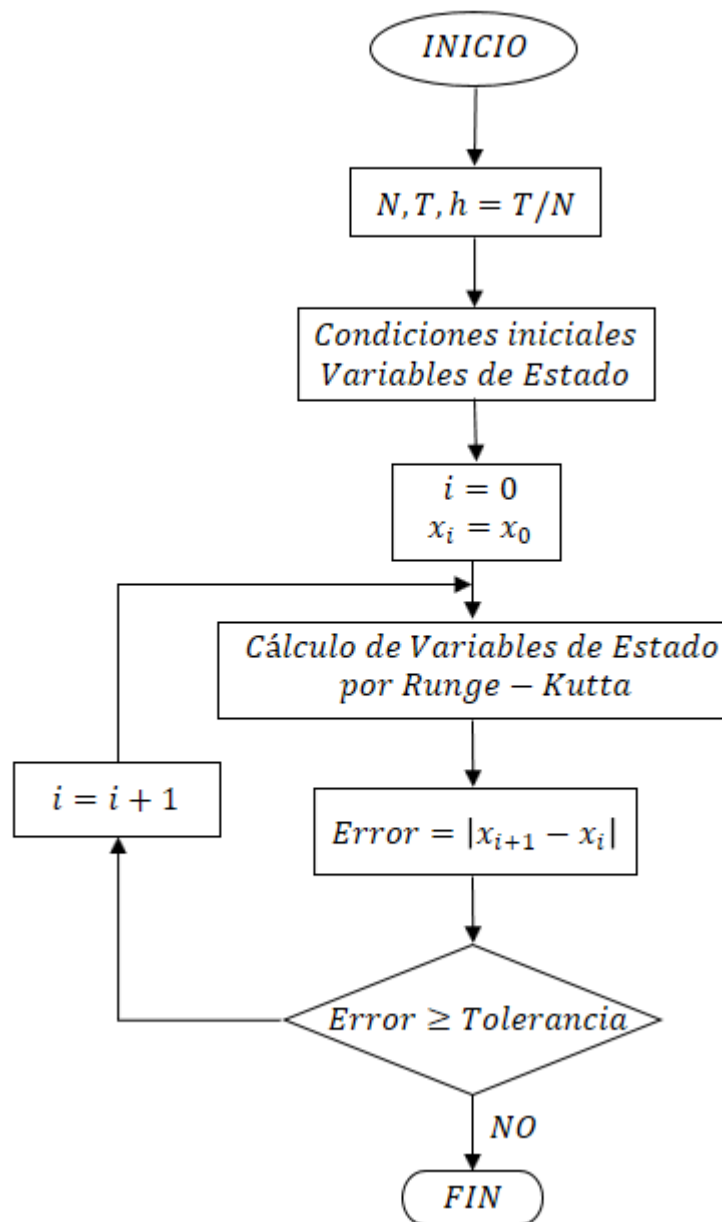
$$K_{pR} = 0.3590$$

$$K_{iR} = 20.6924$$



APÉNDICE B.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL CÓDIGO DE MATLAB UTILIZADO EN LOS CASOS DE ESTUDIO.





REFERENCIAS

- [1] T. Ackerman, *Wind Power in Power Systems*, Estocolmo Suecia: John Wiley and Sons, 2005.
- [2] R. A. P. C. D. K. y. G. S. N. Jenkins, «Embedded Generation,» *IEE Power and Energy Series*, p. 31, 2000.
- [3] É. V. Bertrab, «Magis Iteso,» 01 Abril 2016. [En línea]. Available: www.magis.iteso.mx/content/energía-eólica-la-lucha-por-el-viento-en-méxico.
- [4] AMDEE, «Asociación Mexicana de Energía Eólica,» 2014. [En línea]. Available: www.amdee.org.
- [5] O. W. y. S. S. P.C. Krause, *Analysis of electric machinery*, EUA: McGraw-Hill, 1986.
- [6] S. A.-Z. y. M. Taleb, «Structural Modeling of Small and Large Induction Machines Using Integral Manifolds,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, pp. 529-535, 1993.
- [7] F. N. T. S. y. D. O. P.C. Krause, «The Theory of Neglecting Stator Transients,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 141-148, 1979.
- [8] P. Ledesma, *Regulación de frecuencia y potencia*, Madrid, 2008.
- [9] P. D. Steven C. Chapra, *Métodos Numéricos para Ingenieros*, Michigan: Mc Graw-Hill, 1987.
- [10] J. H. M. a. K. D. Fink, *Métodos Numéricos con Matlab*, España: Prentice Hall Iberia S.R.L., 2000.
- [11] D. G. Zill, *Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado*, México: International Thomson Editores, 1997.
- [12] V. Akhmatov, *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount of Wind Power*, Dinamarca, 2003.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

- [13] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, Inglaterra: John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [14] C. P. N. Pérez, *Análisis de la Respuesta de Estado Estable de Parques Eólicos de Generación Usando el Método de Diferencias Finitas*, Morelia, Michoacan, 2011.
- [15] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, EUA: Wiley-Interscience, 2004.
- [16] P. P. Mukund R. Patel, *WIND AND SOLAR POWER SYSTEMS*, EUA: CRC Press LLC, 1999.
- [17] O. W. S. D. S. Paul C. Krause, *ANALYSIS OF ELECTRIC MACHINERY AND DRIVE SYSTEMS*, EUA: WILEY-INTERSCIENCE, 2002.
- [18] GAMESA, «SIEMENS Gamesa Renewable Energy,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.gamesacorp.com/es/productos-servicios/aerogeneradores/disen-y-fabricacion/velocidad-paso-variable.html>.
- [19] L. C. y. N. García, «Steady-State Solution of VFT Park Using the Limit Cycle Method and a Reduced Order Model,» *IEEE Bucharest Power Tech Conference*, pp. 1-7, Junio/Julio 2009.
- [20] P. A. y. A. Bose, «Stability Simulation of Wind Turbine Systems,» *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 3791-3795, 1983.
- [21] B. B. y. H. Siguerdidjane, «Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines without Wind Speed Measurement,» *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference*, pp. 3456-3461, 2005.
- [22] B. B. y. H. Siguerdidjane-2, «Nonlinear Control of Variable Speed Wind Turbines for Power Regulation,» *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Control Applications*, pp. 114-119, 2005.



Modelado Dinámico de un Aerogenerador Tipo D incorporando un Generador de Inducción.

- [23] M. C. y. Z. Y. P. Rao, «STATCOM Control dor Power SystemVoltage Control Applications,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 4, pp. 1311-1317, 2000.
- [24] A. A. Nolasco, *Control Automático de Generación para Operadores*, Guadalajara: Unidad de Ingenieria Avanzada, 2009.
- [25] R. A. M. Lobos, *Estrategia de Regulación Primaria de Frecuencia en Generadores Eólicos*, Santiado, 2012.
- [26] A. A. Nolasco, *Control Automático de Generación para Operadores*, Guadalajara: Unidad de Ingenieria Avanzada, 2012.
- [27] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Pearson Education Prentice Hall, 1998.
- [28] C. R. D. ENERGÍA, *MANUAL DE INTERCONEXIÓN DE CENTRALES ELÉCTRICAS*, MEXICO, 2016.
- [29] V. Akhmatov, *Analysis of Dynamic Behaviour of Electric Power Systems with Large Amount od Wind Poewr*, Dinamarca, 2003.
- [30] J. C. B. y. S. R. Matos, «Design of PI and PID Controller with Transient Performance Specification,» *IEEE Transactions on Education*, vol. 45, nº 4, pp. 364-370, 2002.