UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA: CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA.

AUTORES:

Iván Paúl Cayo Pallasco

Edison Xavier Panchi Escobar

TUTOR:

Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván

LATACUNGA- ECUADOR

2020

DECLARACIÓN DE AUDITORIA

Nosotros, Cayo Pallasco Iván Paúl y Panchi Escobar Edison Xavier, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **"CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA"**, siendo el Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

…… ……..

CAYO PALLASCO IVÁN PAÚL
055036004-4

PANCHI ESCOBAR EDISON XAVIER
050402727-7

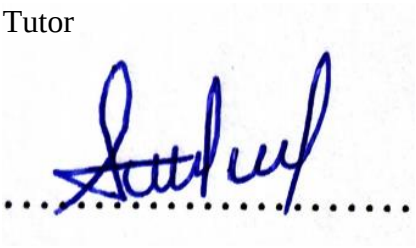
AVAL DE TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

"CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA", de los señores , Cayo Pallasco Iván Paúl y Panchi Escobar Edison Xavier, de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Septiembre 2020

Tutor



Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván

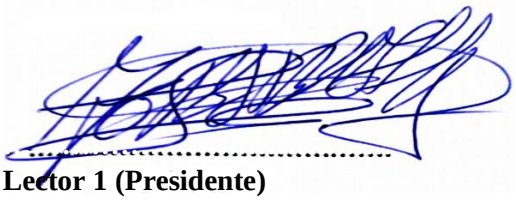
APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: **Cayo Pallasco Iván Paúl y Panchi Escobar Edison Xavier**, con el título de Proyecto de titulación: **"CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA" ,** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

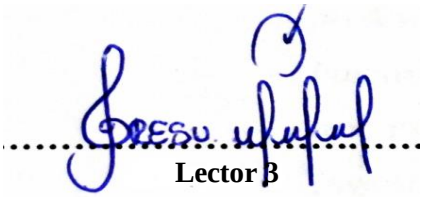
Latacunga, Septiembre 2020

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)
Nombre: Ing. MSc. José Barbosa León
CC: 050142072-3

Lector 2
Nombre: Ing. MSc. Marco
CC: 050230540-2



Lector 3
Nombre: Ing. MSc. Rommel Suárez
CC: 180416535-3

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, nos gustaría agradecerte a ti Dios por bendecirnos y cuidarnos día a día para hacer realidad este sueño tan anhelado por nosotros.

Al Ing. Carlos Quinatoa por habernos guiado en el transcurso del desarrollo de nuestro proyecto de investigación, compartiendo sus conocimientos, su experiencia y su mutuo apoyo incondicional para lograr esta meta.

A nuestros padres, por ser el pilar fundamental de nuestra vida, por su apoyo y sus enseñanzas que nos han compartido a lo largo de las mismas impulsándonos a ser mejores cada día.

Finalmente, nuestro más grande agradecimiento a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirnos las puertas de la Institución, para podernos formar como profesionales de calidad, excelencia, humanistas y críticos al servicio del país, y a nuestra majestuosa y amada carrera de Ingeniería Eléctrica.

Paúl y Edison

DEDICATORIA

En primer lugar, lo dedico a Dios por darme la vida, por cuidarme y bendecirme cada día, segundo a mis padres Juan José y Flor María por su amor, cariño, comprensión y apoyo dotándome de los recursos necesarios para lograr mi sueño.

A mis hermanos Bolívar, Martha, Miriam, Rocío, Nathaly, Javier, Maribel y Elena y a toda mi familia por sus consejos y enseñanzas siendo mi motivación para seguir adelante.

A mis grandes amigas Sonia Abigail, Lida Cristina, Fanny Patricia, Evith Johanna, María Fernanda, Cinthia Daniela, Julisa Katerine, Mónica Katerine, Jennyfer Carolina y Jessica Gabriela por ser mis consejeras y confidentes apoyándome incondicionalmente en todo el transcurso de mi vida universitaria.

Finalmente, a las dos personitas más maravillosas de este mundo, que me ayudaron desde mis inicios motivándome, cuidándome y lograron un cambio para bien en mí, a ustedes Livia Cecilia y Elvia Janeth estaré eternamente agradecido.

Iván Paúl

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico a Dios, por bendecirme y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi madre Lourdes Escobar, quien con su amor, paciencia y esfuerzo siempre creyó en mí y me brindo una carrera para mi futuro.

A mi abuelita Cleofe y mi tía Margoth quien siempre me brinda su amor y han velado por mi durante este arduo camino para convertirme en un profesional. A mis Padrinos Washington y Angelita que son como mis padres para mi brindándome siempre su apoyo incondicional. A mis tíos Ciro y Myrian quien siempre me brindaron esa confianza, apoyo y consejos.

A mis primos Luis, Mauricio, Sofia y Nicol que siempre creyeron en mí y han estado a lo largo de mi vida apoyándome.

Finamente, a mi padre que siempre me dio consejos para conseguir mis metas.

Edison Xavier

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUDITORIA ii

AVAL DE TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN iii

APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE TITULACIÓN iv

ÍNDICE DE TABLAS vii

ÍNDICE FIGURAS viii

1. INFORMACIÓN GENERAL 1

Título del Proyecto 1

Fecha de inicio 1

Fecha de finalización 1

Lugar de ejecución 1

Facultad que auspicia 1

Carrera que auspicia 1

Proyecto de investigación vinculado 1

Equipo de Trabajo 1

Área de Conocimiento 3

Línea de investigación 3

Sub líneas de investigación de la Carrera 3

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO 3

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 4

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO 4

Beneficiarios Directos 4

Beneficiarios Indirectos 5

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN 5

6. OBJETIVOS 5

Objetivo General 5

Objetivos Específicos 5

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS 5
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA 7
8.1. Estado del arte de los DFIG 7
8.2. Energía eólica 8
8.3. Aerogeneradores 8
8.3.1. Elementos de un Aerogenerador 9
8.4. Ley de Betz 10
8.5. Tipos de turbinas eólicas 13
8.5.1. Turbinas eólicas de velocidad fija y Velocidad Variable 13
8.6. Tipos de Configuraciones de aerogeneradores para Sistemas Eólicos 14
8.6.1. Aerogenerador De Velocidad Fija 15
8.6.2. Aerogeneradores con velocidad variable 15
8.6.3. Aerogeneradores con DFIG 16
8.7. Control de una turbina eólica de velocidad variable 17
8.7.1. Regiones de control de velocidad de turbina 18
8.8. Estrategias de control de las potencias 22
8.8.1. Estrategias de control de potencia activa 22
8.8.2. Estrategias de control de potencia reactiva 24
8.9. Convertidor back to back 25
8.9.1. Modulación de ancho de pulso (PWM) 25
8.10. Control Lado del Rotor 27
8.10.1. Marco de referencia 27
8.10.2. Control Inner Loop 28
8.10.3. Control Outer Loop 29
8.11. Control del Convertidor del Lado de la Red 29
8.11.1. Control Inner Loop en el lado de la red 30

8.11.2. Control Outer Loop en el lado de la red 31
9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS 32
10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL 32
Modalidades de la Investigación 32
Técnicas de investigación 33
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS 33
Simulación del control de potencia activa y reactiva de un aerogenerador DFIG 33
Modelo de la Turbina Eólica 34
Máquina de Inducción Doblemente Alimentada (DFIG) 37
Control en el Lado del Rotor 39
Máximo Power Tracking (MPPT) 40
Corrientes del rotor en el eje dq0 41
Cálculo del ángulo del rotor 42
Control Outer Loop del lado del rotor 44
Control Inner Loop del lado del rotor 45
Transformación de las Corrientes dq a voltajes dq 47
Transformada de Park inversa 48
Modulación de ancho de pulsos (PWM) 50
Control del lado de la red 51
Parámetros de la Red 52
Barra de Corriente Continua (Vdc) 52
Control PLL del lado de la red 53
Control Outer Loop 54
Control Inner Loop 58
Transformación de las Corrientes dq a Voltajes dq 60
Transformada de Park inversa 60
Cálculo de P y Q a la salida del Outer Loop 61

Modulación de ancho de pulsos (PWM) en el lado de la red 62
Filtro 63
Transformador 64
Barra infinita 64
Cálculo de Potencias Entregadas a la Barra infinita 64
Diagrama de flujo del sistema desarrollado 65
Esquema Completo de Control de Potencia Activa y Reactiva de un DFIG 67
Enlace Vdc 68
Potencia Activa y Reactiva 70
Comportamiento de Seguimiento de Potencia a diferentes entradas y Factor de potencia entregado a la Red 71
IMPACTOS 76
Impactos Técnicos 76
Impactos Ambientales 76
Impactos Sociales 77
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 77
Conclusiones 77
Recomendaciones 78
BIBLIOGRAFÍA 80
ANEXOS 83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS TURBINAS DE VELOCIDAD FIJA Y VELOCIDAD VARIABLE.....14
TABLA 2: PARÁMETROS DE TURBINA. 35
TABLA 3: VELOCIDADES DE VIENTO ALEATORIAS.....35
TABLA 4: COEFICIENTES DE LA TURBINA.....36
TABLA 5: PARÁMETROS DE LA TURBINA CON DISTINTOS VALORES DE VIENTO. 36
TABLA 6: VALORES DE Cp Y Pt A DIFERENTES VALORES DE BETA. 37
TABLA 7: PARÁMETROS DE LA MÁQUINA DE INDUCCIÓN. 38
TABLA 8: CONSTANTES PARA EL INNER LOOP DE LA CORRIENTE EN EL EJE D. 46
TABLA 9: CONSTANTES PARA EL INNER LOOP DE LA CORRIENTE EN EL EJE Q. 46
TABLA 10: PARÁMETROS USADOS PARA LA SIMULACIÓN EN EL LADO DE RED.....52
TABLA 11: VALORES DE LAS CONSTANTES kpv Y kiv. 56
TABLA 12: VALORES DE LAS CONSTANTES Kpg Y Kqg.....57
TABLA 13: VALORES DE LAS CONSTANTES $kpidg$, $kiidg$, $kpiqg$ Y $kiiqg$.....59
TABLA 14: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VS CALCULADOS.....62
TABLA 15: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VS CALCULADOS.....65
TABLA 16: RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN VS CALCULADOS.....74

ÍNDICE FIGURAS

FIGURA 1. COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR DE EJE HORIZONTAL. 10
FIGURA 2. LEY DE BETZ. 11
FIGURA 3. EVOLUCIÓN EN EL TAMAÑO DE LA TURBINA EÓLICA (Φ: DIÁMETRO DE ROTOR, H: ALTURA). 13
FIGURA 4. AEROGENERADOR DE VELOCIDAD FIJA CON GENERADOR DE INDUCCIÓN. 15
FIGURA 5. AEROGENERADORES DE VELOCIDAD VARIABLE: A) CON GENERADOR SÍNCRONO O ASÍNCRONO Y B) CON GENERADOR SÍNCRONO MULTIPOLOS. 16
FIGURA 6. AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE CON DFIG. 17
FIGURA 7. ESQUEMA DE CONTROL DE TURBINA EÓLICA DE VELOCIDAD VARIABLE REGULADO POR PASO. 18
FIGURA 8. ESTRATEGIA DE CONTROL DE AEROGENERADORES BASADA EN CUATRO REGIONES DE VELOCIDAD. 19
FIGURA 9. ESQUEMAS DE CONTROL PARA LAS REGIONES 1 Y 3. 19
FIGURA 10. CONTROL DE VELOCIDAD INDIRECTO. 21
FIGURA 11. CONTROL DIRECTO DE VELOCIDAD 21
FIGURA 12. CONTROL DE POTENCIA EN LA REGIÓN 4. 22
FIGURA 13. ESTRATEGIA CONTROL DE POTENCIA CON ÁNGULO DE PASO FIJO. 23
FIGURA 14. CONVERTIDOR BACK-TO-BACK. 25
FIGURA 15. MUESTREO NATURAL. 26
FIGURA 16. MUESTREO ASIMÉTRICO. 26
FIGURA 17. MUESTREO SIMÉTRICO. 27
FIGURA 18. MARCO DE REFERENCIA DQ DE ROTACIÓN SÍNCRONA ALINEADO CON EL VECTOR ESPACIAL DE FLUJO DEL ESTATOR. 27
FIGURA 19. CONTROL INNER LOOP. 28
FIGURA 20. CONTROL OUTER LOOP. 29
FIGURA 21. CONTROL DEL CONVERTIDOR DEL LADO DE LA RED. 30
FIGURA 22. INNER LOOP LADO DE LA RED 31
FIGURA 23. OUTER LOOP LADO DE LA RED. 32
FIGURA 24. AEROGENERADOR DE VELOCIDAD VARIABLE CON UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA (DFIG) 34
FIGURA 25. MODELO DE LA TURBINA. 34
FIGURA 26. MÁQUINA DE INDUCCIÓN. 37

FIGURA 27 CURVA DE POTENCIA DE SALIDA EN POR UNIDAD..... 38
FIGURA 28. A) VELOCIDAD DEL ROTOR, B) TOQUE ELECTROMECÁNICO Y C) POTENCIA MECÁNICA GENERADA. 39
FIGURA 29 . DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL DE LADO DEL ROTOR 40
FIGURA 30. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL MPPT 41
FIGURA 31. TRANSFORMACIÓN DE LOS EJES ABC A $\alpha\beta\gamma$..... 42
FIGURA 32. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA OBTENCIÓN DE θr. 42
FIGURA 33. TRANSFORMACIÓN DE LOS EJES ABC A $\alpha\beta\gamma$..... 43
FIGURA 34.CONTROL PLL DEL LADO DEL ROTOR 43
FIGURA 35. TRANSFORMACIÓN DE $\alpha\beta\gamma$ A DQ0..... 44
FIGURA 36. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA OBTENCIÓN DE IDR E IQR. 44
FIGURA 37. CONTROL OUTER LOOP EN EL LADO DEL ROTOR..... 45
FIGURA 38. INNER LOOP DEL LADO DEL ROTOR..... 47
FIGURA 39. SEÑALES DE LAS CORRIENTES ID E IQ Y LAS CORRIENTES DE REFERENCIA EN EL EJE DQ..... 47
FIGURA 40. TRANSFORMACIÓN DE LAS CORRIENTES DQ A VOLTAJES DQ..... 48
FIGURA 41. TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA DQ0 AL SISTEMA $\alpha\beta\gamma$. 49
FIGURA 42. TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA $\alpha\beta\gamma$ AL SISTEMA ABC. 49
FIGURA 43. BLOQUE PWM GENERADOR DE PULSOS 50
FIGURA 44. PULSOS GENERADOS POR EL PWM QUE INGRESAN AL CONVERTIDOR..... 50
FIGURA 45. ESQUEMA DE CONTROL LADO DEL ROTOR..... 51
FIGURA 46. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL LADO DEL RED. 52
FIGURA 47. CONTROL PLL LADO DE LA RED 53
FIGURA 48. ÁNGULO DE FASE THETA UTILIZADO PARA OBTENER LAS CORRIENTES Y VOLTAJES EN EL EJE DQ0. 54
FIGURA 49. ÁNGULO DE FASE THETA (Θ) CON RESPECTO A LA ONDA DE VOLTAJE DE FASE DE LA RED. 54
FIGURA 50. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA ABC AL SISTEMA ΑΒΓ..... 55
FIGURA 51. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CORRIENTES EN DQ0 DEL LADO DE LA RED..... 55
FIGURA 52. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA OBTENCIÓN DE LAS CORRIENTES EN DQ0 DEL LADO DE LA RED..... 56

FIGURA 53. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA CORRIENTE IDG_REF. 56
FIGURA 54. DIAGRAMA INTERIOR DEL CONTROLADOR PI 57
FIGURA 55. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL CÁLCULO DE IQGREF 57
FIGURA 56. CONTROL INNER LOOP 58
FIGURA 57. DIAGRAMA INTERNO DE LOS CONTROLADORES PI DEL CONTROL INNER LOOP 59
FIGURA 58. SEÑALES DE LAS CORRIENTES ID E IQ Y LAS CORRIENTES DE REFERENCIA EN EL EJE DQ 59
FIGURA 59. TRANSFORMACIÓN DE CORRIENTES A VOLTAJES EN EL SISTEMA DQ0 60
FIGURA 60. TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA DQ0 AL SISTEMA $\alpha\beta\gamma$. 61
FIGURA 61. TRANSFORMACIÓN DEL SISTEMA $\alpha\beta\gamma$ AL SISTEMA ABC. 61
FIGURA 62. BLOQUE POWER (DQ0, INSTANTÁNEOS) 62
FIGURA 63. VISUALIZACIÓN DE LOS VALORES DE P Y Q 62
FIGURA 64. BLOQUE PWM DEL LADO DE LA RED. 63
FIGURA 65. ESQUEMA LADO DE LA RED 63
FIGURA 66. BLOQUE POWER (3HP, INSTANTANEOUS) 64
FIGURA 67. VISUALIZACIÓN DE P Y Q ENTREGADAS A LA RED 64
FIGURA 68. ESQUEMA DE CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE UN DFIG 67
FIGURA 69. SEÑAL DE ENLACE DEL VDC. 68
FIGURA 70. SEÑALES DE CORRIENTE EN LOS SISTEMAS ABC Y DQ. 69
FIGURA 71. SEÑALES DE VOLTAJE EN LOS SISTEMAS ABC A DQ. 69
FIGURA 72. SEÑALES DE P. ACTIVA Y REACTIVA 70
FIGURA 73. SEÑALES DE SISTEMA DE CONTROL PROPUESTO 70
FIGURA 74. ENTRADA ESCALÓN. 71
FIGURA 75. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA ANTE UNA ENTRADA ESCALÓN. 71
FIGURA 76. ENTRADA VARIABLE. 72
FIGURA 77. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA ANTE UNA ENTRADA VARIABLE. 72
FIGURA 78. ENTRADA TIPO RAMPA. 73
FIGURA 79. COMPORTAMIENTO DEL FACTOR DE POTENCIA ANTE UNA ENTRADA TIPO RAMPA. 73
FIGURA 80. FLUJOS DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR. 74
FIGURA 81. COMPORTAMIENTO DE LA POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA ANTE PERTURBACIÓN. . 75
FIGURA 82. CORRIENTE ABSORBIDA POR PROTECCIÓN ANTE UNA PERTURBACIÓN 76

ABREVIATURAS

DFIG: Generador de inducción de doble alimentación

PLL: Lazo de bloqueo de fase

PI: Integral proporcional

MPPT: Seguimiento del punto de máxima potencia

PWM: Modulación del ancho de pulso

GSC: Convertidor del lado de la red

RSC: Convertidor del lado del rotor

NOMENCLATURA

$\boldsymbol{\lambda}$: Relación de velocidad de la punta

$\boldsymbol{idr}$: Componente de eje directo de la corriente del rotor

$\boldsymbol{iqr}$: Componente del eje de cuadratura de la corriente del rotor

$\boldsymbol{\Psi s}$: Enlaces de flujo del estator

$\boldsymbol{\Psi r}$: Enlaces de flujo del rotor

$\mathbf{L}\boldsymbol{m}$: Inductancia magnetización

$\mathbf{L}\boldsymbol{s}$: Inductancia del estator

$\mathbf{L}\boldsymbol{r}$: Inductancia del rotor

$\mathbf{i}\boldsymbol{dg}$: Corriente de eje directo en el lado de la red

$\mathbf{i}\boldsymbol{qg}$: Corriente de eje de cuadratura en el lado de la red

$\boldsymbol{Tem}$: Par electromagnético

$\boldsymbol{Lgsc}$: Inductancia de acoplamiento del lado de la red

$\boldsymbol{Rgsc}$: Resistencia de la de la red

$\boldsymbol{\sigma}$: Coeficiente de fuga

$\boldsymbol{\omega_m}$: Velocidad eléctrica de rotor

$\boldsymbol{\omega_r}$: frecuencia angular rotor

$\boldsymbol{\omega_s}$: frecuencia angular del estator

$\boldsymbol{\theta_m}$: El ángulo de la posición del rotor

p: Número de polos

$\boldsymbol{\theta_s}$: Ángulo de fase del flujo del estator

$\boldsymbol{\theta_r}$**:** Angulo de deslizamiento

$\boldsymbol{P_t}$: Potencia aprovechada por el aerogenerador

$\boldsymbol{\rho}$**:** Densidad de aire

$\boldsymbol{A}$**:** Área de barrido de las palas

R: Radio de las palas

$\boldsymbol{\omega_t}$**:** Velocidad del rotor en el eje de baja velocidad.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TITULO: "CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA"

Autor/es: Cayo Pallasco Iván Paúl
Panchi Escobar Edison Xavier

RESUMEN

La presente investigación surge debido a que los aerogeneradores de inducción doblemente alimentados que no puedan entregar una potencia activa y reactiva estable, por causa de las perturbaciones que se dan debido a la variación del viento, provocando que no se pueda conectar a la red directamente, por lo cual se modela un control de potencia activa y reactiva en sistemas de generación eólica usando una maquina doblemente alimentada, que parte primero de la revisión de diferentes fuentes bibliográficas con el propósito de ampliar y profundizar diferentes enfoques, teorías, opiniones y recomendaciones de los diferentes autores, así como identificar las variables que se van a controlar. Para la investigación se opta por la turbina eólica tipo 3, la cual se basa en un generador de inducción doblemente alimentado de velocidad variable en donde el estator está conectado directamente a la red y el rotor está conectado a la red a través de un convertidor AC-DC-AC. Como resultado se implementó el método de control vectorial para el control desacoplado de la potencia activa y reactiva, el cual se encuentra modelado e implementado con el software Matlab/ Simulink. El modelo completo incluye aerodinámica general de la turbina, tren de transmisión mecánica, DFIG, convertidores de potencia regulados por corriente y el sistema de control de la turbina eólica, en donde se diseñó un rastreador de punto de potencia máxima (MPPT), para la extracción de la potencia máxima del viento, el control PLL que es el encargado de sincronizar el ángulo de fase con el voltaje además proporciona estabilidad y rechazos de perturbación a la estimación de ángulos, controles OUTHER LOOP e INNER LOOP que son los encargados de la obtención de las corriente Id e Iq, también las Transformadas de CLARK y PARK normales e inversas para cambiar de sistemas de referencia , y finalmente un bloque PWM encargado de mandar los pulsos a los convertidores. Con el tipo de control implementado se logra inyectar a la barra infinita potencia activa y reactiva con un factor potencia cercano a la unidad, además que se puede evidenciar la efectividad de este control al entregar aproximadamente 1.9 MW de potencia activa, siendo

superior al ejemplo “Wind Farm – DFIG Detailed Model” de Matlab el cual entrega 1.5 MW debido a la diferente electrónica de potencia que presenta el ejemplo.

Palabras claves: Potencia activa, Potencia reactiva, Aerogenerador, Control, DFIG

COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY

ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL

THEME: "ACTIVE AND REACTIVE POWER CONTROL IN WIND GENERATION SYSTEMS USING A DOUBLE-FED INDUCTION MACHINE"

Authors: Cayo Pallasco Iván Paúl
Panchi Escobar Edison Xavier

ABSTRACT

The present research work arises due to the double-fed induction wind turbines cannot deliver a stable active and reactive power, because of the disturbances that occur with the wind variation, causing they cannot be connected to the grid directly, Therefore, a control of active and reactive power in wind power generation systems is modeled using a double-feed machine, which firstly starts from the analysis of different bibliographic sources in order to broaden and deepen different approaches, theories, opinions and recommendations of the different authors, as well as to identify the variables which are going to be controlled. For the research, the type 3 wind turbine is chosen, which is based on a double-fed variable speed induction generator where the stator is directly connected to the grid and the rotor is connected to the grid through an AC-DC-AC converter. As a result, the vector control method was implemented for decoupled control of active and reactive power, which is modeled and implemented with the Matlab/ Simulink software. The complete model includes general turbine aerodynamics, mechanical drive train, DFIG, current-regulated power converters and the wind turbine control system, where a maximum power point tracker (MPPT) was designed, for the extraction of maximum wind power, The PLL control is in charge of synchronizing the phase angle with the voltage and provides stability and perturbation rejection to the angle estimation, OUTHER LOOP and INNER LOOP controls are in charge of obtaining the Id and Iq currents, also the normal and inverse CLARK and PARK Transforms to change the reference systems, and finally a PWM block in charge of sending the pulses to the converters. With the type of control implemented, it is possible to inject active and reactive power into the bar infinite with a power factor close to the unit. In addition, it is possible to demonstrate the effectiveness of this control by delivering approximately 1.9 MW of active power, which is superior to Matlab's "Wind Farm - DFIG Detailed Model" example, which delivers 1.5 MW due to the different power electronics presented in the example.

Keywords: Active power, Reactive power, Wind turbine, Control, DFIG

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

CENTRO DE IDIOMAS

AVAL DE TRADUCCIÓN

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que: La traducción del resumen de la tesis al Idioma Inglés presentado por los señores: Cayo Pallasco Iván Paúl y Panchi Escobar Edison Xavier Egresados de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA) cuyo título versa **"CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA"** lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente certificado de la manera ética que estimaren conveniente.

Latacunga, septiembre del 2020

Atentamente,

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
MSc. Emma Jackeline Herrera Lasluisa
C.C: 0502277031

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI
CENTRO DE IDIOMAS

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

Control de potencia activa y reactiva en sistemas de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada.

Fecha de inicio:

Mayo 2020

Fecha de finalización:

Septiembre 2020

Lugar de ejecución:

San Felipe, Eloy Alfaro, Latacunga, Cotopaxi, Universidad Técnica de Cotopaxi.

Facultad que auspicia:

Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

Carrera que auspicia:

Ingeniería Eléctrica.

Proyecto de investigación vinculado:

- Simulación y control de sistemas de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada.
- Modelado, Control y Simulación de aerogeneradores para contribuir a la regulación de frecuencia.

Equipo de Trabajo:

- Cayo Pallasco Iván Paúl
- Panchi Escobar Edison Xavier
- Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván

Tutor de titulación:

Nombres y apellidos: Carlos Iván Quinatoa Caiza

Fecha de Nacimiento: 01/08/1988

Estado Civil: Soltero

Nacionalidad: Ecuatoriana

Cédula de ciudadanía: 050328786-4

Dirección: Tanicuchi – Latacunga

Teléfono: 032701605/0995830715

Email: carlos.quinatoa4@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela Mixta" Zamora", Tanicuchi-Latacunga-Ecuador

Nivel secundario: Colegio. Gral." Marco Aurelio Subía", Tanicuchi-Latacunga-Ecuador

Nivel superior: Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga-Cotopaxi-Ecuador, Ingeniero Eléctrico en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Universidad Tecnológica de Pereira-Colombia / Universidad Nacional de San Juan-Argentina, Magister en Ingeniería Eléctrica.

Universidad Nacional de San Juan, San Juan-Argentina, Estudios de Doctorado en Ingeniería Eléctrica.

Datos personales (Postulante 1):

Nombres y apellidos: Cayo Pallasco Iván Paúl

Fecha de Nacimiento: 01/01/1997

Estado Civil: Soltero

Nacionalidad: Ecuatoriana

Cédula de ciudadanía: 055036004-4

Dirección: Barrio "Chantilín Grande" – Chantilín - Saquisilí

Teléfono: 0983465263

Email: ivan.cayo0044@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela Fiscal "Naciones Unidas", Saquisilí - Ecuador.

Nivel secundario: Unidad Educativa "Saquisilí", Saquisilí – Ecuador.

Datos personales (Postulante 2):

Nombres y apellidos: Edison Xavier Panchi Escobar

Fecha de Nacimiento: 24/12/1996

Estado Civil: Soltero

Nacionalidad: Ecuatoriana

Cédula de ciudadanía: 050402727-7

Dirección: Barrio "La Cocha" - Juan Montalvo - Latacunga

Teléfono: 032103015/0999202208

Email: edison.panchi7277@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela Fiscal "Simón Bolívar", Latacunga - Ecuador.

Nivel secundario: Instituto Tecnológico "Ramón Barba Naranjo", Latacunga – Ecuador.

Área de Conocimiento:

- Sistemas de control
- Maquinas Eléctricas
- Energías Renovables
- Electrónica de Potencia
- Sistemas Eléctricos de Potencia

Línea de investigación: Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sub líneas de investigación de la Carrera: Conversión y uso racional de la energía eléctrica.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El propósito del presente trabajo, es el control de potencia activa y reactiva de un aerogenerador de velocidad variable, para la integración a la barra infinita, mediante el software Matlab/Simulink, con una participación destacada de la electrónica de potencia, donde se emplea un convertidor back to back. El trabajo abarca el sistema eléctrico del generador eólico y se concentra en extraer la máxima potencia producida por el viento y

realizar un control de forma eficiente, para con ello definir el control a emplear de potencia activa y reactiva en el lado de red, existente en bibliografía científica, teniendo en cuenta la importancia de las características de conexión a la red. Finalmente realizar la simulación en el software Matlab/Simulink con la configuración y el modelo de control planteado y los parámetros basados en investigaciones, de esta manera realizar un análisis del comportamiento obtenido por la plataforma de simulación, corroborando los resultados con un ejemplo realizado en el software ETAP.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

En la actualidad con el cambio de la matriz energética en el País, las energías alternativas juegan un rol importante para este desarrollo por ende una de las tecnologías más destacadas es la generación eólica, no solo por su fácil implementación si no por sus costos en materiales. Se cuenta con una alta gama de tipos de aerogeneradores dependiendo del uso y potencia que se requiera, en los últimos años los aerogeneradores doblemente alimentados (DFIG) son ampliamente ya utilizados, debido a esto se requiere contar con modelamientos específicos para el control de potencia activa y reactiva, así estos puedan conectarse de manera sencilla y teniendo la facilidad de absorber o entregar potencia a la red eléctrica.

Se analiza las variables a intervenir y así se podrá observar el comportamiento en la entrega de potencia activa y reactiva a la red, la relación de producción de energía respecto a la velocidad de viendo, los controles necesarios para optimizar esta energía, etc.

Por esto hace necesario el estudio de un control de potencia activa y reactiva en sistemas de generación eólica con generador de inducción doblemente alimentado, ya sean estos utilizados para futuros parques eólicos de grandes potencias o para usos autónomos de menor potencia utilizando la literatura disponible para el modelamiento y el Software en el cual se desarrolla la simulación.

4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Beneficiarios Directos:

- Universidad Técnica de Cotopaxi.

Beneficiarios Indirectos:

- Estudiantes de ingeniería eléctrica y Centrales Eólicas del país.

5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El problema de esta investigación surge debido a que los aerogeneradores de inducción doblemente alimentados no puedan entregar una potencia activa y reactiva estable, por causa de las perturbaciones que se dan debido a la variación del viento, provocando que no se pueda conectar a la red directamente.

6. OBJETIVOS

Objetivo General

Modelar un control de potencia activa y reactiva en sistemas de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada**.**

Objetivos Específicos

- Analizar el estado del arte de los tipos de control de potencia activa y reactiva de los generadores eólicos usando máquinas doblemente alimentada.
- Desarrollar el modelo de control para el sistema de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada.
- Simular el modelo de control para el sistema de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada en el Software Simulink de Matlab para su análisis y corroborar los resultados obtenidos con el modelo Wind Farm DFIG de Matlab y un flujo de potencia en el software ETAP.

7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	RESULTADOS	TÉCNICAS O INSTRUMENTOS
Analizar el estado del arte de los tipos de control de potencia activa y reactiva de los generadores eólicos usando máquinas doblemente alimentada.	Investigación de los controles de potencia activa y reactiva usando maquinas doblemente alimentadas. Recolección de información de aerogeneradores.	Estrategias de control de potencia activa y reactiva.	Investigación – Libros-Papers-Documentos web
Desarrollar el modelo de control para el sistema de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada.	Investigación de los tipos de aerogeneradores, elementos aerodinámicos, eléctricos y modelado de un control para el generador de inducción doblemente alimentado con cálculos matemáticos de todas las variables a intervenir.	Funcionamiento del modelado para el control de potencia activa y reactiva en aerogeneradores DFIG. Cálculo de variables matemáticas.	Investigación aplicada
Simular el modelo de control para el sistema de generación eólica usando una máquina de inducción doblemente alimentada en el Software Simulink de Matlab para su análisis y corroborar los resultados obtenidos con el modelo Wind Farm DFIG de Matlab y un flujo de potencia en el software ETAP.	Análisis de resultados obtenidos en la simulación y comparación con el modelo Wind Farm DFIG de Matlab y un flujo de potencia en el software ETAP	Desarrollo de la simulación presentando resultados que prueben el funcionamiento del sistema. Tabla de comparación de resultados de la simulación propuesta.	Simulación en el software Matlab/Simulink

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1.Estado del arte de los DFIG

A lo largo de toda la historia de la humanidad, la utilización de la energía eólica ha sido inevitable es por lo cual se presenta algunas generalidades e investigación relacionadas con la energía eólica y las maquinas dobletemente alimentadas como la de: Erlich (2007), que presenta un modelamiento de un DFIG y su conversor para estudios de estabilidad, este modelo fue utilizado para el estudio de la dinámica de los sistemas de potencia que tienen parques eólicos interconectados. Eisenhut (2007), que presento un modelo para la extracción de energía en condiciones de viento calmado, que incluye la aerodinámica y las partes del control, y su zona de operación esta básicamente cerca al punto de velocidad de inicio de generación evitando que haya conexiones a la red innecesarias cuando hay pequeñas variaciones en la velocidad del viento que son despreciables y que hacen pensar que entro en la zona de inicio de generación. Kim (2011), que propuso un modelo en RSCAD / RTDS, con el objetivo de llevar la posición del punto de operación cerca de la optimización, así también para la operación de velocidad variable de la configuración DFIG para perfiles de velocidad del viento dados a fin de observar la respuesta de control y el rendimiento del seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) durante los cambios de velocidad del viento. Acuña David (2013), realiza un estudio donde presenta opciones de control de potencia activa y reactiva en aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG), con el propósito de brindar información acerca de las configuraciones y estrategias de control de potencia, tanto activa como reactiva, en aerogeneradores con DFIG. Toledo Eduardo (2014), que presento un modelo de aerogenerador basado en generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) con capacidad LVRT (low voltage ride through). el cual sirve como herramienta para la simulación de sistemas eléctricos de potencia y permite analizar el impacto de la operación LVRT en la red eléctrica de conexión. Safont Vivas (2016), que ha propuesto un modelo de circuito equivalente para el estudio en régimen permanente que contempla las pérdidas en el hierro del estator y las pérdidas variables en el hierro del rotor, además de un modelo de regulador simple de tipo control directo de potencia con una segunda realimentación de velocidad que se puede obviar sin apenas efectos. Medina María (2017), que realizo un análisis de estabilidad de generación eólica para el sistema de transmisión nacional con aerogeneradores de inducción doblemente alimentado, con el objetivo de conocer la estabilidad en circuitos asociados a la conexión de la subestación

eléctrica colectora 1 del sistema de transmisión nacional. Jiménez A. (2018), que realizo un análisis del impacto de la corriente del rotor en DFIG – WECS en condiciones de falla dando a conocer el impacto de las corrientes del rotor en estado estacionario y transitorio del sistema de conversión de energía eólica basado en DFIG. Gómez Luis (2019), que propuso un control combinado de turbina eólica basada en DFIG y sistema de almacenamiento de energía de batería para respuesta de frecuencia en microredes, con el objetivo de garantizar la carga del sistema de baterías durante el funcionamiento de la DFIG conectada en la red, y el control de la frecuencia en el funcionamiento de la microred después de una perturbación intencional. Al Zabin Al-Khaldi (2019), presento un aerogenerador generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) con un controlador Fuzzy-PI que se centran principalmente en controlar la corriente del rotor DFIG para permitir que el sistema funcione a un cierto valor de corriente que maximice la captura de energía a diferentes velocidades del viento.

8.2. Energía eólica

Los últimos años el gran desarrollo industrial existente alrededor de todo el mundo ha producido consecuencias negativas para la sociedad, dentro de las cuales se puede mencionar altas tasas de contaminación y desarrollo industrial poco sustentable, afectando de manera importante al medio ambiente. No obstante, la humanidad en la actualidad ha promovido el cuidado de la naturaleza, en consecuencia, de esto la gran parte de los países del mundo han decido aumentar las fuentes de energías renovables en sus matrices energéticas.

Una alternativa muy económica y muy amigable con el medio ambiente ha sido la energía eolia, permitiendo así aprovechar la energía cinética del viento para convertirla en energía eléctrica.

8.3. Aerogeneradores

La principal máquina para la conversión de la energía eólica es el aerogenerador, también llamado generador eólico, el cual esta básicamente constituida por una turbina montada sobre una torre, cuyo eje de rotación se encuentra acoplado al eje del rotor de un generador eléctrico.

8.3.1. Elementos de un Aerogenerador

El aerogenerador es la base de la energía eólica, ya que son estructuras de gran tamaño que se mueven debido al movimiento del viento y lo convierten en energía eléctrica. A continuación, se procederá describir los elementos básicos de un aerogenerador:

a) La góndola: Contiene los componentes clave del aerogenerador, incluyendo el multiplicador y el generador eléctrico. El personal de servicio puede entrar en la góndola desde la torre de la turbina. A la izquierda de la góndola tenemos el rotor del aerogenerador, es decir las palas y el buje [1].

b) Las palas del rotor: Son unas de las partes más importantes por no decir la más importante ya que son las encargadas de recoger la energía del viento, convertir el movimiento lineal de este en un movimiento de rotación, esta energía es transmitida al buje, del buje pasa a un sistema de transmisión mecánica y de ahí al generador que transforma el movimiento de rotación en energía eléctrica [1].

c) El buje: El buje del rotor está acoplado al eje de baja velocidad del aerogenerador [1].

d) El multiplicador: Tiene a su izquierda el eje de baja velocidad. Permite que el eje de alta velocidad que está a su derecha gire 50 veces más rápido que el eje de baja velocidad [1].

e) El generador eléctrico: Suele ser un generador asíncrono o de inducción. En los aerogeneradores modernos la potencia máxima suele estar entre 500 y 1.500 kW [1].

f) El controlador electrónico: Es un ordenador que continuamente monitoriza las condiciones del aerogenerador y que controla el mecanismo de orientación. En caso de cualquier disfunción (por ejemplo, un sobrecalentamiento en el multiplicador o en el generador), automáticamente para el aerogenerador y llama al ordenador del operario encargado de la turbina a través de un enlace telefónico mediante modem [1].

g) La unidad de refrigeración: Contiene un ventilador eléctrico utilizado para enfriar el generador eléctrico. Además, contiene una unidad refrigerante por aceite empleada para enfriar el aceite del multiplicador. Algunas turbinas tienen generadores refrigerados por agua.

h) La torre: Soporta la góndola y el rotor. Generalmente es una ventaja disponer de una torre alta, dado que la velocidad del viento aumenta conforme nos alejamos del nivel del suelo [2].

Las torres pueden ser bien torres tubulares o torres de celosía. Las torres tubulares son más seguras para el personal de mantenimiento de las turbinas ya que pueden usar una escalera interior para acceder a la parte superior de la turbina. La principal ventaja de las torres de celosía es que son más baratas.

i) El mecanismo de orientación: Está activado por el controlador electrónico, que vigila la dirección del viento utilizando la veleta [2].

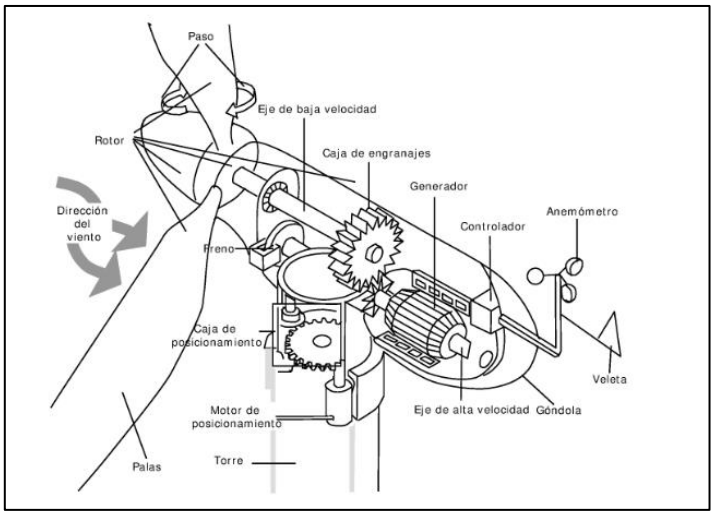


Figura 1. Componentes de un aerogenerador de eje Horizontal.

Fuente: [3]

8.4. Ley de Betz

La energía cinética que se encuentra contenida en el viento es muy grande, no obstante, los aerogeneradores no pueden extraer toda esa energía. El límite betz explica teóricamente el porcentaje de energía que se puede extraer del viento. Para analizar esta ley se observa la figura 1 donde se representa gráficamente las variaciones en la velocidad y presión de la masa de aire que atraviesa el conjunto rotor/palas de un aerogenerador.

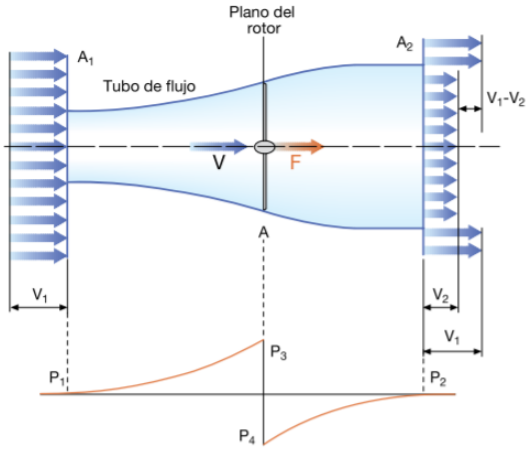


Figura 2. Ley de Betz.

Fuente: [4]

Donde la ecuación 1 muestra la potencia eólica disponible del viento teniendo en cuenta la variación de la velocidad y el aérea de barrido de las palas.

$$P_v = \frac{1}{2}\rho * V_v^3 * A \qquad (1)$$

Donde:

P_v= potencia eólica

ρ= densidad del aire

A=Área de barrido de las palas

V_v= velocidad del viento

La ecuación 2 muestra la potencia transferida por el viento al aerogenerador.

$$P_t = \frac{1}{2}\rho * V_v^3 * A * C_p \qquad (2)$$

Donde:

P_t= potencia aprovechada por el aerogenerador

ρ= densidad del aire

A=area de barrido de las palas

V_v= velocidad del viento

C_p= coeficiente de potencia del aerogenerador

8.4.1.1. Coeficiente de potencia y par del aerogenerador

El coeficiente de potencia es un parámetro adimensional que expresa la efectividad de la turbina eólica en la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica, su valor oscila entre 0 y 0.593 [5].

Este parámetro puede ser calculado en función de la velocidad en la punta pala (λ) y el ángulo de inclinación (β), dado por la siguiente expresión:

$$C_p = k_1\left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3\beta - k_4\beta^{k_5} - k_6\right)\left(e^{k_7/\lambda_i}\right) \quad (3)$$

Donde λ_i esta dada por:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + k_8 * \beta} + \frac{k_9}{\beta^3 + 1}} \quad (4)$$

Los valores de $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7$, k_8 y k_9 son constantes que dependen del tipo de turbina a utilizar. La velocidad en la punta pala está definida por:

$$\lambda = \frac{R * \omega_t}{V_v} \quad (5)$$

Donde:

R: radio del rotor.

ω_t: velocidad del rotor en el eje de baja velocidad.

El par generado en el rotor se consigue mediante la potencia recibida y la velocidad de rotación de la turbina como se expresa en la ecuación 6:

$$T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 {V_v}^2 C_t \quad (6)$$

Donde C_t es el coeficiente de torque, este coeficiente esta relaciona con el coeficiente de potencia y se calcula por:

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (7)$$

8.5. Tipos de turbinas eólicas

Las turbinas eólicas son hoy una opción más en el mercado de la generación llevando a la experimentación de decenas de modelos, con diferentes materiales, número de aspas, posición del eje de rotación entre otras características. Existen diferentes tipos de aerogeneradores que pueden clasificarse atendiendo a diversos criterios.

En la figura 2 se detalla la evolución de las turbinas eólicas en cuanto a la altura de colocación (H) y el diámetro del rotor (Φ):

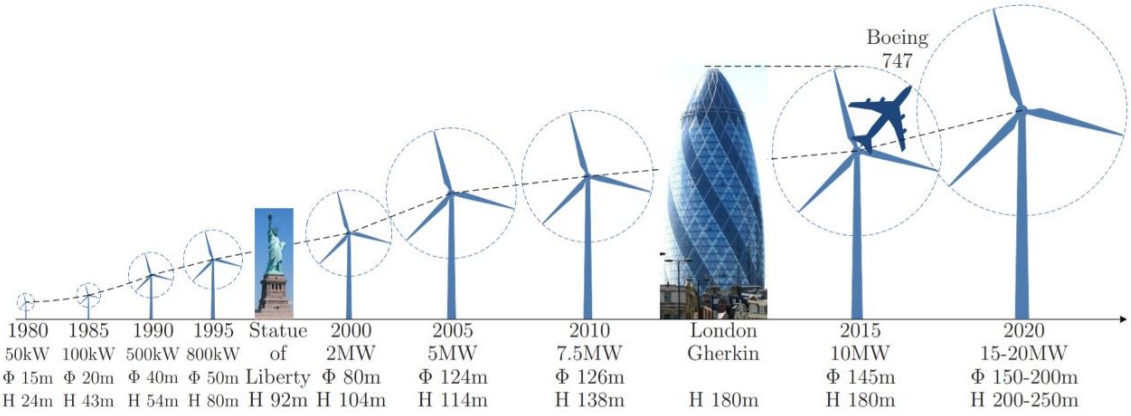


Figura 3. Evolución en el tamaño de la turbina eólica (Φ: diámetro de rotor, H: altura).

Fuente: [6]

Uno de los criterios es según el tipo de máquina eléctrica utilizada y su tecnología de control, clasificándose así en:

- Turbinas eólicas de velocidad fija
- Turbinas eólicas con deslizamiento variable

8.5.1. Turbinas eólicas de velocidad fija y Velocidad Variable

a. **Turbinas de Velocidad Fija:** Como su nombre lo indica presentan una única velocidad de rotación, debido a lo cual la velocidad de giro del rotor permanece constante y viene determinada por la frecuencia de la red, la relación de la multiplicadora y el diseño del generador, sin importar la velocidad de viento [7].
b. **Turbinas de Velocidad Variable**: Este tipo de turbinas están diseñadas para poder trabajar en un rango bastante amplio de velocidades del rotor. Éstas normalmente pueden variar el ángulo de pitch, controlar la velocidad y potencia de la turbina aprovechando mejor la energía proveniente de un régimen de viento

dado, y entregándola a la red con mucha mejor calidad (sin transmitir las fluctuaciones producidas por la variabilidad del viento) respecto a las anteriores de velocidad fija [8].

En la tabla 1 se detallan las ventajas y desventajas de los tipos de turbinas mencionadas:

Tabla 1: Ventajas y desventajas de las Turbinas de Velocidad fija y Velocidad Variable.

Tipo de Turbina	Ventajas	Desventajas
Turbina de velocidad fija	- Simplicidad - Robustez y fiabilidad - Precio	-Consumo incontrolable de potencia reactiva, -Calidad de energía generado muy pobre. -Estrecho margen de velocidades del viento para extraer potencia -Deben desconectarse ante perturbaciones por lo cual ponen en peligro la estabilidad de sistema.
Turbina de velocidad variable	-Permiten regular la inyección de potencia activa y reactiva -Las fluctuaciones de la velocidad del viento no se transmiten a la red. - Mejor calidad de la energía entregada al a red. -Trabajan en el mantenimiento y la reocupación de la red durante los huecos de tensión.	- Pérdida de energías en el convertidor de potencia. - Incremente del costo por el incremento de más componentes en la electrónica de potencia.

Fuente: [9]

8.6. Tipos de Configuraciones de aerogeneradores para Sistemas Eólicos

Existe una variedad de configuraciones para sistemas eólicos, en donde las más importantes son:

- Aerogenerador de Velocidad Fija
- Aerogenerador de deslizamiento variable
- Aerogenerador con DFIG

8.6.1. Aerogenerador De Velocidad Fija

En este tipo de aerogeneradores, el generador asíncrono está conectado directamente a la red, con un arrancador y un banco de condensadores para compensar la energía reactiva.

Están diseñados para alcanzar una eficiencia máxima a una velocidad determinada. Para incrementar la producción de energía, algunos aerogeneradores de velocidad fija tienen dos juegos de devanados: uno para velocidades de viento bajas y otro con menor número de pares de polos para velocidades medias y altas.

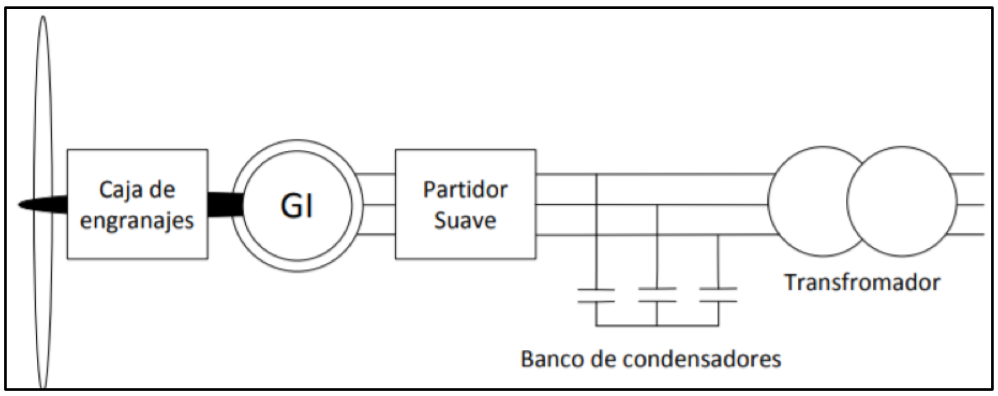


Figura 4. Aerogenerador de velocidad fija con generador de inducción.

Fuente: [10]

8.6.2. Aerogeneradores con velocidad variable

En la operación a velocidad variable es posible adaptar la velocidad de giro del rotor a la velocidad del viento incidente de forma que opere con un coeficiente de potencia máximo. Estos sistemas van equipados con generadores asíncronos o síncronos y se conectan a la red a través de un convertidor de potencia, capaces de independizar la velocidad de giro de la frecuencia de la red [9].

Existe dos principales configuraciones de aerogeneradores con turbinas de velocidad variable; las dos poseen controles de potencia activa y reactiva que se entrega al sistema como se detalla en la figura 3.

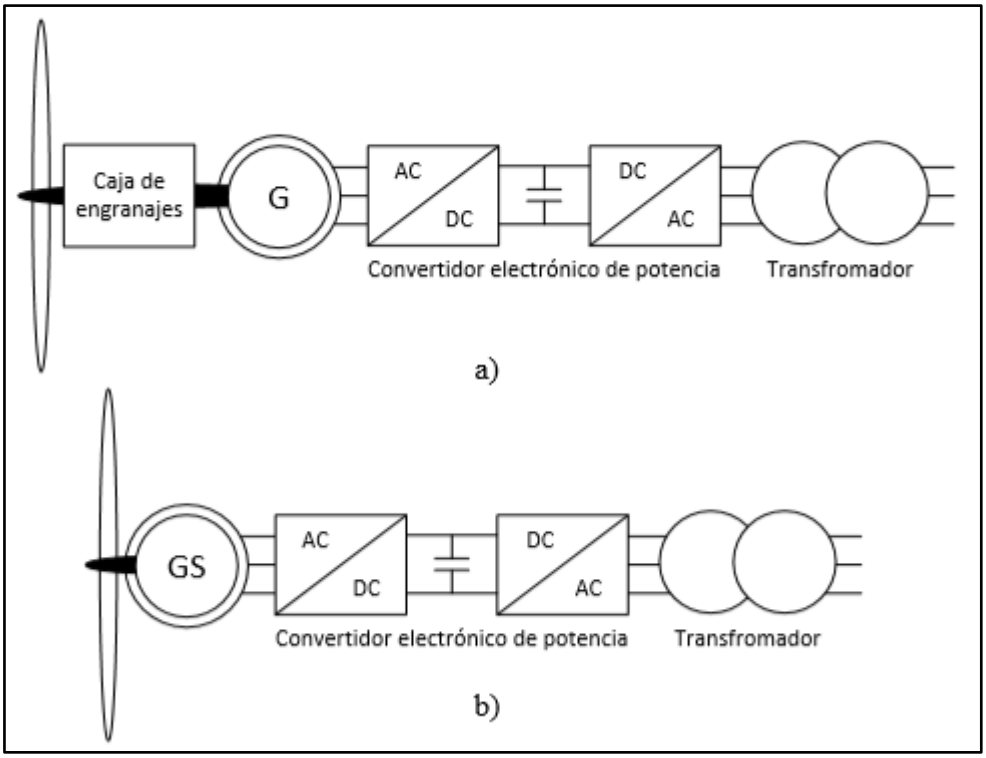


Figura 5. Aerogeneradores de velocidad variable: a) con generador síncrono o asíncrono y b) con generador síncrono multipolos.

Fuente: [10]

8.6.3. Aerogeneradores con DFIG

La tecnología de control variable más desarrollada en la actualidad la constituyen los double feed induction generator (DFIG) o generadores asíncronos doblemente alimentado (GADA). Este tipo de aerogenerador consiste en una máquina asíncrona de rotor bobinado, que se caracteriza por el rotor que se encuentra conectado a la red a través de un convertidor de frecuencia mientras el estator se conecta directamente a la red mediante un transformador. El propósito de este aerogenerador es generar una tensión de valor eficaz y frecuencia constante, aunque su eje gire a velocidad variable, en régimen subsíncrono o supersíncrono.

Las ventajas que ofrece esta configuración son que se consigue controlar la potencia activa y reactiva con bajos niveles de armónicos tanto en el lado del generador como en el de la red. Además, tiene el poder de entregar a la red una potencia superior a la nominal de la máquina en funcionamiento supersíncrono. Comparados con los anteriores, los DFIGs, tienen dificultades para trabajar en redes aisladas y peor respuesta ante huecos de tensión en la red, ya que producen un incremento de corriente en los devanados del

estator, debido al acoplamiento magnético entre estator y rotor, esta corriente también fluirá por el rotor y el equipo de potencia pudiendo llegar a destruirlo.

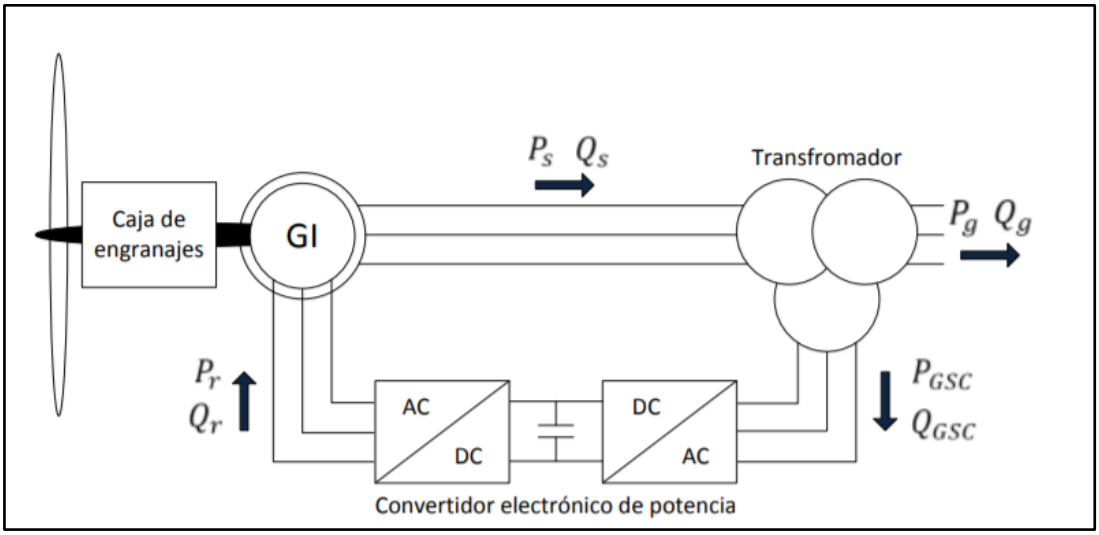


Figura 6. Aerogenerador de velocidad variable con DFIG**.**

Fuente: [10]

8.7. Control de una turbina eólica de velocidad variable

Para calcular el par del generador y las referencias del ángulo de inclinación se necesita el control de una turbina eólica de velocidad variable que cumpla con los siguientes requisitos [5]:

- Extraer la máxima energía del viento.
- Mantener la turbina en modo de funcionamiento seguro (potencia, velocidad y par bajo los límites).
- Minimizar las cargas mecánicas en el tren de transmisión.

En este apartado se tratará de los aspectos relacionados con la extracción de energía y el control de velocidad-potencia.

La figura 7 muestra un esquema de control general de estrategia de control de turbinas eólicas (VSWT), donde las dos salidas son el par del generador y el ángulo de inclinación.

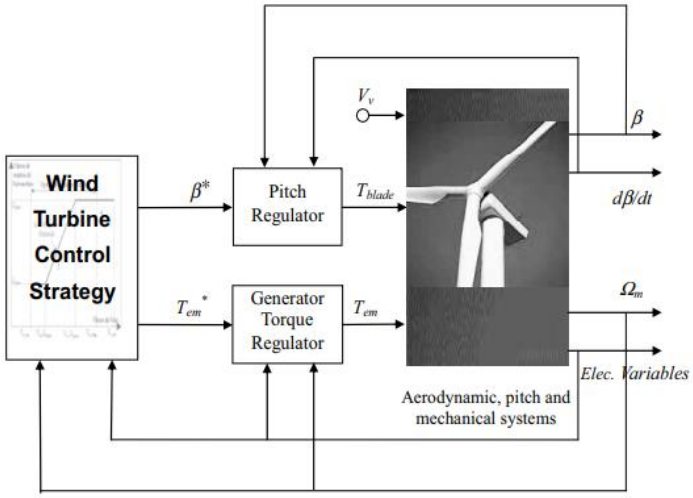


Figura 7. Esquema de control de turbina eólica de velocidad variable regulado por paso.

Fuente: [5]

Este control es independiente de la tecnología del generador y puede simularse sin modelar la máquina eléctrica, los convertidores de potencia y sus controles asociados, simplemente incluyendo la dinámica del torque como un sistema de primer orden. Además, para las turbinas eólicas basadas en DFIG, esta delimitación también sirve para limitar el deslizamiento de la máquina eléctrica y, por lo tanto, el voltaje debe proporcionar el convertidor de rotor [5].

8.7.1. Regiones de control de velocidad de turbina

La estrategia de control de la turbina eólica más utilizada se ilustra en la Figura 8 y consta de cuatro zonas de operación, además muestra la velocidad de la turbina eólica en función de la velocidad del viento.

1. Limite la velocidad mínima de operación.
2. Seguimiento de la curva de extracción de potencia máxima de la operación de velocidad variable con carga parcial.
3. Limite la velocidad máxima en operación de carga parcial.
4. Limite la velocidad máxima de operación a la potencia nominal.

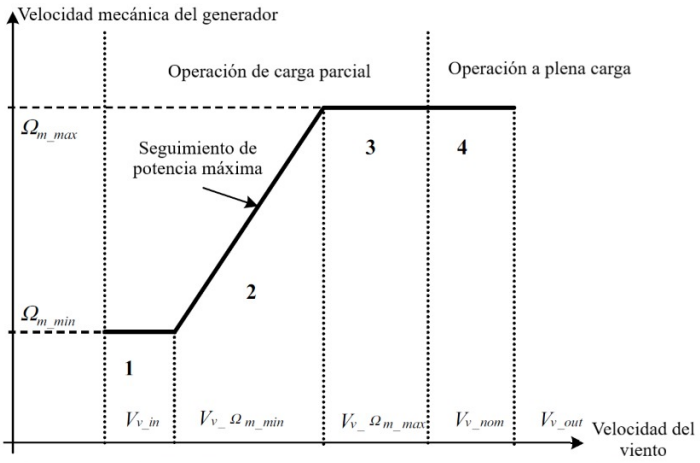


Figura 8. Estrategia de control de aerogeneradores basada en cuatro regiones de velocidad.

Fuente: [5]

8.7.1.1. Regiones 1 y 3: Control de velocidad mínima y máxima

El objetivo principal es mantener una velocidad de rotación constante de la turbina en su valor mínimo en la Zona 1 y su valor nominal en la Zona 3. Con respecto a la eficiencia energética, la maximización no es una prioridad tan alta como en la Zona 2, aquí el generador funciona a velocidad constante. La velocidad específica λ varía con la velocidad del viento [5].

En la figura 9 se observa el esquema de control para las regiones 1 y 3.

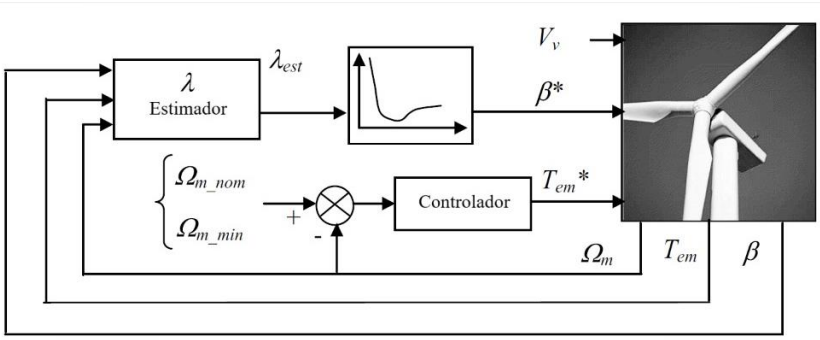


Figura 9. Esquemas de control para las regiones 1 y 3.

Fuente: [5]

8.7.1.2. Región 2: Seguimiento de potencia máxima

En esta región de operación, el objetivo del control de velocidad es seguir el camino de la extracción de potencia máxima. En la literatura, se proponen diferentes métodos para

regular la turbina eólica a carga parcial siguiendo la trayectoria de extracción de potencia máxima.

Se han considerado dos tipos diferentes de controladores; uno consiste en tomar como referencia el par electromagnético del par electromagnético relacionado con la curva de potencia máxima, para cada valor de velocidad de rotación de la turbina y usar la naturaleza dinámicamente estable del VSWT alrededor de esta curva. Este controlador se llama controlador de velocidad indirecta (ISC). El segundo controlador genera la velocidad de rotación óptima de la turbina (esto está vinculado a la relación de velocidad óptima de la punta) para cada valor de velocidad del viento, y lo utiliza como referencia de velocidad de rotación de la turbina. Luego, controla la velocidad de rotación de la turbina con un regulador. Se llama controlador de velocidad directo (DSC) [5].

- **Controlador de velocidad indirecta**: Se puede evidenciar fácilmente que el WT es dinámicamente estable en cualquier punto de la curva de potencia máxima de la Zona 2. Esto significa que para cualquier variación de velocidad de rotación alrededor de un punto en la curva de potencia máxima, el VSWT vuelve naturalmente a su punto de operación.

  Cuando la turbina está trabajando en el punto de máxima potencia se tiene las siguientes condiciones:

$$\lambda_{opt} = \frac{R\omega_t}{V_v}\ , C_p = C_{p_max} \quad y\ , C_t = C_{t_opt} \tag{9}$$

  El par aerodinámico extraído por la turbina está dado por:

$$T_t = \frac{1}{2}\rho\pi\ R^2 \frac{R^3{\omega_t}^2}{\lambda_{opt}^2}\frac{C_{p_max}}{\lambda_{opt}} \tag{10}$$

  Es decir,

$$T_t = k_{opt_t}{\omega_t}^2 \tag{11}$$

  Donde:

$$k_{opt_t} = \frac{1}{2}\rho\pi\frac{R^5}{\lambda_{opt}^3}C_{p_max} \tag{12}$$

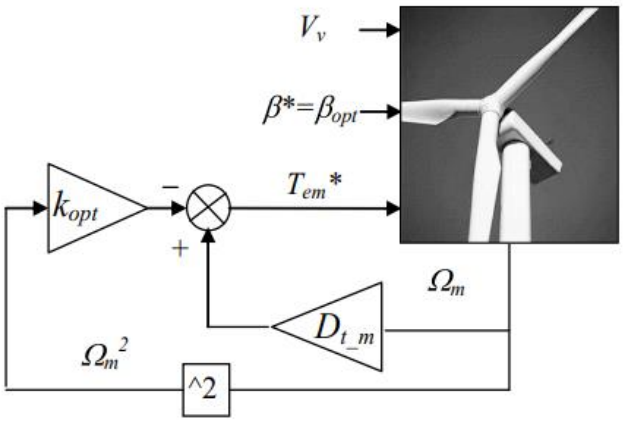


Figura 10. Control de velocidad indirecto.

Fuente: [5]

- **Controlador de velocidad directa**: El DSC rastrea la curva de potencia máxima más de cerca con una dinámica más rápida. Conociendo la definición de la relación de velocidad de punta λ, la velocidad de rotación óptima VSWT ω_{t_opt} se puede encontrar a partir de la velocidad del viento (V_v) [5].

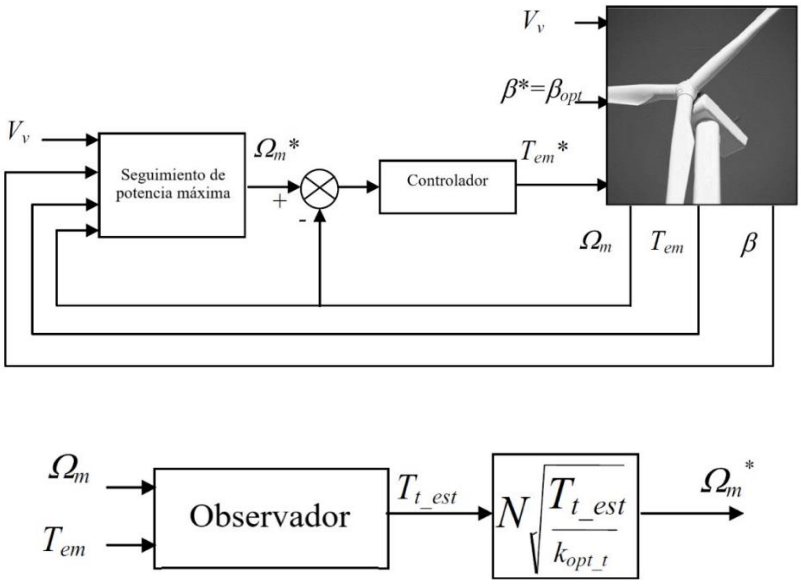


Figura 11. Control directo de velocidad.

Fuente: [5]

8.7.1.3. Región 4: Control de potencia

La estructura de control más común para controlar la turbina eólica en esta región se ilustra en la Figura 12. Aquí el par electromagnético se mantiene constante en su valor nominal.

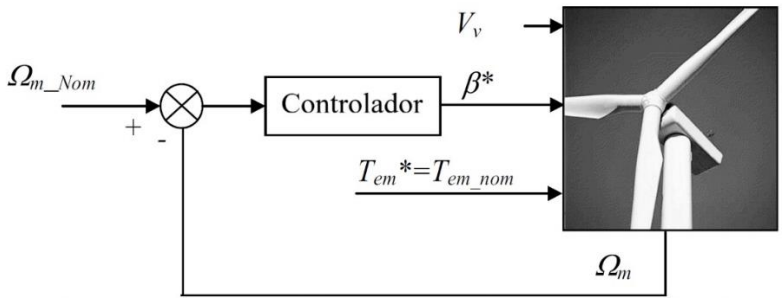


Figura 12. Control de potencia en la región 4.

Fuente: [5]

8.8. Estrategias de control de las potencias

8.8.1. Estrategias de control de potencia activa

8.8.1.1. Control con limitación de potencia por pérdida aerodinámica

El objetivo de la estrategia de control es de operar en bajas velocidades de viento, siguiendo la curva de máxima potencia.

A partir del punto de operación E la turbina funciona con velocidad de rotación fija, aumentando el torque electromecánico, hasta alcanzar el punto D que corresponde a la intersección de la característica de torque-velocidad de la máquina con la hipérbola que indica los puntos de operación de potencia nominal y el límite superior de todas las curvas de torque aerodinámico. Una vez alcanzado este punto, a medida que la velocidad del viento aumenta, la potencia generada disminuye. [10]

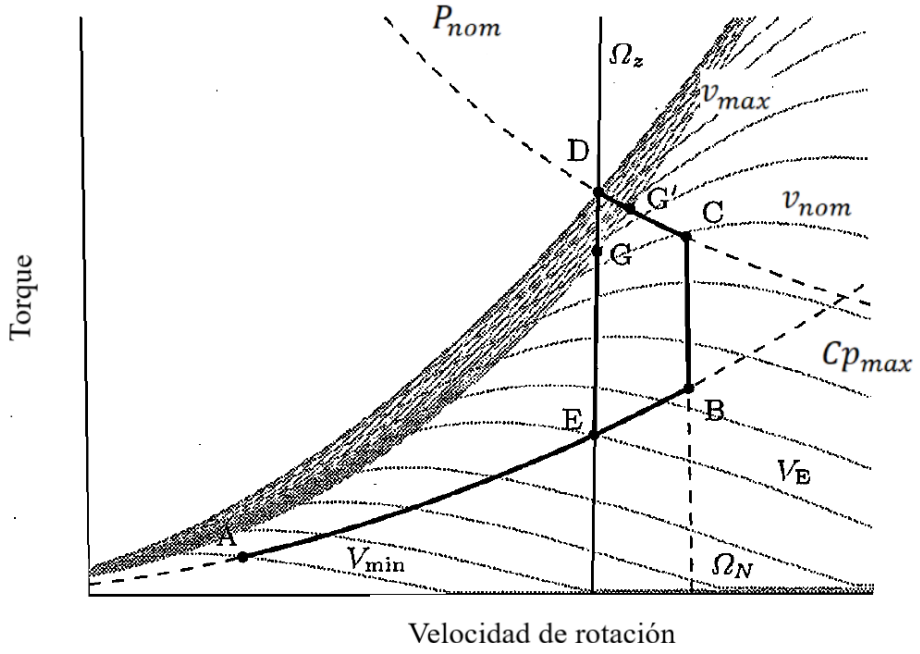


Figura 13. Estrategia control de potencia con ángulo de paso fijo**.**

Fuente: [11]

8.8.1.2. Control con limitación de potencia por pérdida aerodinámica asistida por control de velocidad

En esta estrategia el objetivo es que intervenga el control de la velocidad en condiciones de velocidades de viento altas para limitar la potencia generada, permitiendo así obtener una curva de potencia ideal.

8.8.1.3. Seguimiento del punto de extracción de máxima potencia (MPPT)

Este tipo de estrategia es conocido comúnmente por las siglas MPPT (Maximum Power Point Tracking). Para operar en el punto óptimo, bajo cualquier régimen de viento, se actúa directamente sobre la velocidad de rotación del rotor o indirectamente a través de la regulación de potencia activa del generador, suponiendo que el ángulo de paso para bajas velocidades de viento es por defecto el ángulo óptimo.

El punto óptimo, está dado por la razón de velocidad de punta óptima, y el ángulo óptimo. El ángulo de paso óptimo es generalmente cero, por lo que en la Región I se opera con ángulo de paso fijo, sin perjuicio de una operación eficiente [10].

8.8.2. Estrategias de control de potencia reactiva

8.8.2.1. Control de reactivos mediante RSC

En esta estrategia el objetivo es trabajar con un factor de potencia unitario en el GSC. Para la realización del control de reactivos se hace solamente a través de la excitación del rotor, la que es controlada por el RSC, con lo que varía la inyección o absorción de reactivos desde los devanados del estator de la máquina.

8.8.2.2. Control de reactivos mediante GSC

El control de reactivos mediante el GSC considera que en el estator de la máquina se opera con un factor de potencia constante, controlando la inyección o absorción de reactivos sólo a través del GSC. En el caso de este convertidor se prioriza el control de potencia activa, con el afán de mantener el voltaje del enlace de corriente continua constante.

8.8.2.3. Control de reactivos mediante RSC y GSC

Utilizando esta estrategia se puede aprovechar al máximo la capacidad del DFIG para controlar potencia reactiva. El control coordinado permite que ambos convertidores trabajen de forma conjunta para la obtención del factor de potencia requerido, sin que se produzcan flujos de reactivos indeseados. En este sentido la estrategia puede presentar algunos métodos de control que se mencionan a continuación: [10]

- Control por defecto del RSC: durante la operación normal del aerogenerador, el control de reactivos es efectuado solamente por el RSC, pero ante la presencia de perturbaciones o condiciones específicas que hagan que el RSC alcance el límite de corriente, el GSC se integra al control de reactivos para obtener un margen de operación más amplio.
- Control por defecto del GSC: durante la operación normal del aerogenerador, el control de reactivos es efectuado solamente por el GSC, pero ante la presencia de perturbaciones o condiciones específicas que hagan que el GSC alcance el límite de corriente el RSC se integra al control de reactivos para obtener un margen de operación más amplio.
- Control dividido: el control durante la operación normal, y ante contingencias o condiciones especiales, es efectuado por ambos convertidores, haciéndose cargo

el estator y el GSC sólo de un porcentaje preestablecido del total de potencia reactiva requerida. Por ejemplo, si se quiere que el estator y el GSC inyecten o absorban la misma cantidad de potencia reactiva en todo momento, entonces se establece que ambos aporten el 50% del total de reactivos solicitados. En caso de contar con convertidores del lado del rotor y del lado de la red de capacidad distinta, se podría otorgar porcentajes de control de reactivos proporcionales a su capacidad.

8.9. Convertidor back to back

Los aerogeneradores DFIG utilizan un convertidor back-to-back el cual está conectado entre los devanados del rotor y la red eléctrica. El convertidor controla una frecuencia variable de las corrientes del rotor al intercambiar energía entre el rotor y la red eléctrica. Por lo tanto, un DFIG puede operar a velocidad variable del rotor y controlar la salida de potencia real sin problemas. El convertidor también puede proporcionar potencia reactiva de manera flexible, reduciendo la tensión mecánica y la posible falla de los aerogeneradores. Durante una falla de la red, un DFIG puede permanecer conectado a la red mientras la potencia real se consume a través de la palanca y el interruptor de enlace de DC para evitar la sobretensión de DC o la sobrevelocidad del rotor. [12]

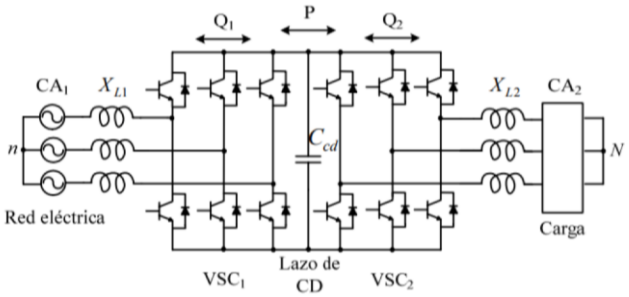


Figura 14. Convertidor Back-to-Back.

Fuente: [13]

8.9.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

Permite reducir la distorsión armónica, sobre todo comparado con el inversor de onda cuadrada, además que particularmente se centra en la reducción de los requisitos del filtro para reducir los armónicos, y controlar la amplitud de la salida. [14]

La señal de referencia, también llamada señal de modulación, se compara con un portador de triángulo simétrico. Cuando la señal de referencia es mayor que la portadora, el pulso

para el dispositivo de conmutación superior es alto (1), y el pulso para el dispositivo inferior es bajo (0). Para controlar un dispositivo de puente completo monofásico, puede seleccionar la modulación PWM unipolar o bipolar. La modulación unipolar produce una forma de onda de CA de mejor calidad, mientras la modulación bipolar produce una tensión de modo común de muy baja variación.

8.9.1.1. Técnicas de muestro de señal de referencia

Las técnicas para muestrear la señal de referencia, son natural, asimétrica y simétrico.

La técnica de muestreo natural modela el comportamiento de una implementación analógica de un generador de PWM, como se muestra a continuación en la figura 14 [15].

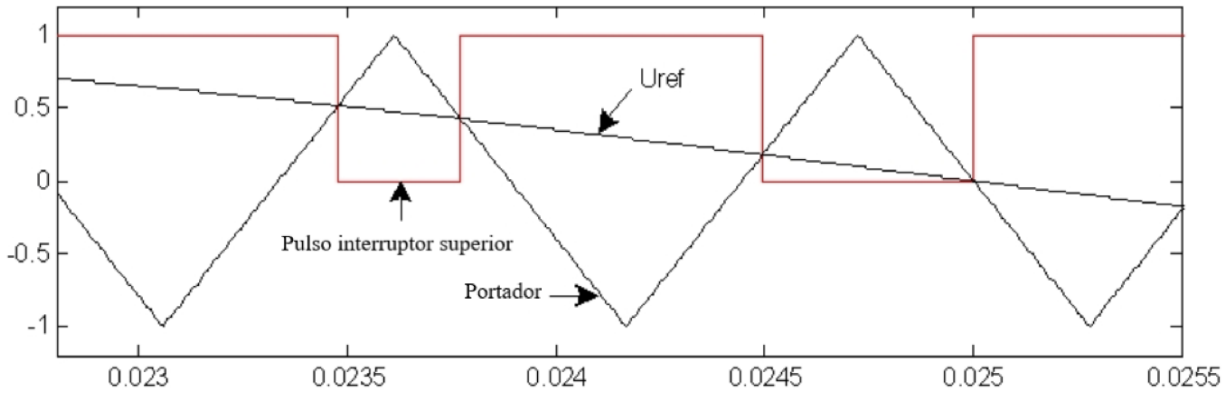


Figura 15. Muestreo Natural.

Fuente: [15]

La técnica de muestreo asimétrica se encarga de que la señal de referencia pueda muestrearse dos veces tanto en el valle como en el pico de la portadora, como se muestra a continuación en la figura 15:

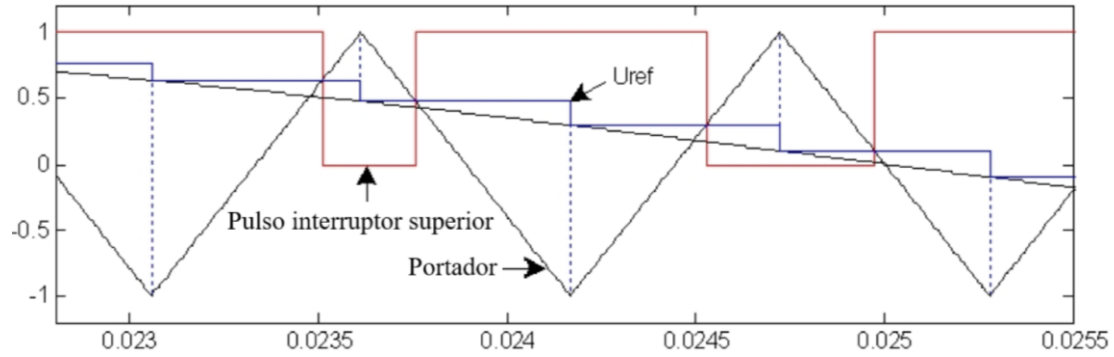


Figura 16. Muestreo asimétrico.

Fuente: [15]

La técnica de muestreo simétrico se encarga de que la señal de referencia pueda muestrearse una sola vez en el valle de la portadora, como se muestra a continuación en la figura 16.

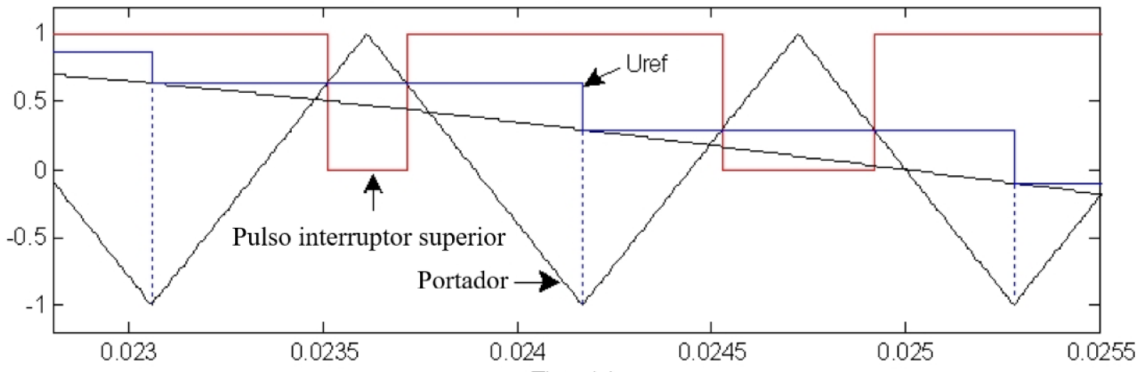


Figura 17. Muestreo simétrico.

Fuente: [15]

8.10. Control Lado del Rotor

8.10.1. Marco de referencia

En los sistemas DFIG se han desarrollado diferentes métodos de control, siendo el control de vectores uno de los más utilizados. El control de vectores del DFIG se realiza en un marco dq giratorio sincrónico, en el que el eje d está alineado, en este caso, con el vector espacial de flujo del estator, y debido a esta opción de alineación, la corriente directa del rotor es proporcional a la potencia reactiva del estator, y que la corriente del rotor en cuadratura es proporcional al par o la potencia activa del estator [16].

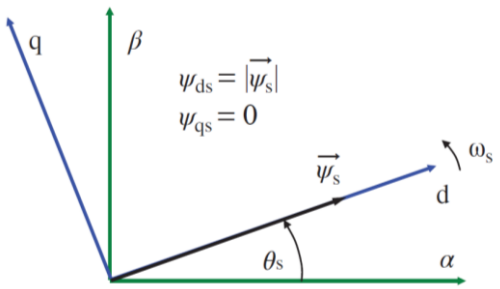


Figura 18. Marco de referencia dq de rotación síncrona alineado con el vector espacial de flujo del estator.

Fuente: [17]

8.10.2. Control Inner Loop

El control de lazo de corriente (interno) puede diseñarse dividiendo la ecuación de voltaje del rotor en componentes dq en términos de convención de generación y descuidando los transitorios de flujo del estator (en estado estable $d\Psi s / dt = 0$), como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} |\vec{\Psi} s| \qquad (13)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} |\vec{\Psi} s| \qquad (14)$$

Partiendo de las ecuaciones mencionas se crea el control de bucle del RSC. Se utiliza un controlador PI estándar ya que es adecuado para controlar tanto la amortiguación como el ancho de banda [18].

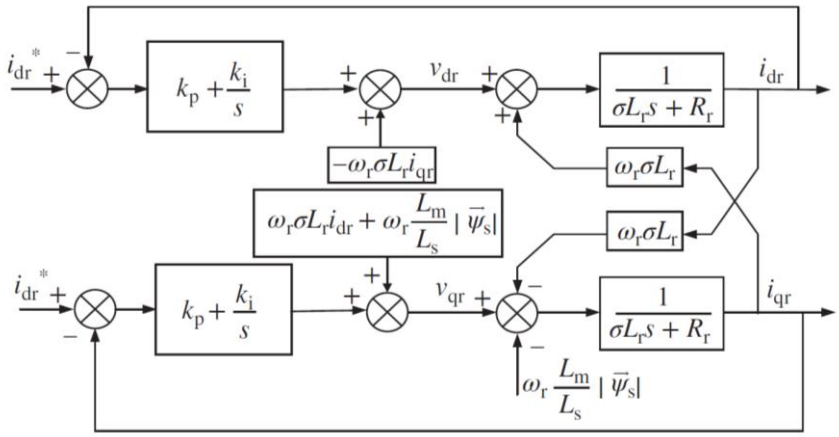


Figura 19. Control Inner Loop.

Fuente: [16]

Al anular los términos de acoplamiento, se eliminarían los efectos de los componentes d sobre el control de corriente (interno) del bucle q y los de los componentes q sobre el control de corriente del bucle d. Por lo tanto, se puede lograr un control rápido del bucle interno RSC. La efectividad de este método de anulación también está sujeta a la medición precisa de parámetros, errores y ruido [18].

En caso de pequeñas perturbaciones, los errores de no anulación podrían ignorarse ya que debería haber una pequeña influencia de la perturbación en la respuesta de control. En

cualquier caso, la anulación completa solo es teóricamente posible pero no prácticamente alcanzable [18].

8.10.3. Control Outer Loop

El cálculo del ángulo de flujo, se puede introducir el sistema de control completo. Esto significa que el componente de corriente del rotor q es proporcional al par, es decir, con iqr es posible controlar el par y, en consecuencia, la velocidad de la máquina si la aplicación lo requiere. Por lo tanto, ambos componentes de corriente del rotor nos permiten controlar independientemente el par y la potencia reactiva del estator. En la figura 19 se ilustra el control [19] .

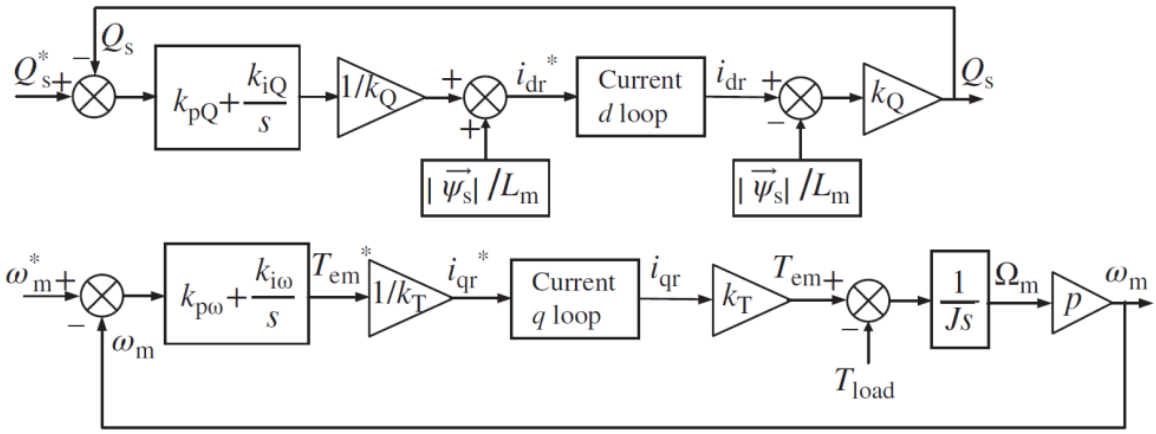


Figura 20. Control Outer Loop.

Fuente: [16]

Sin embargo, con el bucle Qs, es posible controlar la magnetización de la máquina, debido a que el estator de la máquina está conectado directamente a la red.

8.11. Control del Convertidor del Lado de la Red

Con esta estrategia de control, es posible alcanzar los dos objetivos principales del convertidor del lado de la red: el control del voltaje del bus de CD y la transmisión asegurada de energía a través del convertidor, con un intercambio controlado de potencia reactiva [20].

El convertidor del lado de la red (GSC) y el filtro intercambian con la red la potencia activa extraída o inyectada por el convertidor del lado del rotor. La frecuencia de salida

será constante. La potencia activa se controla indirectamente por medio del controlador de bus de CC y la potencia reactiva [20].

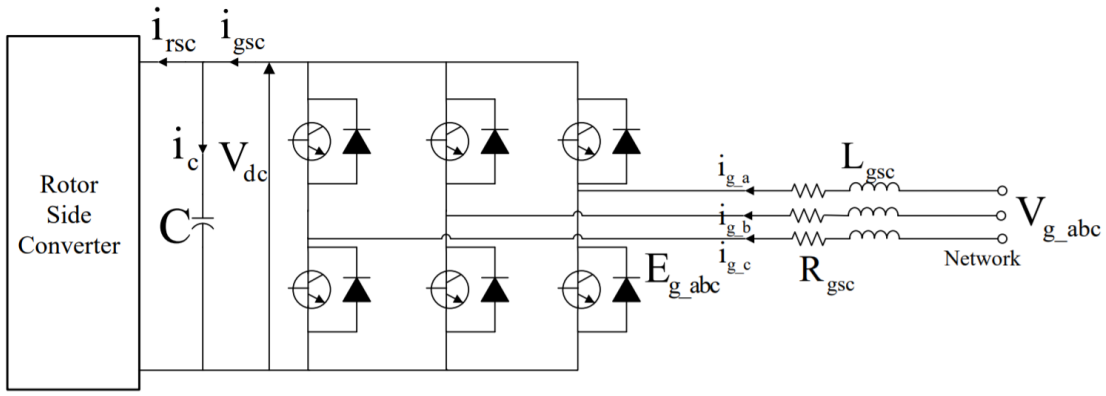


Figura 21. Control del convertidor del lado de la red.

Fuente: [21]

El balance de voltaje a través del inductor, Lgsc, se da por las siguientes ecuaciones:

$$V_{g_a} = R_{gsc} i_{g_a} + L_{gsc} p i_{g_a} + e_{g_a} \quad (15)$$

$$V_{g_b} = R_{gsc} i_{g_b} + L_{gsc} p i_{g_b} + e_{g_b} \quad (16)$$

$$V_{g_c} = R_{gsc} i_{g_c} + L_{gsc} p i_{g_c} + e_{g_c} \quad (17)$$

Donde L_{gsc}y R_{gsc}son la inductancia de acoplamiento y la resistencia a lado de la red respectivamente.

Usando las transformaciones abc a αβ (Clarke) y luego αβ a dq (Park), y resolviendo los diferenciales parciales, las ecuaciones 14,15 y 16 se convierten en un marco de referencia dq que gira en ω_s, siendo el suministro frecuencia angular, ω_s:

$$V_{g_d} = R_{gsc} i_{g_d} + L_{gsc} p i_{g_d} - \omega_s L_{gsc} i_{g_q} + e_{g_d} \quad (18)$$

$$V_{g_q} = R_{gsc} i_{g_q} + L_{gsc} p i_{g_q} + \omega_s L_{gsc} i_{g_d} + e_{g_q} \quad (19)$$

8.11.1. Control Inner Loop en el lado de la red

En el Inner Loop, las variables manipuladas son los voltajes en terminales del GSC y las variables controladas las corrientes del filtro. Siendo así el marco de referencia seleccionado el voltaje de red [22].

La selección de un controlador PI en el Inner Loop se da porque no se requiere de un control complejo, pues aquí no se trata de una linealización en sí, sino de un desacoplo; y la inclusión de una parte integral la cual es para eliminar el error en estado estable [18].

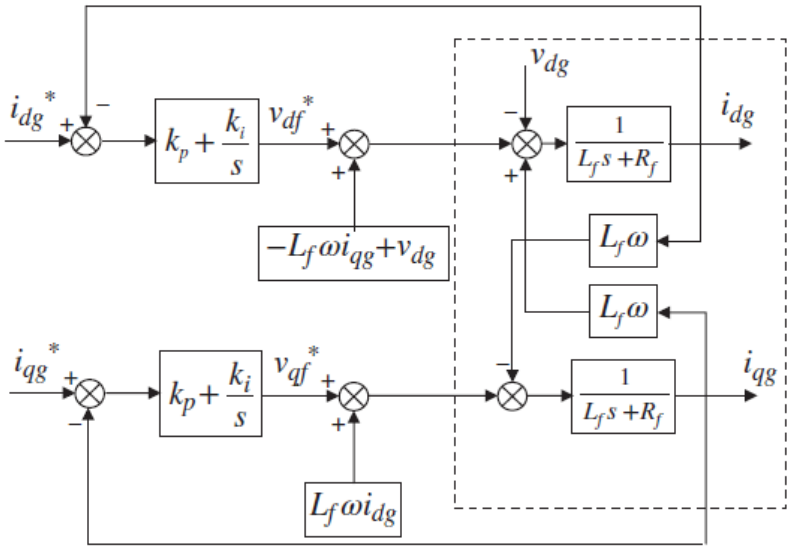


Figura 22. Inner Loop lado de la red.

Fuente: [16]

8.11.2. Control Outer Loop en el lado de la red

El lazo externo es el encargado de generar los valores de referencia de corriente para el lazo interno a partir de los valores del voltaje del bus CD y de la potencia reactiva deseada. Se parte del análisis del flujo de potencias entre el GSC, el bus de CD y el RSC. Para este lazo se toma en cuenta el lado del circuito de CD y las ecuaciones de las potencias del GSC en el marco de referencia dq, las cuales están regidas por las siguientes expresiones [23].

$$P_g = \frac{3}{2} V_{dg} i_{dg} = \frac{3}{2} |\vec{V}g| i_{dg} \ (W) \qquad (20)$$

$$Q_g = \frac{3}{2} V_{dg} i_{qg} = \frac{3}{2} |\vec{V}g| i_{qg} \ [VAr] \qquad (21)$$

Siendo así que para poder controlar la potencia activa se tiene que manipular la i_{dg} mientras que para la reactiva la i_{qg} .

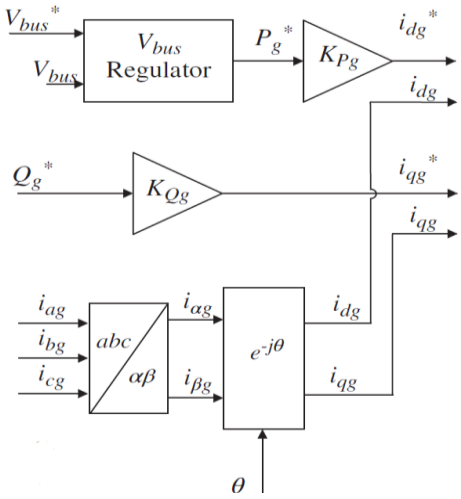


Figura 23. Outer loop lado de la red.

Fuente: [16]

9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

El diseño de control para la potencia activa y reactiva de un sistema de generación eólica usando una maquina doblemente alimentada permitirá ajustar las variables de estado y frecuencia a la barra infinita en presencia de cambios en la velocidad del viento.

10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Modalidades de la Investigación

El presente trabajo responde a la modalidad de investigación documental y de campo.

Investigación Documental: Se basa en el estudio que parte de la revisión de diferentes fuentes bibliográficas con el propósito de ampliar y profundizar diferentes enfoques, teorías, opiniones y recomendaciones del autor o los autores sobre el análisis de los sistemas de energía eólica usando máquinas de inducción doblemente alimentadas por medio de las fuentes primarias. Por medio de la cual se recopilará y se analizará toda la información teórica y analítica.

Niveles o Tipos de Investigación

Descriptivo: El tipo de investigación descriptiva permite definir el análisis, así como identificar las variables que se van a controlar y el método utilizado en sistemas de generación utilizando una máquina de inducción doblemente alimentada.

Técnicas de investigación

Observación: Es una técnica que permite tomar información y regístrala para su posterior análisis siendo un elemento fundamental de todo proceso investigativo llegando a obtener resultados de gran ayuda para la ejecución del proyecto.

Simulación: es una técnica que permite emplear modelos simplificados de un sistema además de reducir los tiempos de prueba, es por ello que para la simulación del sistema propuesto se desarrollará mediante el uso del software Simulink/Matlab, que permitirá diseñar y obtener diferentes resultados para un posterior análisis en base a los parámetros y condiciones definidos.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Simulación del control de potencia activa y reactiva de un aerogenerador DFIG

A continuación, se mostrará la implementación en el software Matlab/Simulink del modelado del control de potencia activa y reactiva para un aerogenerador con DFIG, ya que este tipo de aerogeneradores en la actualidad son ampliamente utilizados para usuarios de baja potencia hasta parque eólicos de alta potencia. Para el modelado de la turbina eólica se utiliza un control de ángulo de paso ($\beta = 0$), este tipo de control es el más usado para este tipo de turbinas, ya que al utilizar este control permite captar la potencia mecánica máxima de la turbina, esta se conecta al DFIG mediante un convertidor bidireccional (back to back) atrás vez de una barra de corriente continúa permitiendo realizar el control vectorial de la máquina de la potencia P y Q que se entregara a la red como se observa en la figura 24:

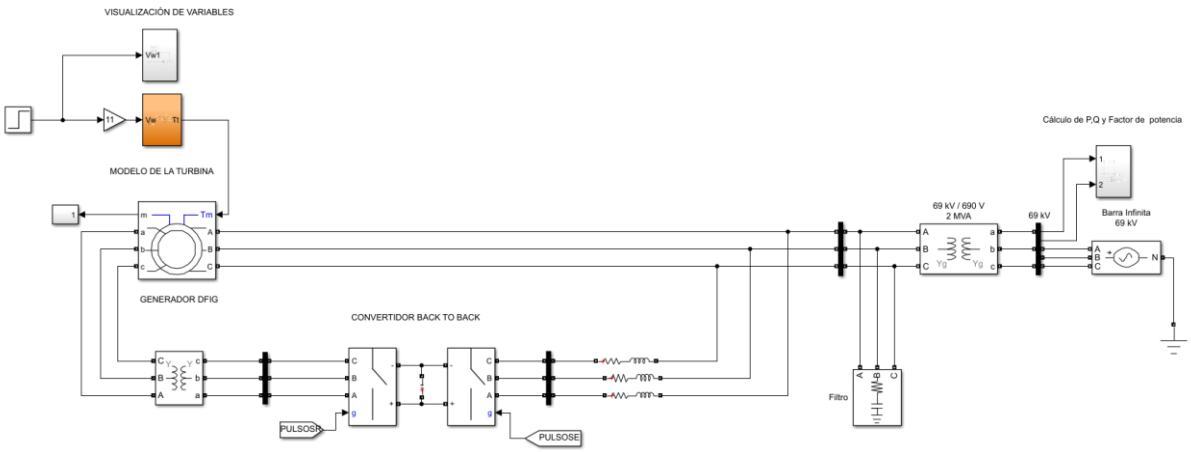


Figura 24. Aerogenerador de velocidad variable con una máquina de inducción doblemente alimentada (DFIG)

Fuente: Los Autores

Modelo de la Turbina Eólica

En el modelado de la turbina se considera la extracción de la potencia del rotor , para el cálculo del par o torque mecánico en función de la velocidad del viento que actúa sobre las palas, es por ello las entradas para este modelo son la de la velocidad del viento (V_w) y la velocidad del rotor ($omega_m$), mientras que la salida es el torque generado en el rotor T_t. En este modelo cuando $\beta = 0°$ se obtiene el máximo coeficiente de potencia, siendo así que no se considere β (ángulo de inclinación de las palas) como entrada, como se muestra en la figura 25.

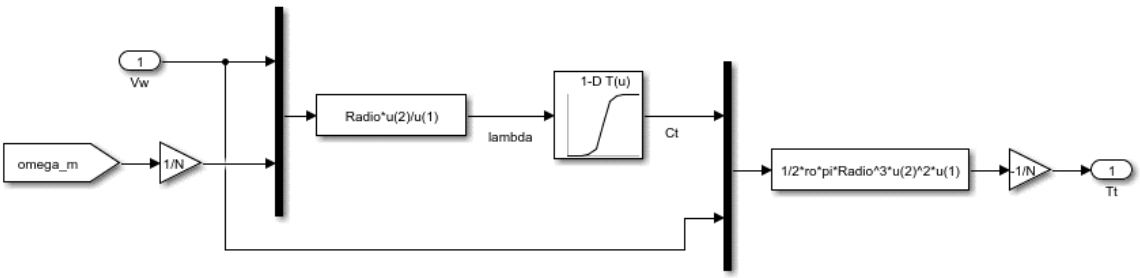


Figura 25. Modelo de la Turbina**.**

Fuente: Los Autores

Además, para esta turbina se han utilizados los siguientes datos:

Tabla 2: Parámetros de turbina.

Potencia mecánica nominal	2 [MW]
Velocidad nominal del viento	11 [m/s]
Potencia mecánica nominal p.u.	1.0
Velocidad rotacional base p.u.	1.0
Ángulo de inclinación	0
Tipo de eje	Horizontal
Numero de palas	3
Radio	42 [m]
RPM mínimos	9
RPM nominal	16.9
Velocidad mecánica del rotor	1.885 [rad/s]
Área del barrido	5541.76 $[m^2]$
Densidad del aire	1.225 $\left[{}^{Kg}/_{m^3}\right]$

Fuente: Los Autores.

Para el cálculo de la velocidad de punta de la pala λ viene definido por la ecuación 5, para el coeficiente de Torsión C_t se desarrolla un lazo que calcula de manera iterativa el valor de este dependiendo de los diferentes valores de λ, esto se observa en el script desarrollado en el anexo 1, en el mismo se crea la variable C_t y para el torque generado se lo calcula con la ecuación 6:

$$\lambda = \frac{R*\omega_t}{V_v} \qquad T_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 {V_v}^2 C_t$$

$$P_t = \frac{1}{2}\rho * V_v^3 * A * C_p \qquad \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + k_8 * \beta} + \frac{k_9}{\beta^3 + 1}}$$

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} \qquad C_p = k_1\left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3\beta - k_4\beta^{k_5} - k_6\right)\left(e^{k_7/\lambda_i}\right)$$

La turbina de velocidad variable será evaluada en el siguiente rango de velocidades dentro de sus límites permitidos de velocidad mínima y velocidad máxima de viento.

Tabla 3: Velocidades de viento aleatorias

V(m/s)	7,8	8,5	9,2	10,5	11

Fuente: Los Autores

Este tipo de turbina de velocidad variable opera en un rango de velocidades desde 9 rpm hasta 25 rpm que es la velocidad máxima, con las ecuaciones anteriores y los distintos valores de viento de la tabla 3 se hallan los valores de λ, λ_i, C_p y P_t, hay que recalcar que para calcular λ_i y C_p esta tu turbina utiliza los coeficientes detallados en la tabla 4, estas constantes varían si la turbina es de velocidad fija o velocidad variable :

Tabla 4: Coeficientes de la Turbina.

Coeficientes	Valor
k_1	0,73
k_2	151
k_3	0,58
k_4	0,002
k_5	2,14
k_6	13,2
k_7	18,4
k_8	-0,02
k_9	-0,003

Fuente: Los Autores

Tabla 5: Parámetros de la Turbina con distintos valores de Viento.

$V_v(m/s)$	λ	λ_i	C_p	P_t (MW)
7,8	10,15	9,85	0,240	0,387
8,5	9,31	9,06	0,332	0,692
9,2	8,61	8,38	0,391	1,033
10,4	7,61	7,44	0,437	1,667
11	7,20	7,04	0,441	1,993

Fuente: Los Autores

En la tabla 4 se presentan los parámetros calculados para λ, λ_i, C_p y P_t, teniendo una ángulo de ataque de $\beta = 0$, se puede observar que la velocidad apropiada para obtener la potencia mecánica nominal de la turbina de cercana a $2\,MW$ es de $11\,m/s$, el valor del $C_{pmáx}$ seria 0,44 y un λ_{opt} de 7,20.

Tabla 6: Valores de C_p y P_t a diferentes valores de beta.

V_v(m/s)	λ	β	C_p	P_t (MW)
11	7,20	0	0,441	1,993
		3	0,334	1,552
		5	0,279	1,262
		7	0,216	0,975
		10	0,121	0,548

Fuente: Los Autores

En la tabla 6 se observa los diferentes valores de C_p y P_t cuando se tiene una V_v de $11\,m/s$ y se va variando β, conforme se va a aumento β el C_p y P_t tiende a disminuir, por ende, el valor de β óptimo es de 0.

Máquina de Inducción Doblemente Alimentada (DFIG)

Para el desarrollo de este proyecto se ha utilizado el modelo de una máquina de Inducción la cual se encuentra en la biblioteca (Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Machines).

Este tipo de maquina puede operar en distintos modos como freno, motor y generador [24],como se detalla en el anexo 3, el modo de operación dependerá de la señal de entrada del torque mecánico para nuestro caso esta señal será negativa para que funcione como generador.

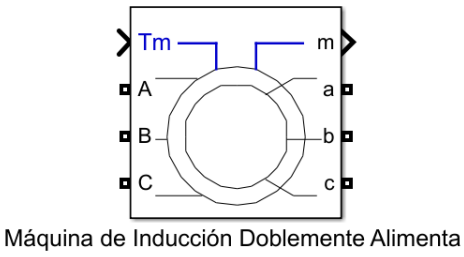


Figura 26. Máquina de Inducción**.**

Fuente: [25]

Los parámetros de la máquina de inducción están sujetos al de la turbina de 2MW como se muestra en la tabla 4.

Tabla 7: Parámetros de la Máquina de Inducción.

Potencia Nominal (P_n)	2	[MW]
Tensión de línea a línea (V_n)	690	[V]
Frecuencia (f)	60	[Hz]
Resistencia del estator (R_s)	0.0026	[Ω]
Inductancia de fuga del estator (Ll_s)	0.000087	[H]
Resistencia del estator (R_r)	0.0029	[Ω]
Inductancia de fuga del Rotor (Ll_r)	0.000087	[H]
Inductancia de magnetización (L_m)	0,0025	[H]
Inercia (J)	127	[kg.m^2]
Factor de Fricción (D)	0,001	[N.m.s]
Par de polos	2	

Fuente: Los autores

De este bloque salen dos señales, la primera es la velocidad de Rotor $(omega_m)$ y la segunda el torque electromagnético (Tem); la multiplicación de estos términos muestra la potencia generada por la máquina como se observa en la figura 27 teniendo en cuenta que la entrada de viento es tipo escalón de $11m/s$ produciendo en p.u. 2 MW.

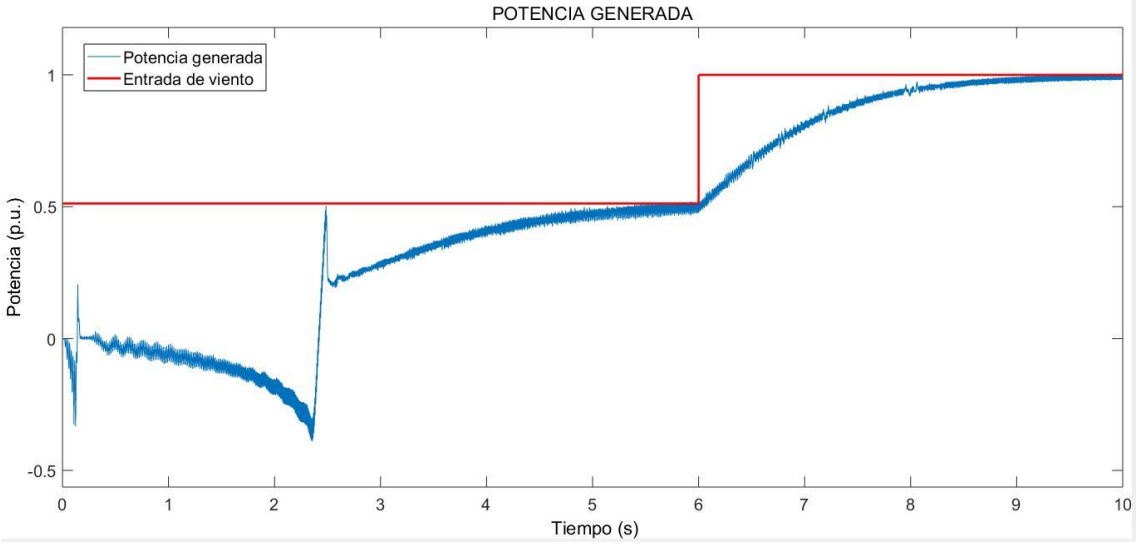


Figura 27 Curva de potencia de Salida en por unidad**.**

Fuente: Los autores

En la figura 28, se muestra las curvas de torque electromagnético y la velocidad del rotor, como se mencionó anterior mente el torque mecánico será negativo para que funcione como generador el cual tiene un valor $-1{,}05 * 10^4\ N * m$ considerando que la velocidad de la máquina será menor siempre que exista mayor número de polos.

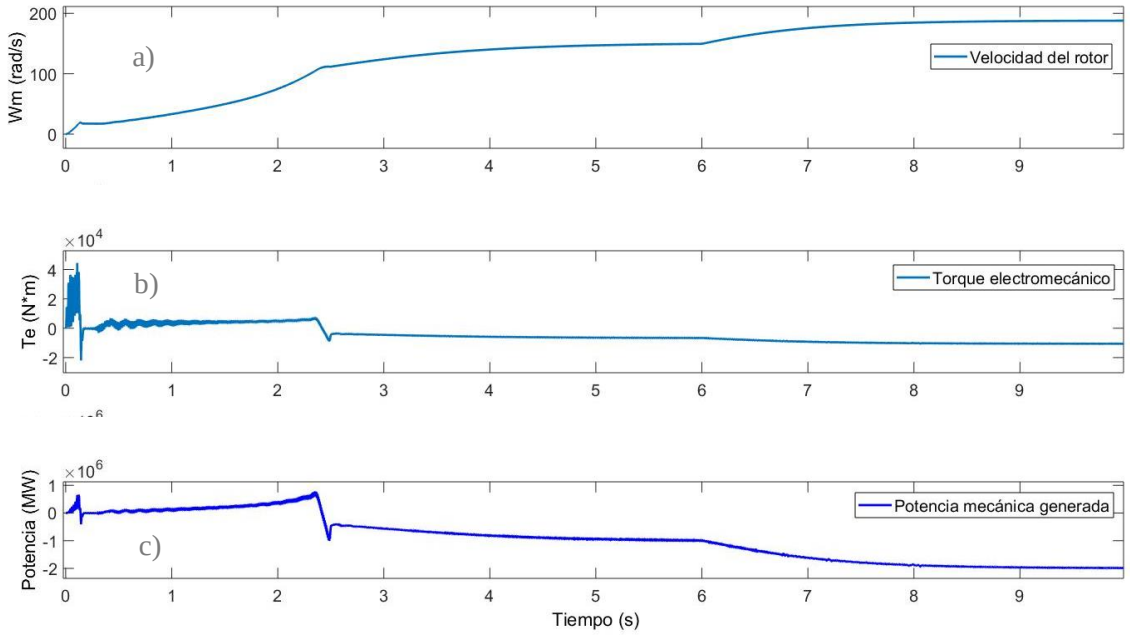


Figura 28. a) Velocidad del Rotor, b) Toque electromecánico y c) Potencia mecánica generada.

Fuente: Los autores

Control en el Lado del Rotor

En la figura 29 se presenta el diagrama de bloques del control de lado del rotor, las entradas para este control son: corriente en el eje d de referencia, las corrientes medidas en el rotor, voltaje del estator, el ángulo del rotor y la velocidad del rotor.

Este control está compuesto por el diagrama de bloques del seguimiento del punto de extracción de máxima potencia (MPPT), control PLL, control Outer Loop e Inner Loop, un bloque de transformación de corrientes a voltajes en los ejes dq0, transformadas inversas de Clark y de Park, obteniendo así a su salida los voltajes de referencia en el sistema abc necesarios para el accionamiento PWM del lado del Rotor.

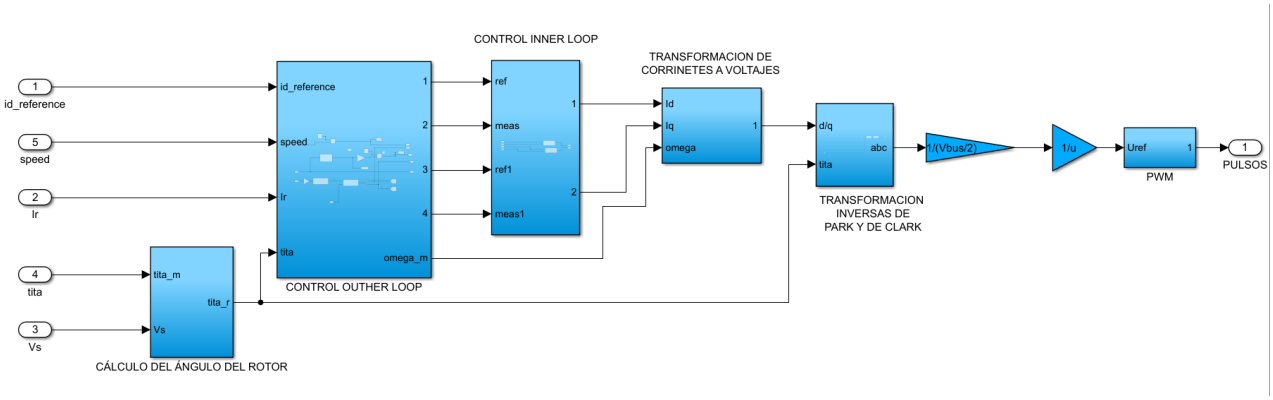


Figura 29 . Diagrama de bloques del control de lado del Rotor

Fuente: Los autores

A continuación, se detallará cada uno de los bloques mencionados en el control del lado del rotor.

Máximo Power Tracking (MPPT)

En el bloque MPPT tiene el propósito de hacer que el par aerodinámico siga la curva de potencia máxima en respuesta a las variaciones del viento, tomando como entrada la variable de velocidad del rotor, la cual se le llevara a elevarse al cuadrado para multiplicarle con el bloque en el cual se encuentra la constante de estrategia de control que viene dada desde el script del anexo 1, dividiendo este valor para la relación de caja de cambios elevada al cuadrado para obtener nuestro para electromagnético de referencia, como se muestra en la figura 30.

La ecuación implementada en el diagrama de bloques se obtiene de la siguiente manera:

$$\omega_{ref}(u) = \frac{\lambda_{opt}(u)}{R}$$

$$P_{max} = \frac{1}{2}\rho\pi\, R^5 \frac{C_{p_max}}{\lambda_{opt}^3} * (\omega_{ref}(u))^3$$

Siendo que el par aerodinámico extraído por la turbina está dado por:

$$T_t = -\frac{1}{2}\rho\pi\, R^2 \frac{R^3 {\omega_t}^2}{\lambda_{opt}^2} \frac{C_{p_max}}{\lambda_{opt}}$$

Obtenido así,

$$k_{opt_t} = \frac{1}{2}\rho\pi\frac{R^5}{\lambda_{opt}^3}C_{p_max}$$

$$T_t = -k_{opt_t}{\omega_t}^2$$

Siendo,

$$\omega_t = \frac{\omega_m}{N}$$

Dando como resultado mi ecuación final:

$$T_t = -\frac{k_{opt_t}{\omega_m}^2}{N^2}\ [Nm]$$

En la figura 30, se puede apreciar la implementación de la ecuación en un diagrama de bloques.

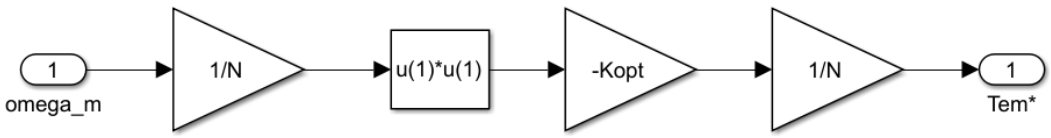


Figura 30. Diagrama de bloques del MPPT

Fuente: Los autores

Corrientes del rotor en el eje dq0

Transformación de los ejes ABC a dq0

Para obtener la señal medida de id e iq será necesario realizar una transformación a partir de las corrientes medidas del rotor abc, primeramente, al sistema $\alpha\beta\gamma$, mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

La cual se implementa en el diagrama de bloques, como se observa en la figura 31.

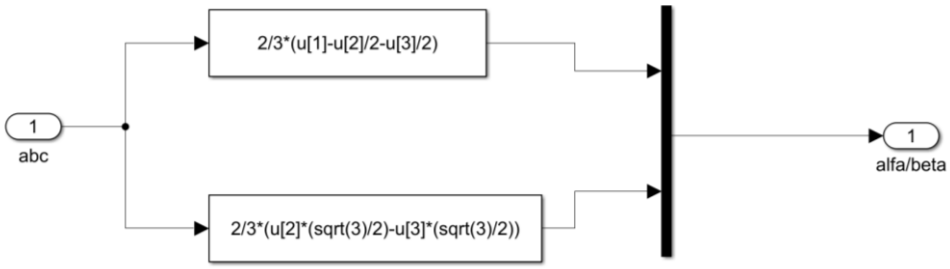


Figura 31. Transformación de los ejes ABC a $\alpha\beta\gamma$.

Fuente: Los autores

Cálculo del ángulo del rotor

Para poder realizar la transformación de las corrientes de $\alpha\beta\gamma$ a dq0 será necesario uso del ángulo θr, teniendo en cuenta que una vez que el PLL logra la sincronización con el voltaje del estator, el ángulo de fase del flujo del estator se obtiene simplemente restando 90 grados del ángulo del estator, para la obtención de θr viene dado mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_r = (\theta_s - 90°) - (\theta_m * p)$$

Implementando la ecuación en un diagrama de bloques como se puede apreciar en la figura 32.

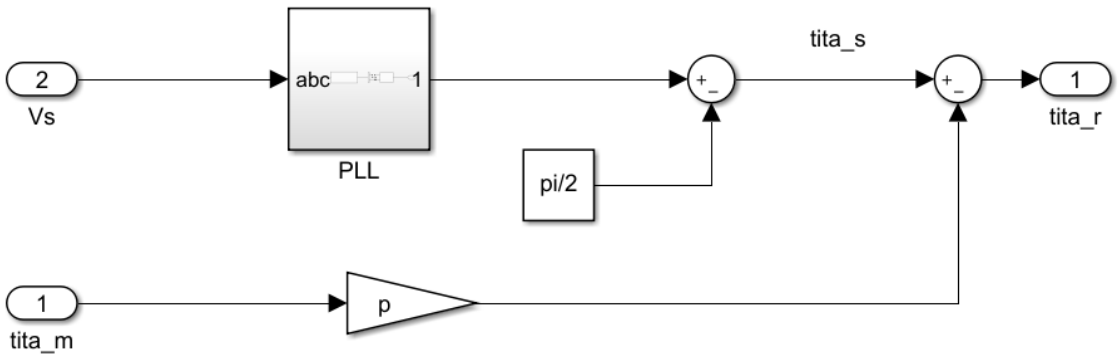


Figura 32. Diagrama de bloques para la obtención de θr.

Fuente: Los autores

Control PLL del convertidor del lado del rotor

El control PLL es el que permite la sincronización con el voltaje de la red y viene dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_s = tan^{-1}\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right)$$

Para realización del control PLL es necesario primero realizar la transformación de las tensiones del estator del sistema abc al sistema $\alpha\beta\gamma$, mediante la transformada de Clark la cual bien dada por la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

La cual se encuentra implementada en la figura 33.

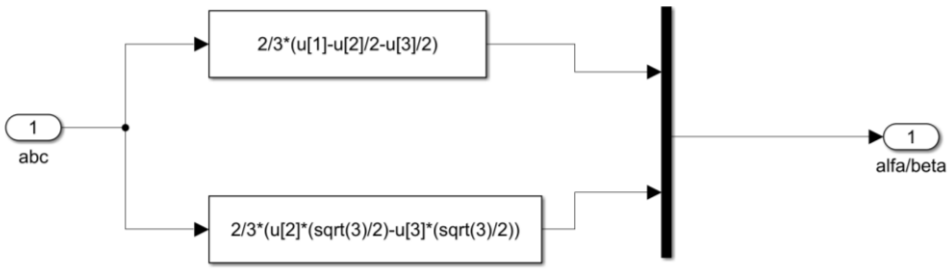


Figura 33. Transformación de los ejes ABC a $\alpha\beta\gamma$.

Y finalmente aplicar la inversa de la función tangente, siendo el diagrama final del control PLL el que se puede apreciar en la figura 34.

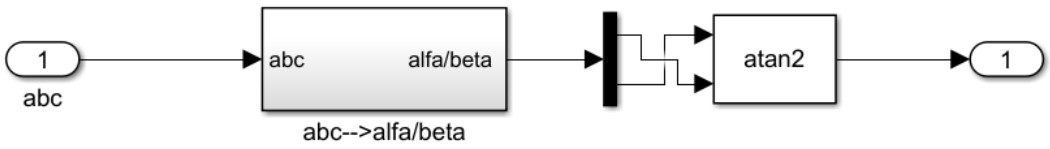


Figura 34. Control PLL del lado del rotor

Fuente: Los autores

Después de encontrar ángulo del rotor se realiza la transformación del eje $\alpha\beta\gamma$ a dq0 como se observa en la figura 35.

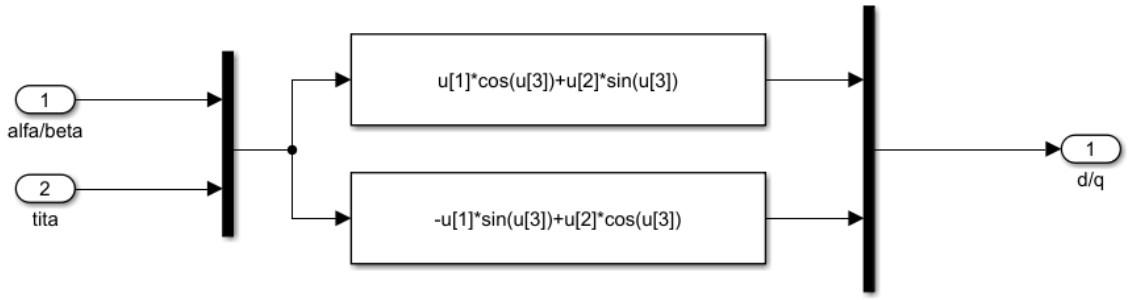


Figura 35. Transformación de $\alpha\beta\gamma$ a dq0.

Para obtener la transformación que se observa en la figura 35, se detalla la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta & 0 \\ -sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix}$$

Obtenido así las corrientes en el eje sistema dq.

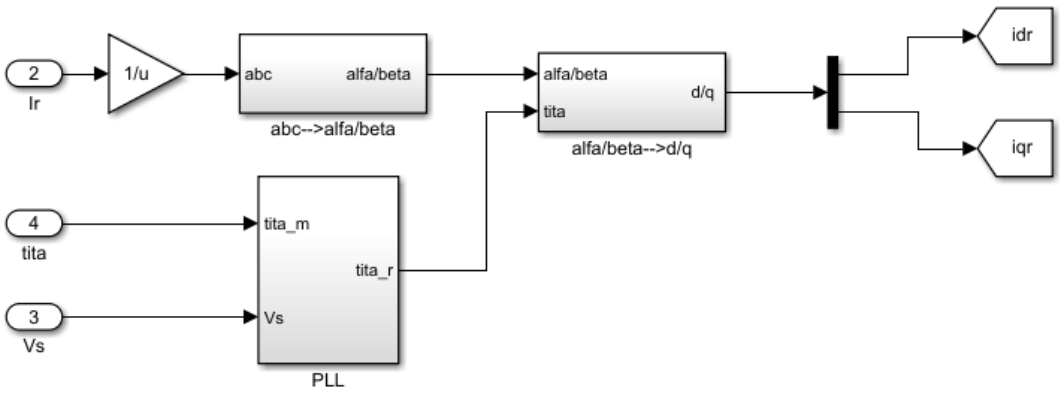


Figura 36. Diagrama de bloques para la obtención de idr e iqr.

Fuente: Los autores

Control Outer Loop del lado del rotor

Este control toma como entradas las 5 variables mencionadas anteriormente, permitiendo la obtener las corrientes en el sistema dq y las corrientes de referencia de la máquina en el mismo sistema, las cuales son necesarias para realizar el control Inter Loop como se puede apreciar en la figura 37.

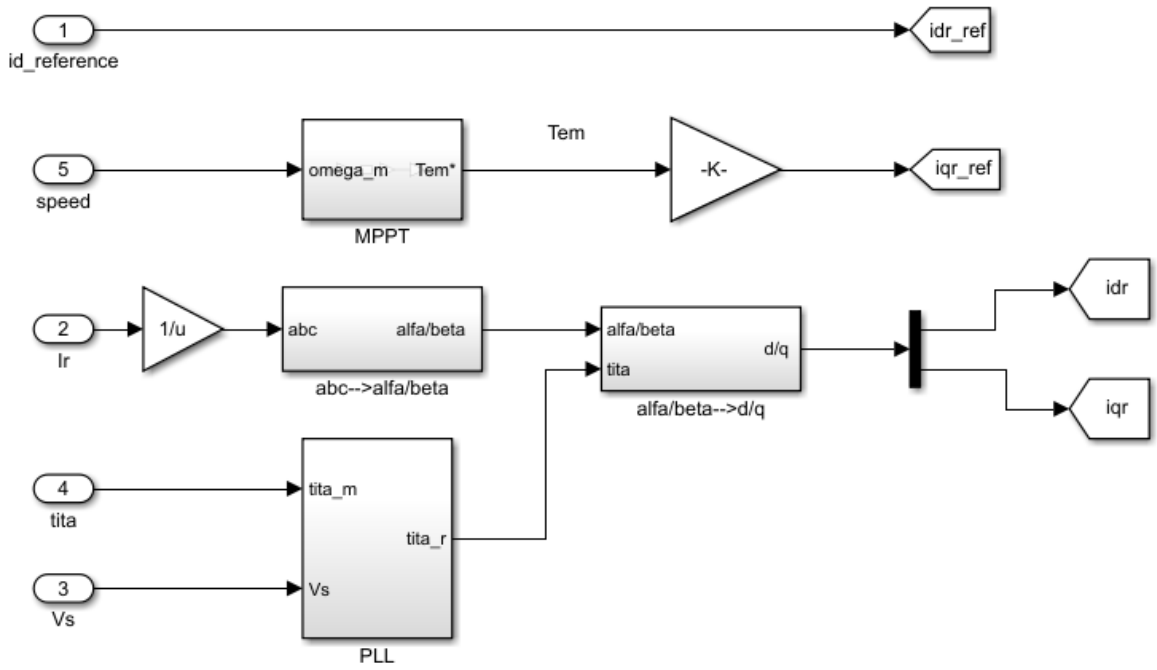


Figura 37. Control Outer Loop en el lado del Rotor

Fuente: Los autores

Para obtener la señal iq de referencia, se debe multiplicar el valor del par electromagnético obtenido en el bloque MPPT por el bloque de ganancia el cual tiene la variable que se describen en el Script del anexo 1, en donde se encuentra especificada la siguiente ecuación:

$$K = -\frac{3}{2}\omega_S \frac{L_m}{L_s}|\overline{\Psi_s}|$$

Control Inner Loop del lado del rotor

En el control Inner Loop las variables de entrada son las corrientes generadas por el rotor de la máquina en el eje Idq. Para el caso del controlador en la corriente id, la ganancia proporcional será kp_id y para la parte integradora ki_id, como se muestra en la figura 38.

Para hallar los valores de ki y kp, a continuación, se detalla el proceso:

$$\sigma = \frac{1 - L_m^2}{(L_s * L_r)} = \frac{1 - (0.0025)^2}{(0.0026 * 0.0026)} = 0.0661$$

$$\tau_i = \frac{\sigma * L_r}{(L_s * R_r)} = \frac{0.0661 * 0.0026}{0.0026 * 0.0029} = 0.0590$$

$$\omega_n = 100 * \frac{\frac{1}{\tau_i}}{(5)} = 100 * \frac{\frac{1}{(0.0590)}}{(5)} = 339.0341 \left[\frac{rad}{s}\right]$$

$$kp_{id} = 2\omega_n \sigma L_r - R_r = (2) * (339.0341) * (0.0661) * (0.0026) - (0.0029)$$

$$kp_{id} = 0.1131$$

$$kp_{id} = kp_{iq}$$

$$ki_{id} = \omega_n^2 \sigma L_r = (339.0341)^2) * (0.0661) * (0.0026)$$

$$ki_{id} = 19.6640$$

$$ki_{id} = ki_{iq}$$

Obteniendo así:

Tabla 8: Constantes para el Inner Loop de la corriente en el eje d.

$\boldsymbol{kp_{id}}$	0.1131
$\boldsymbol{ki_{id}}$	19.6640

Fuente: Los autores

Y para la corriente iq la ganancia proporcional será kp_iq y para la parte integradora ki_iq, como se muestra en la figura 38, Obteniendo los valores que se muestran en la tabla 9.

Tabla 9: Constantes para el Inner Loop de la corriente en el eje q.

$\boldsymbol{kp_{iq}}$	0.1131
$\boldsymbol{ki_{iq}}$	19.6640

Fuente: Los autores

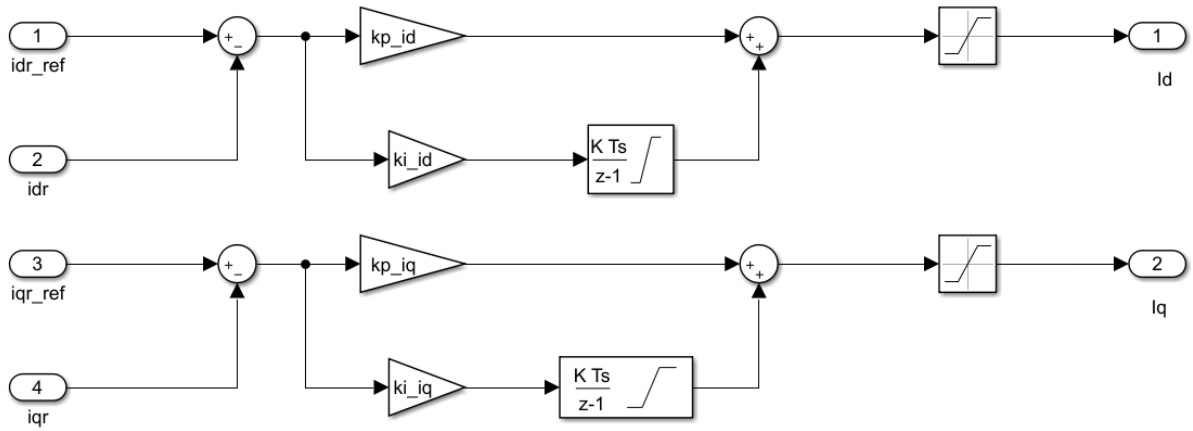


Figura 38. Inner Loop del lado del rotor

Fuente: Los autores

El bloque de saturación se coloca para mantener el torque de referencia en los límites de la máquina.

En la figura 39 se puede apreciar el seguimiento de la referencia de corriente entregada por el control Inner Loop.

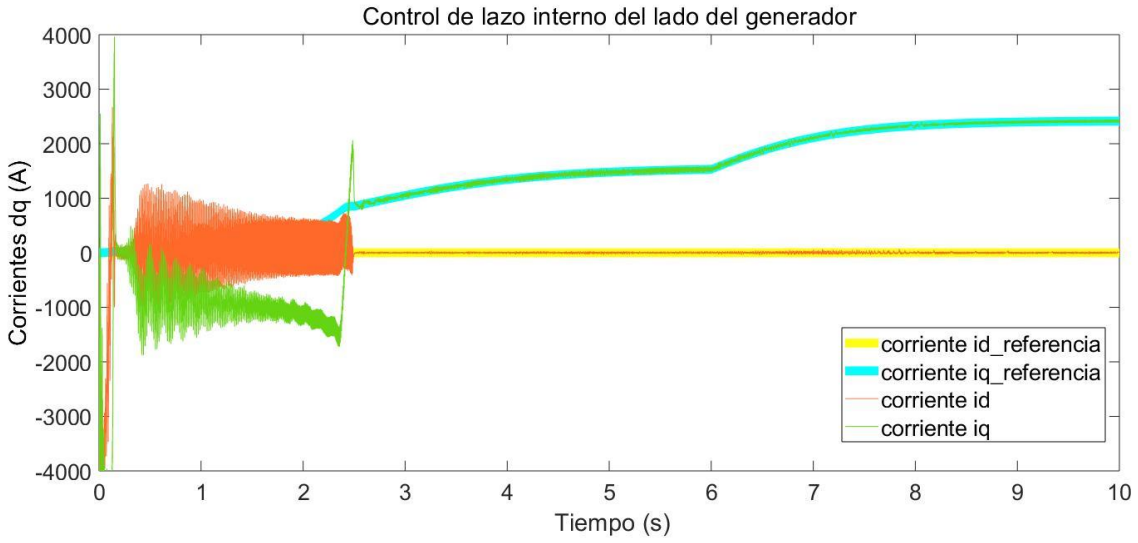


Figura 39. Señales de las corrientes id e iq y las corrientes de referencia en el eje dq

Fuente: Los autores

Transformación de las Corrientes dq a voltajes dq

Para la transformación es necesario tener como entradas la frecuencia, las corrientes generadas por la maquina Id e Iq, las corrientes de referencia generado por el Inner Loop,

así como el flujo del estator y la velocidad de la máquina, obteniendo a la salida los voltajes en el eje dq, como se aprecia en la figura 40.

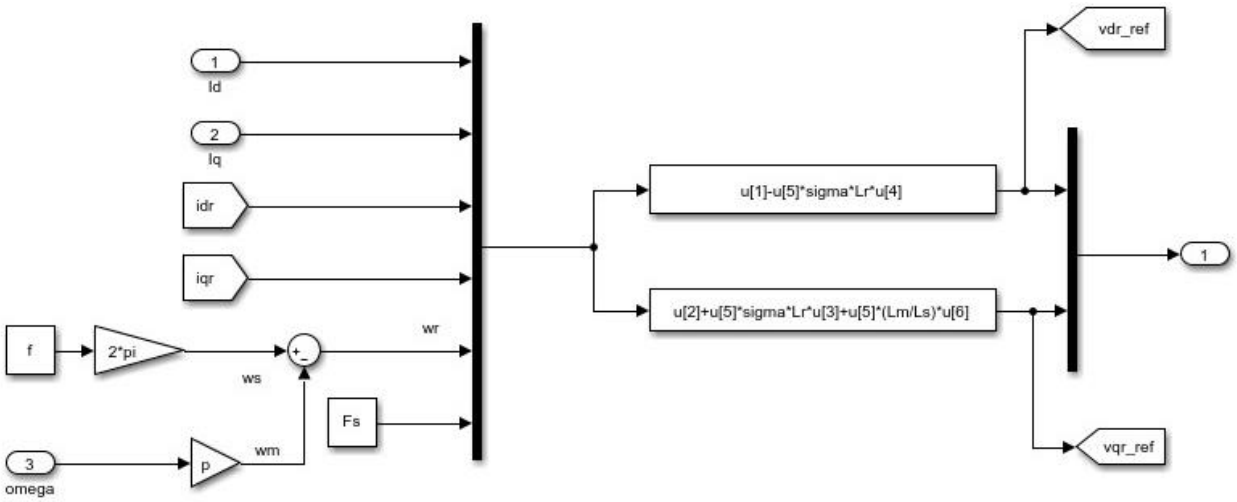


Figura 40. Transformación de las corrientes dq a voltajes dq

Fuente: Los autores

Teniendo en cuenta que para la obtención de los voltajes en el eje dq se debe introducir las siguientes ecuaciones en el bloque de funciones:

$$v_d = i_d - \omega_r \sigma L_r i_{qr}$$

$$v_q = i_q + \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r |\overline{\Psi_s}| \frac{L_m}{L_s}$$

Transformada de Park inversa

Después de realizar la transformación de las corrientes dqo a voltajes dqo es necesario regresar a la referencia abc, por lo que se aplica la transformada de Park inversa, la cual se realiza en dos partes, primero transformando del sistema de referencia dqo al sistema $\alpha\beta\gamma$ como se muestra en la figura 41.

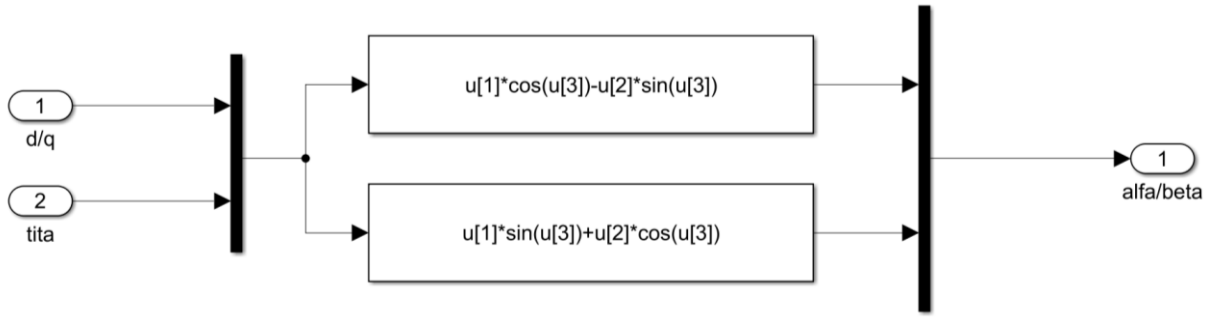


Figura 41. Transformación del sistema dq0 al sistema $\alpha\beta\gamma$.

Fuente: Los autores

El primer bloque de la transformada inversa de park está determinada por la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & 0 \\ sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix}$$

Obtenido el sistema $\alpha\beta\gamma$ se transforma al sistema abc, por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} \qquad [V]$$

La implementación de la ecuación anterior se muestra en la figura 42.

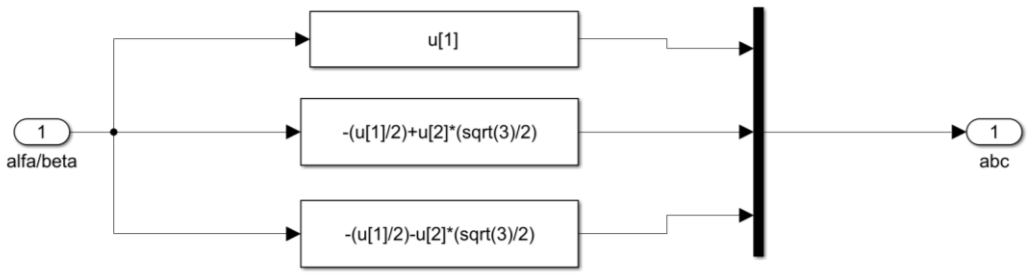


Figura 42. Transformación del sistema $\alpha\beta\gamma$ al sistema abc.

Fuente: Los autores

Modulación de ancho de pulsos (PWM)

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó un bloque PWM Generator (2_Level) el cual se encuentra en la biblioteca: Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Control & Measurements / Pulse & Signal Generators.

En la figura 43 se puede apreciar el bloque encargado del accionamiento de los dispositivos de potencia que conforman el puente de la VSC configurándole para un puente trifásico. El funcionamiento principal de este bloque es el de comparar la onda de referencia con la onda portadora de la siguiente manera:

- La onda de referencia > onda portadora, la salida de conmutación será alta o (1).
- La onda de referencia < onda portadora, la salida de conmutación será baja o (0).

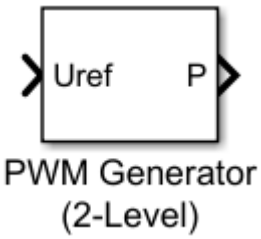


Figura 43. Bloque PWM Generador de Pulsos

Fuente: [26]

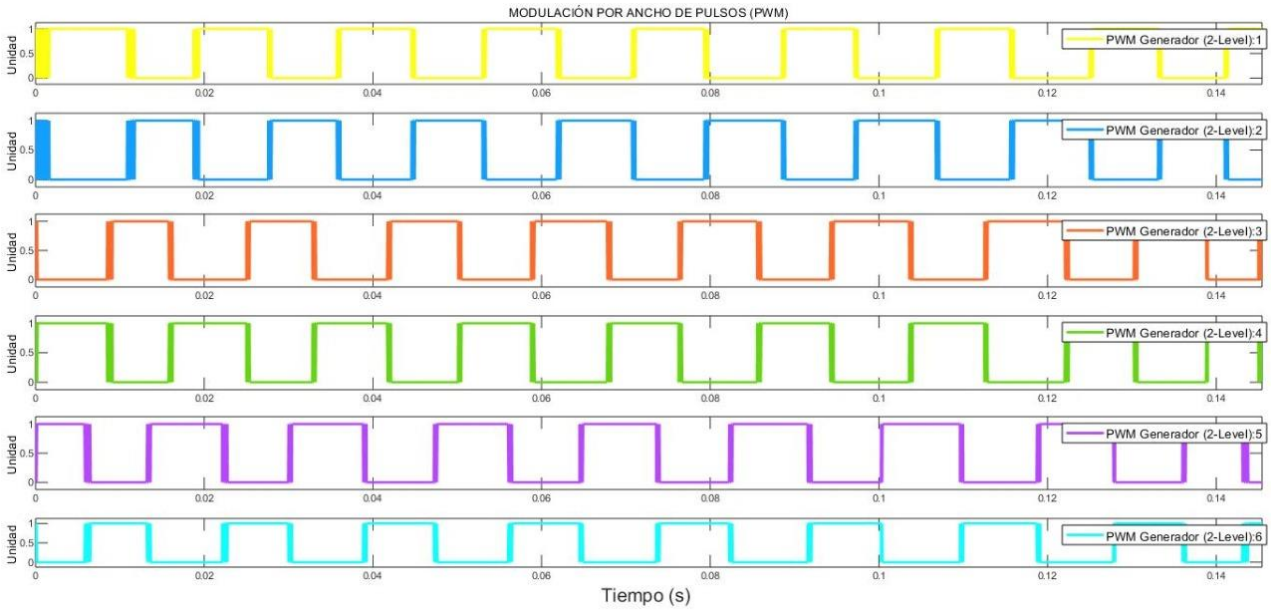


Figura 44. Pulsos generados por el PWM que ingresan al Convertidor

Fuente: Los autores

En la figura 44 se presentan los pulsos que son determinados por el PWM, de acuerdo con la condición de la onda portadora y la onda de referencia.

En la figura 45 se presenta el esquema de control del lado del rotor:

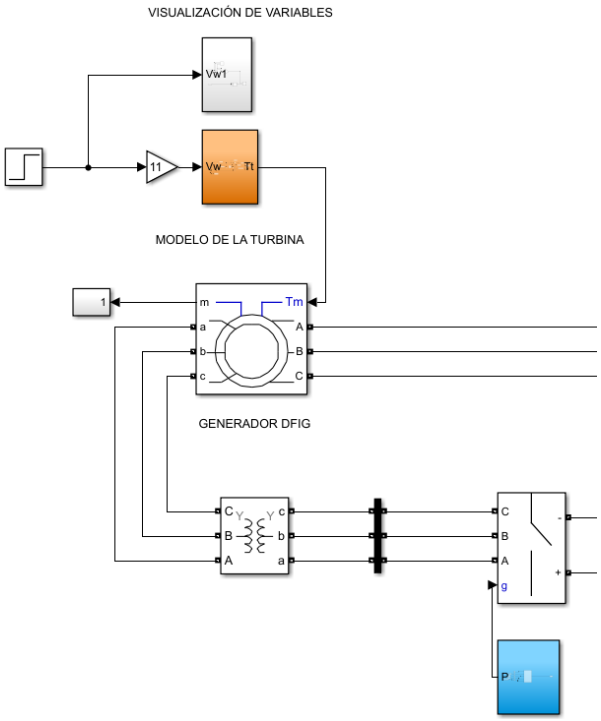


Figura 45. Esquema de Control Lado del Rotor.

Fuente: Los autores

El transformador presente en la figura 45 en el lado del rotor permite referir los parámetros obtenido de la máquina al lado del estator.

Control del lado de la red

El objetivo del control del lado de la red es mantener el voltaje del enlace de CC a un nivel constante independientemente de la potencia del rotor y garantizar la operación del factor de potencia unitario en el circuito del rotor.

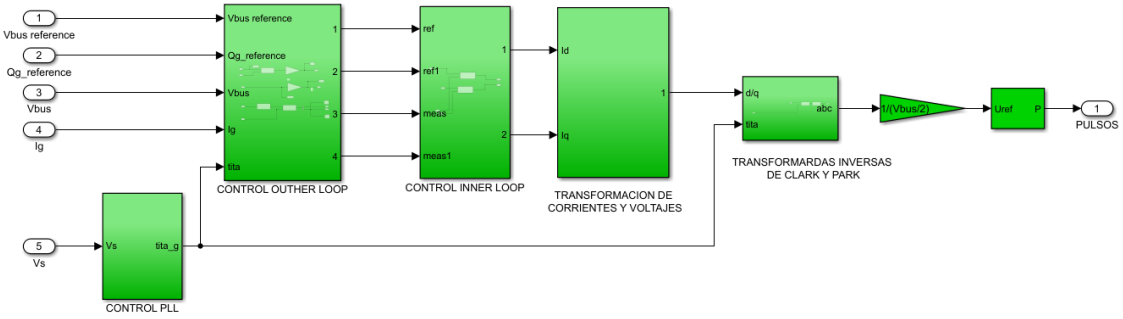


Figura 46. Diagrama de bloques del control Lado del Red.

Fuente: Los autores

En la figura 46 se detalla el diagrama de bloques del control de lado de la red, el cual toma como entradas para el control: tensión de referencia de la Barra, tensión de la barra, potencia reactiva de referencia, corrientes medidas en el lado del estator y la tensión nominal del estator; y es un control similar a lado del rotor con ciertas variaciones descritas a continuación.

Parámetros de la Red

Tabla 10: Parámetros usados para la simulación en el lado de Red.

Componentes	Valores
Barra C.C.	$\boldsymbol{C = 80000}$ $[\mu F]$
Retroalimentación	$\boldsymbol{R = 20}$ $[\mu\Omega]$
	$\boldsymbol{L = 400}$ $[\mu H]$
Barra salida del convertidor	$\boldsymbol{V_{L-L}} = 690$ $[V]$
	$\boldsymbol{f} = 60$ $[Hz]$
Tiempo discreto	*5e-6*

Fuente: Los Autores.

Barra de Corriente Continua (V_{dc})

A continuación, se presenta el cálculo del voltaje de enlace de CC.

$$V_{RMS} = \frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}} = \frac{690}{\sqrt{3}} = 398.37 \ [V]$$

$$V_{PICO} = V_{RMS} * \sqrt{2} = 398.37 * \sqrt{2} = 563.383 \ [V]$$

$$V_{dc} = V_{PICO} * \sqrt{3} = 563.383 * \sqrt{3} = 975.81 \ [V]$$

Para el parámetro V_{dc} se debe tener en cuenta que dicho valor debe ser mayor al calculado, debido a esto es que se toma el valor de referencia de voltaje de enlace de CC como 1150V.

Control PLL del lado de la red

El control PLL del lado de la red viene dado por la siguiente ecuación:

$$\theta_s = tan^{-1}\left(\frac{v_\beta}{v_\alpha}\right)$$

El control PLL toma como entradas el voltaje del estator en el sistema abc y las transforma al sistema $\alpha\beta\gamma$, mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Para posteriormente aplicar la función (atan2) la cual permite calcular el ángulo de tensión de la red (tita_g); este ángulo es utilizado para calcular las corrientes y voltajes en el sistema dq0.

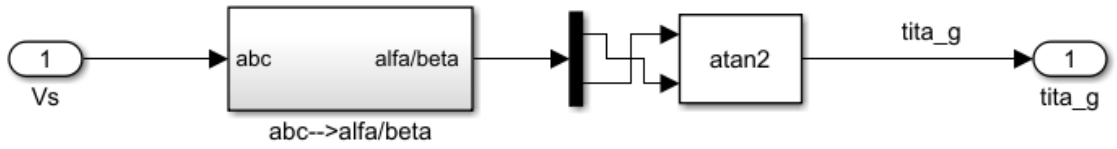


Figura 47. Control PLL lado de la Red

Fuente: Los autores

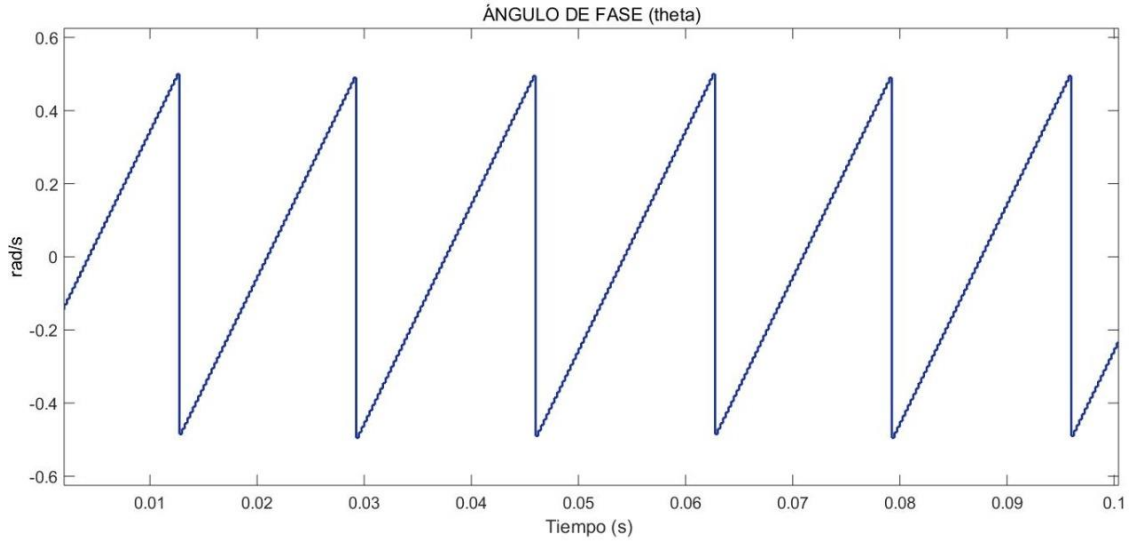


Figura 48. Ángulo de fase theta utilizado para obtener las corrientes y voltajes en el eje dq0.

Fuente: Los Autores.

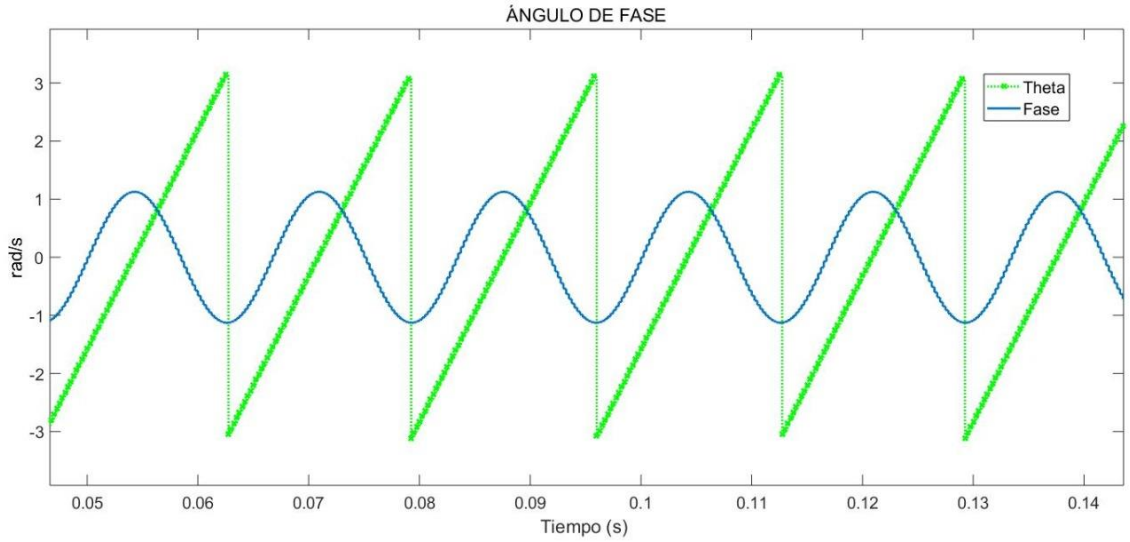


Figura 49. Ángulo de fase theta (θ) con respecto a la onda de voltaje de fase de la red.

Fuente: Los Autores.

Control Outer Loop

Cálculo de las corrientes i_{dg} e i_{qg}

En la figura 50 se detalla la obtención de las corrientes del lado de la red en el sistema dq0, este diagrama toma como entradas las corrientes de la red en el sistema abc, después utiliza la transformada de Clark para llevarlas al sistema $\alpha\beta\gamma$ mediante la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Implementando la matriz en un diagrama de bloques como se muestra en la figura 50.

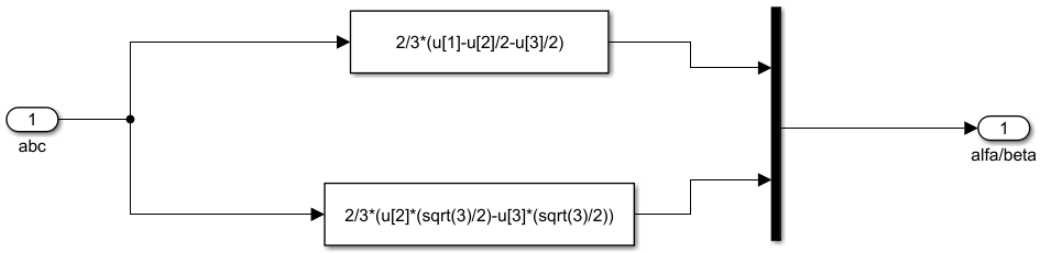


Figura 50. Diagrama de bloques de la transformación del sistema abc al sistema $\alpha\beta\gamma$

Fuente: Los Autores.

Finalmente utiliza la transformada de Park añadiendo la entrada del ángulo de tensión de la red (tita_g) para obtener estas corrientes en el sistema dq0.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & sin\theta & 0 \\ -sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix}$$

Se implementa la matriz en un diagrama de bloques de la figura 51:

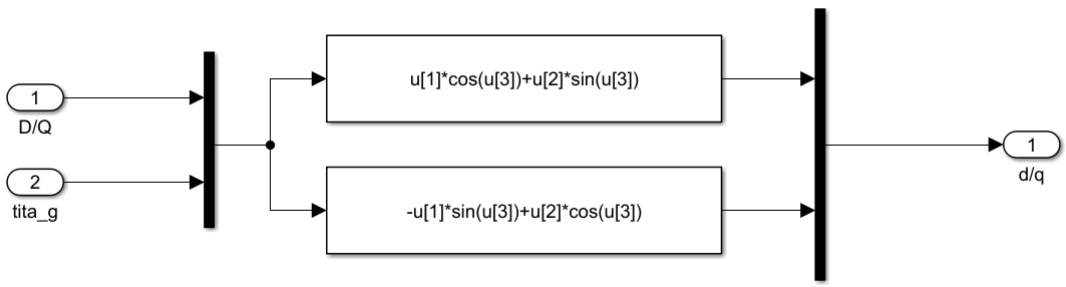


Figura 51. Diagrama de bloques para la obtención de las corrientes en dq0 del lado de la Red.

Fuente: Los Autores.

Se puede apreciar en la figura 52 el diagrama final de bloques para la obtención de las corrientes en eje directo y de cuadratura.

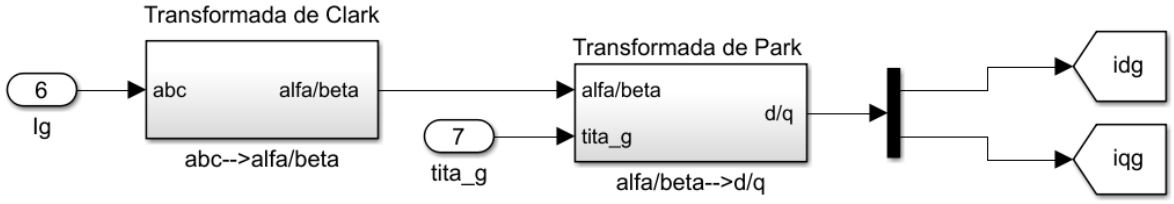


Figura 52. Diagrama de bloques para la obtención de las corrientes en dq0 del lado de la Red

Fuente: Los Autores.

Cálculo de las corrientes id_{g_ref} e iq_{g_ref}

Para el cálculo de la corriente de referencia id_{g_ref} , nuestras entradas son la tensión de barra de referencia, la tensión de barra, las cuales entran a un bloque PI para después pasar por un bloque de ganancia el cual está definido por Kp_g.

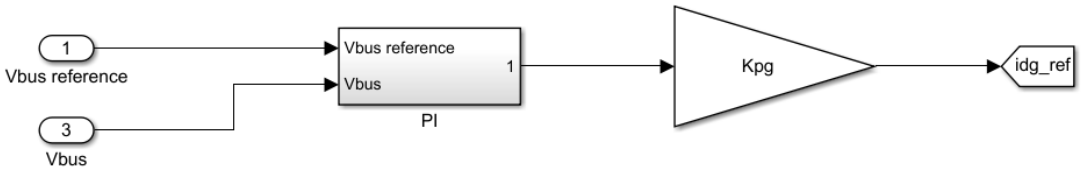


Figura 53. Diagrama de bloques de la corriente id_{g_ref}.

Fuente: Los Autores.

El bloque PI que se presenta en la figura 47 está definido por las entradas anteriormente mencionadas, en el cual se utiliza las constantes k_{p_v} y k_{i_v} como ganancias, estas vienen detalladas en la tabla 11:

Tabla 11: Valores de las constantes kp_v y ki_v.

$\boldsymbol{kp_v}$	-1000
$\boldsymbol{ki_v}$	-300000

Fuente: Los Autores.

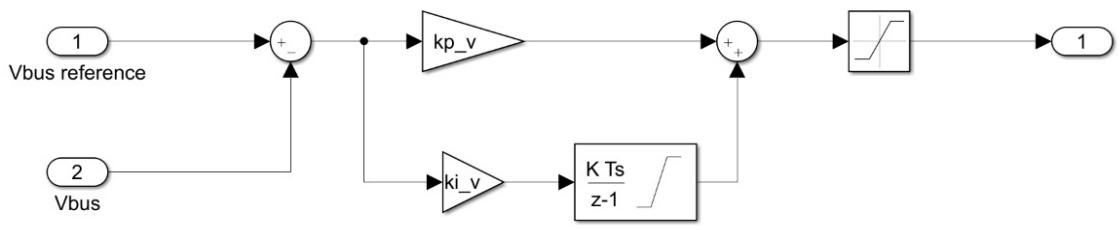


Figura 54. Diagrama interior del controlador PI

Fuente: Los Autores.

También se presenta la tabla 12 en la cual se detallas los valores de las contantes Kp_g y Ki_g:

Tabla 12: Valores de las constantes Kp_g y Kq_g.

$\boldsymbol{Kp_g}$	0,0012
$\boldsymbol{Kq_g}$	-0,0012

Fuente: Los Autores.

Estas constantes están dadas por las siguientes ecuaciones:

$$Kp_g = \frac{1}{\frac{3}{2} * V_s * \sqrt{\frac{2}{3}}}$$

$$Kq_g = -Kp_g$$

Para el cálculo de la corriente de referencia $iq_{g_{ref}}$; la entrada es $Q_{g_{ref}}$ la misma que tiene un valor de 0, se multiplica por la ganancia Kq_g para obtener el valor deseado como se observa en la figura 55:

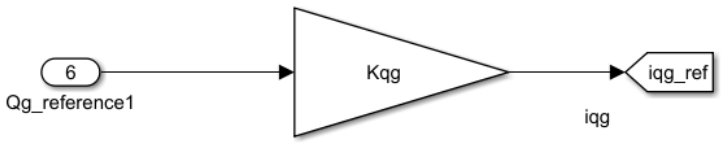


Figura 55. Diagrama de Bloques para el cálculo de $iq_{g_{ref}}$

Fuente: Los Autores.

Estas cuatro corrientes ($id_g, iq_g, id_{g_ref}\ e\ iq_{g_ref}$) servirán de entrada para el control Inner Loop que se detallara continuación.

Control Inner Loop

En la figura 56 se muestra el control Inner Loop para el lado de la red, el cual toma como entradas $id_g, iq_g, id_{g_ref}\ e\ iq_{g_ref}$ las cuales entran a dos bloques PI, así obteniendo a la salida I_d e I_q; el propósito de este control es obtener dichas corrientes para transfórmalas a las tensiones en el sistema dq0.

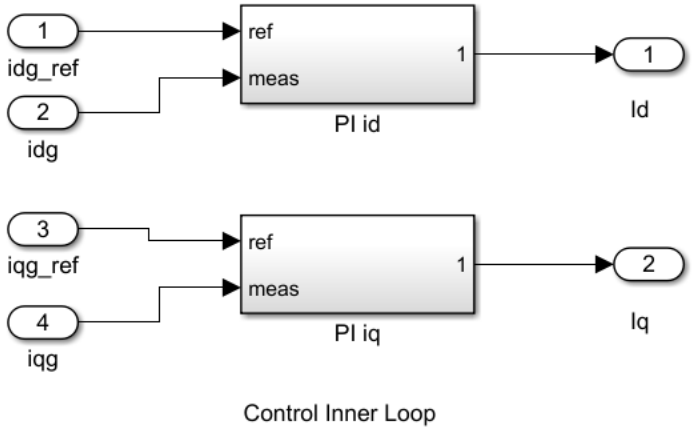


Figura 56. Control Inner Loop

Fuente: Los Autores.

El interior de los bloques PI se detalla en la figura 57 , en los bloques de ganancia se utiliza las constantes kp y ki las cuales se obtiene como se detalla en el anexo 6, siendo que kp_{idg} y ki_{idg} son utilizadas para la corriente I_d; y las contantes kp_{iqg} y ki_{iqg} para la corriente I_q.

Par la obtención de los valores descritos en la tabla13, partimos calculando primero la frecuencia natural como se muestra a continuación:

$$\omega_{nig} = 2\pi * 60$$

Para después obtener las constantes kp y ki tanto para las corrientes id e iq como se detalla en las siguientes ecuaciones:

$$kp_{idg} = \left(2 * \omega_{nig} * L_g\right) - R_g$$

$$kp_{iqg} = kp_{idg}$$

$$ki_{idg} = {\omega_{nig}}^2 * L_g$$

Tabla 13: Valores de las constantes kp_{idg} , ki_{idg}, kp_{iqg} y ki_{iqg}.

kp_{idg}	0,3016
ki_{idg}	56,8489
kp_{iqg}	0,3016
ki_{iqg}	56,8489

Fuente: Los Autores.

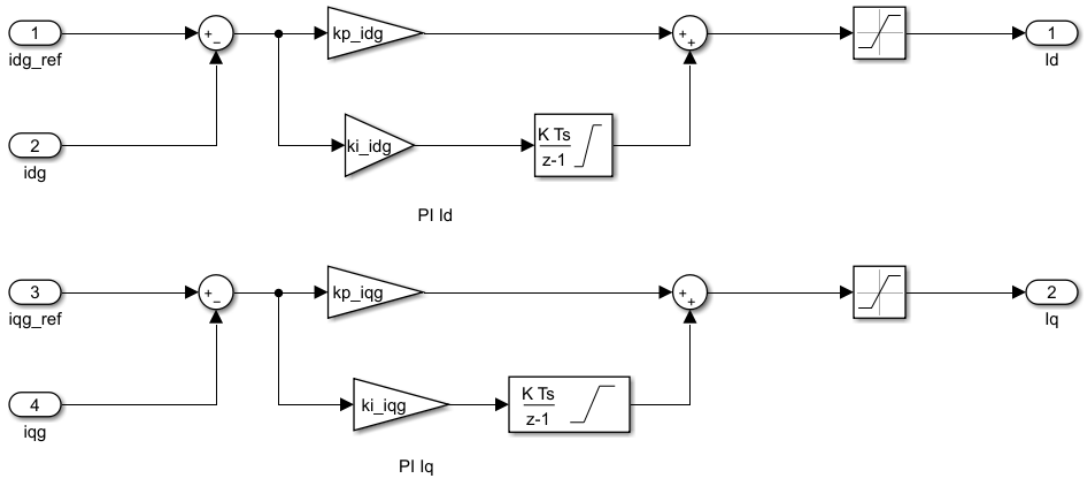


Figura 57. Diagrama interno de los controladores PI del Control Inner Loop

Fuente: Los Autores.

En la figura 58 se puede apreciar el seguimiento de la referencia de corriente entregada por el Inner loop.

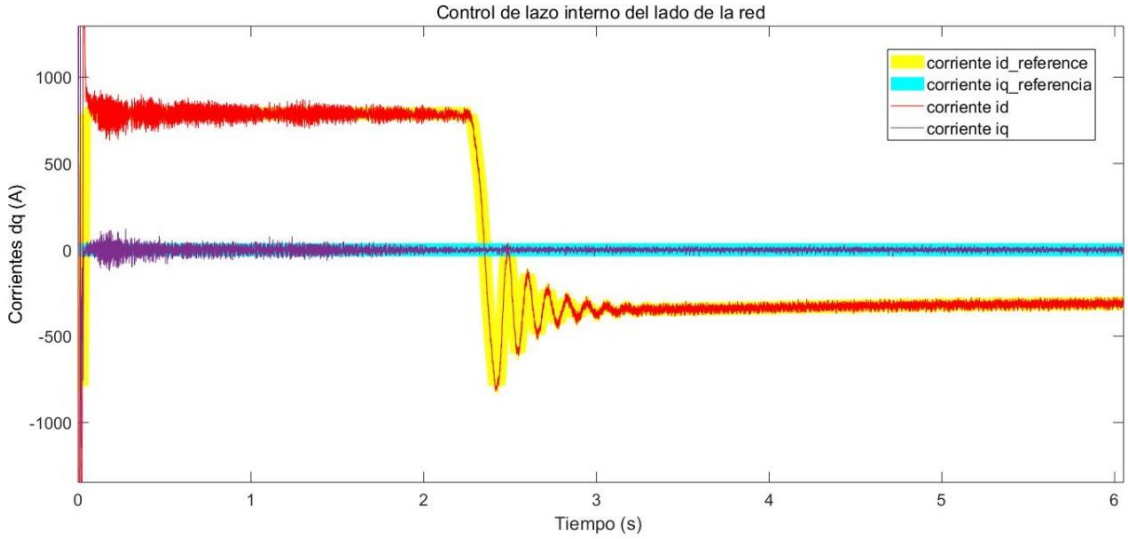


Figura 58. Señales de las corrientes id e iq y las corrientes de referencia en el eje dq.

Fuente: Los autores

Transformación de las Corrientes dq a Voltajes dq

Para la transformación es necesario tener como entradas las corrientes generadas por control Inner loop (I_d e I_q) y las corrientes de generada por el Outer Loop (I_{dg} e I_{qg}), obteniendo a la salida los voltajes de referencia en el eje dq, como se aprecia en la figura 59.

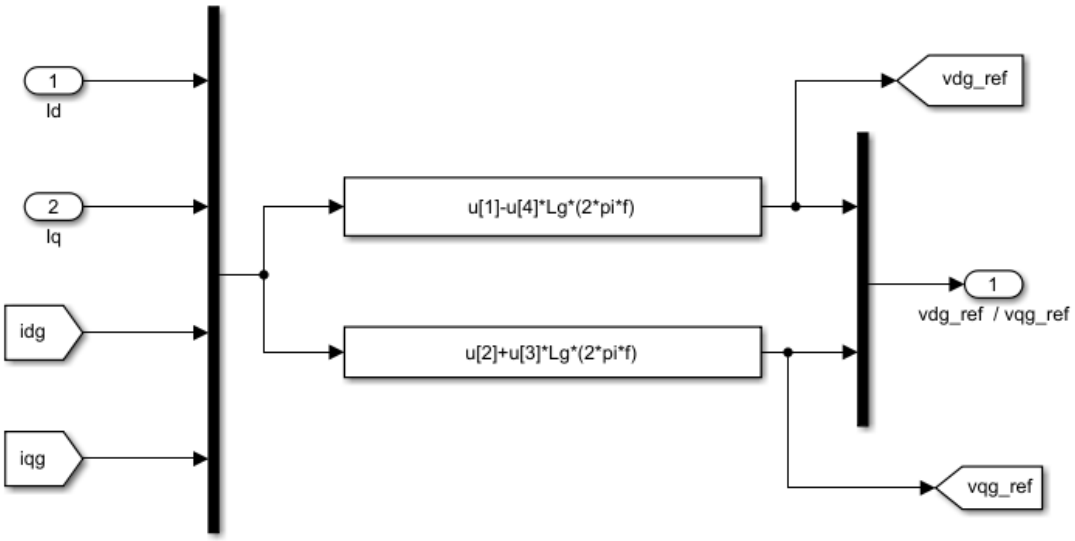


Figura 59. Transformación de Corrientes a Voltajes en el sistema dq0.

Fuente: Los Autores.

Teniendo en cuenta que para la obtención de los voltajes en el eje dq se debe introducir las siguientes ecuaciones en el bloque de funciones:

$$v_{dg_ref} = I_d - I_{qg} * \omega_s * L_f$$

$$v_{qg_ref} = I_q + I_{dg} * \omega_s * L_f$$

Transformada de Park inversa

Para el cambio de sistema de voltaje dq0 a voltajes en el sistema abc, es indispensable aplicar la transformada de Park inversa, la cual se realiza en dos partes, primero transformando del sistema de referencia dqo al sistema $\alpha\beta\gamma$, con la siguiente matriz:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} cos\theta & -sin\theta & 0 \\ sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix}$$

Implementando la matriz en un diagrama de bloques como se puede apreciar en la figura 60.

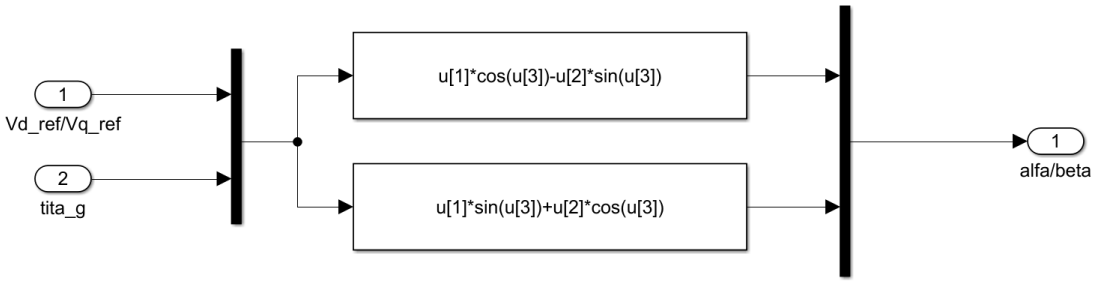


Figura 60. Transformación del sistema dq0 al sistema $\alpha\beta\gamma$.

Fuente: Los autores

Obtenido el sistema $\alpha\beta\gamma$ se transforma al sistema abc, por medio de la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_\gamma \end{bmatrix} \qquad [V]$$

La implementación de la ecuación se detalla en la figura 61

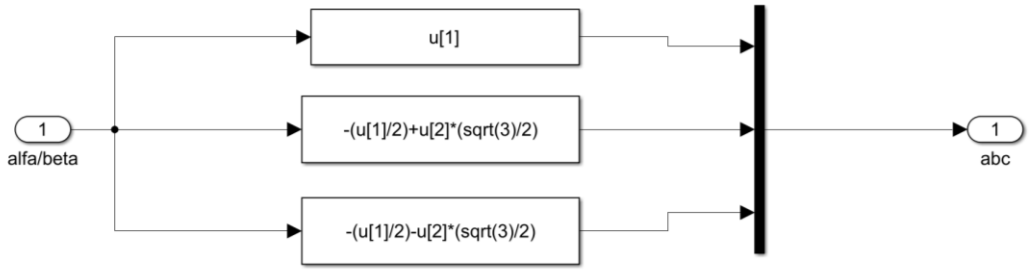


Figura 61. Transformación del sistema $\alpha\beta\gamma$ al sistema abc.

Fuente: Los autores

Cálculo de P y Q a la salida del Outer Loop

Para el cálculo de la potencia activa y reactiva se utiliza un diagrama de bloques Power (3ph, Instantáneos) el cual se encuentra en la librería: Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Measurements / Adicional Measurements

Figura 62. Bloque Power (dq0, Instantáneos)

Fuente: [27]

En la figura 63 se puede observar el diagrama de bloques completo del cálculo de potencia activa y reactiva y esas pueden ser calculadas también por las siguientes fórmulas.

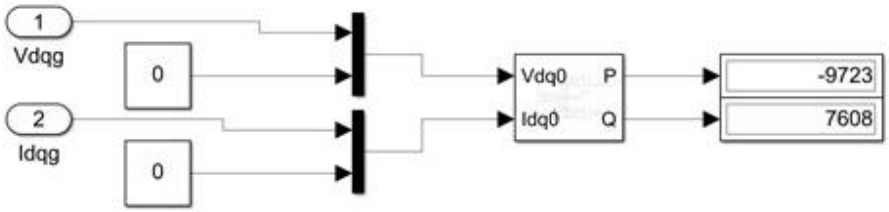


Figura 63. Visualización de los Valores de P y Q

Fuente: Los autores

$$P = \frac{3}{2} * (V_d * I_d + V_q * I_q)$$

$$Q = \frac{3}{2} * (V_q * I_d + V_d * I_q)$$

En la tabla 14 se puede observar los resultados de la simulación con respecto a los calculados:

Tabla 144: Resultados de la Simulación vs Calculados

	Calculados	**Matlab/Simulink**
P	-9726,03	-9723
Q	7608,18	7608

Fuente: Los Autores.

Modulación de ancho de pulsos (PWM) en el lado de la red

Este bloque es el mismo utilizado en el lado del rotor, el PWM permite crear los pulsos necesarios a partir de la referencia de voltaje abc para el convertidor del lado de la red. El

funcionamiento principal de este bloque es el de comparar la onda de referencia con la onda portadora de la siguiente manera:

- La onda de referencia > onda portadora, la salida de conmutación será alta o (1).
- La onda de referencia < onda portadora, la salida de conmutación será baja o (0).

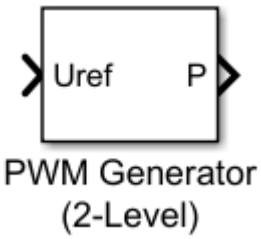


Figura 64. Bloque PWM del lado de la red.

Fuente: [26]

En la figura 65 se puede observar el esquema completo del lado de la red, además se incluye un filtro, un transformador elevador y la barra infinita

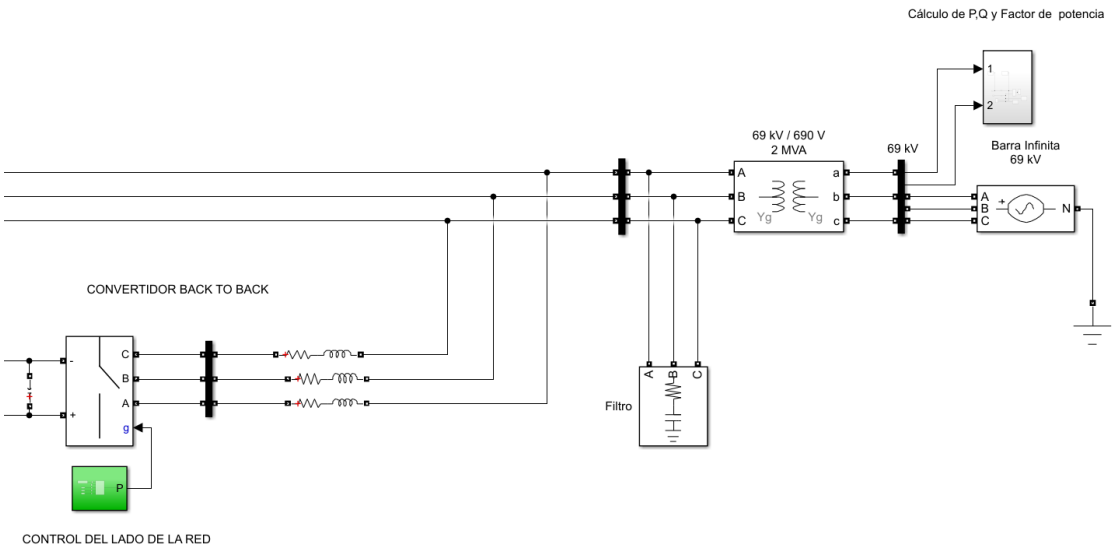


Figura 65. Esquema lado de la red

Fuente: Los autores

Filtro

Una vez que se han derivado las ecuaciones de voltaje, el siguiente paso es considerar el filtro del lado de la red, que se encuentra entre la red y el convertidor. Es importante destacar que el objetivo de este filtro es minimizar los armónicos de corriente y tensión generados por la conmutación del convertidor.

Transformador

Para elevar a un nivel de medio voltaje se implementa un transformador 690 V/ 69 kV conexión Y/Y a una capacidad de 2MVA con los parámetros definidos por el bloque en Simulink.

Barra infinita

La integración de control desarrollado a una barra Slack de 69 kV a 60 Hz, por medio de un filtro capacitivo y un transformador.

Cálculo de Potencias Entregadas a la Barra infinita

Para el cálculo de potencias entregadas a la Barra infinita se utiliza el bloque Power (3hp, instantaneous); Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Fundamental Blocks / Measurements / Additional Measurements; el cual toma como entradas las corrientes y voltajes en el sistema abc, obteniendo así la salida de las potencias activa y reactiva.

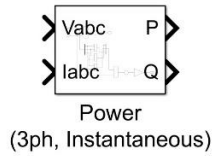


Figura 66. Bloque Power (3hp, instantaneous)

Fuente: [28]

En la figura 67 se puede observar los valores calculados para la potencia activa y reactiva, y estas pueden ser calculadas por las siguientes formulas:

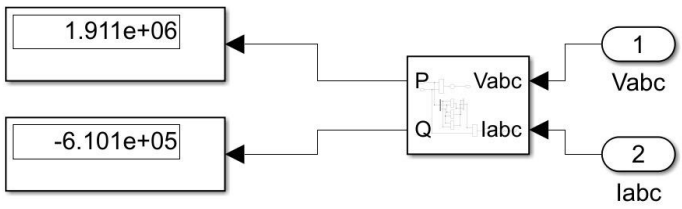


Figura 67. Visualización de P y Q entregadas a la Red

Fuente: Los Autores

$$P = V_a * I_a + V_b * I_b + V_c * I_c \quad [Mw]$$

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}}[(V_b - V_c) * I_a + (V_c - V_a) * I_b + (V_a - V_b) * I_c] \ [MVAr]$$

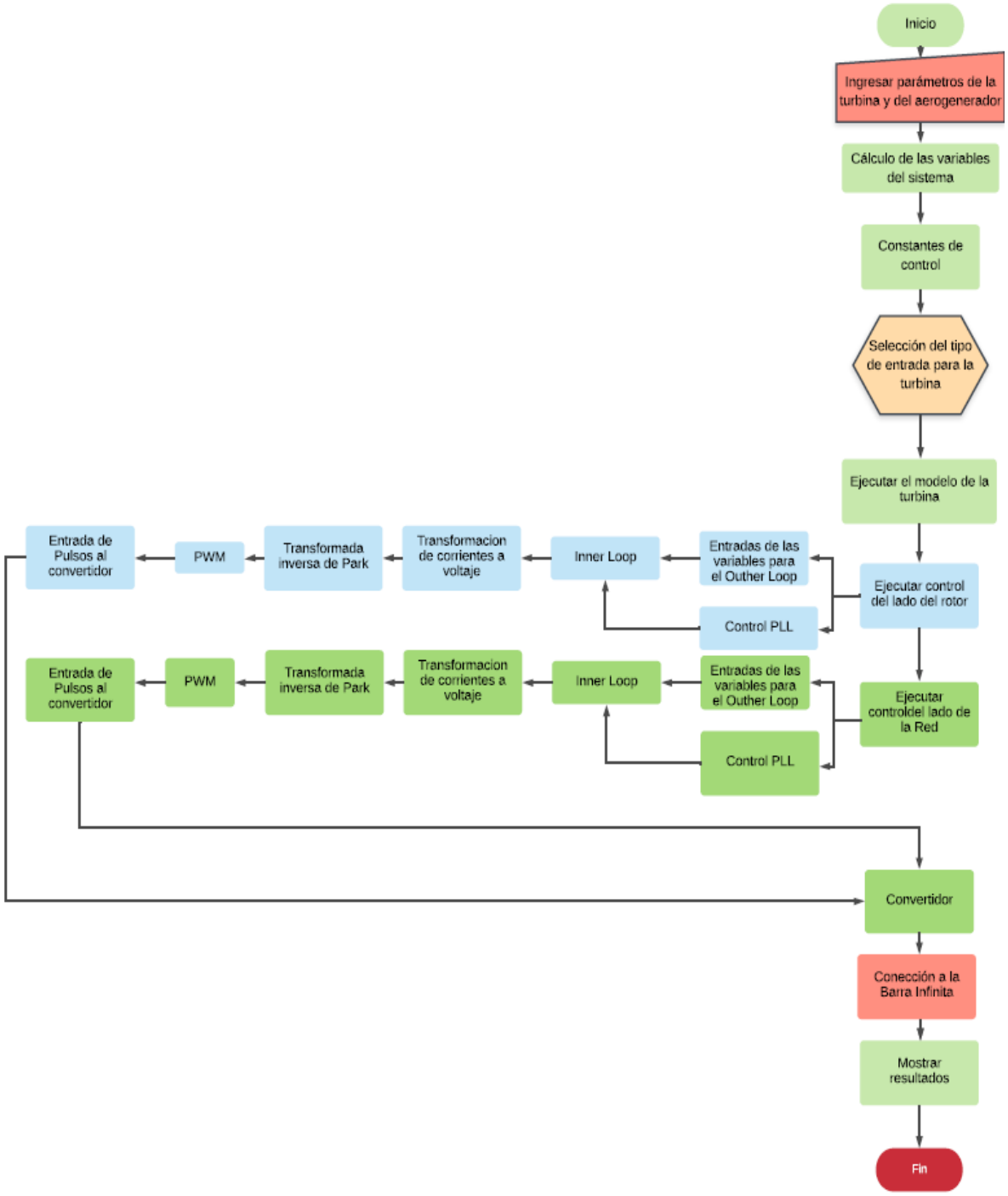
En la tabla 15 se puede observar los resultados de la simulación con respecto a los calculados:

Tabla 155: Resultados de la Simulación vs Calculados

	Calculados	**Matlab/Simulink**
P (MW)	1,9108	1,911
Q (MVAr)	-0,6102	-0.610

Fuente: Los Autores.

Diagrama de flujo del sistema desarrollado


Inicio
Ingresar parámetros de la turbina y del aerogenerador
Cálculo de las variables del sistema
Constantes de control
Selección del tipo de entrada para la turbina
Ejecutar el modelo de la turbina
Ejecutar control del lado del rotor
Entradas de las variables para el Outher Loop
Inner Loop
Transformacion de corrientes a voltaje
Transformada inversa de Park
PWM
Entrada de Pulsos al convertidor
Control PLL
Ejecutar controldel lado de la Red
Entradas de las variables para el Outher Loop
Inner Loop
Transformacion de corrientes a voltaje
Transformada inversa de Park
PWM
Entrada de Pulsos al convertidor
Control PLL
Convertidor
Conección a la Barra Infinita
Mostrar resultados
Fin

Esquema Completo de Control de Potencia Activa y Reactiva de un DFIG

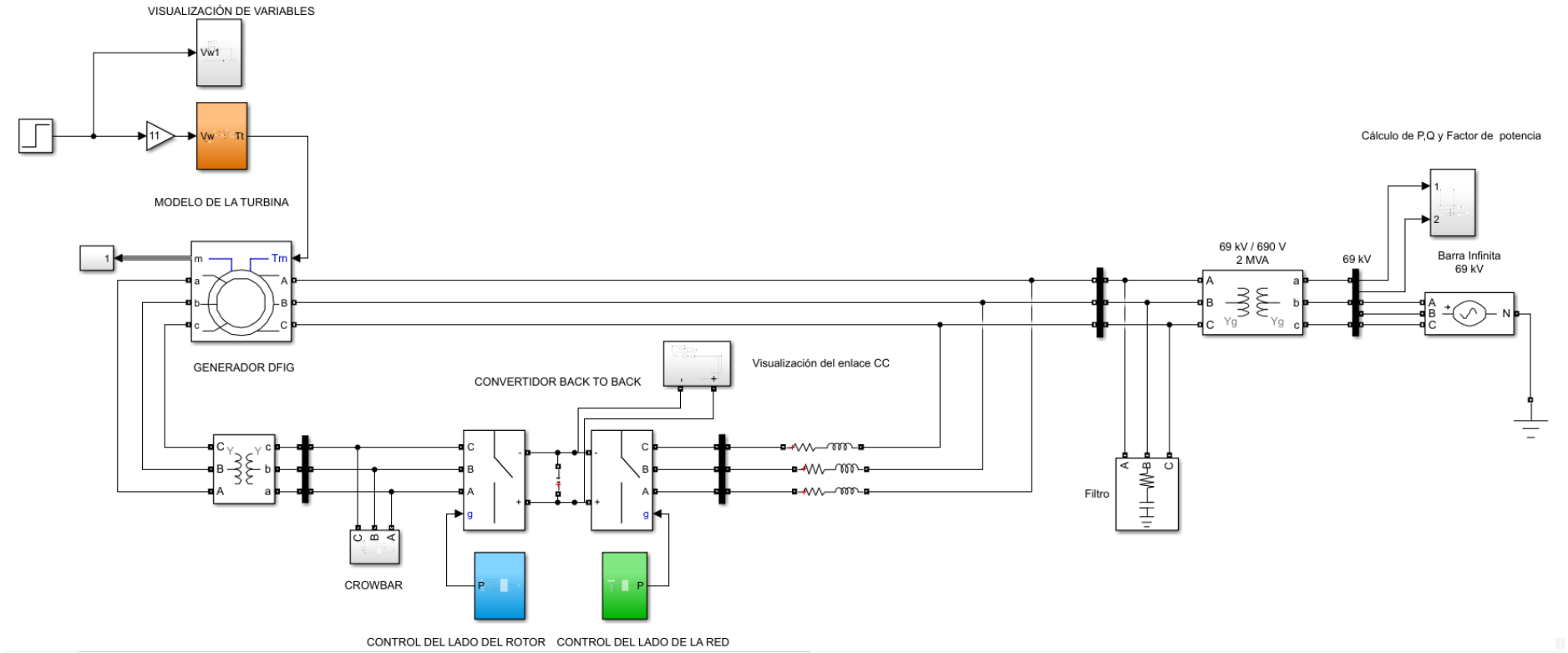


Figura 68. Esquema de control de Potencia Activa y Reactiva de un DFIG

Fuente: Los autores

En la figura 68, presenta el esquema de simulación completa integrada por varios componentes: la entrada de viento, el modelo de la turbina en el cual se detalla los parámetros en la tabla 2, el bloque de la máquina de inducción doblemente alimentada (DIFG) cuyos parámetros son detallado en la tabla 7, el sistema de control de lado del rotor el cual está integrado por (control PLL, controles Inner y outer loop, bloque de transformación de corrientes a voltajes, transformadas inversas de Clark y Park y finalmente un bloque PWM de 2 niveles el cual recibe las señales del bloque de transformadas inversas para la modulación de ancho de pulso, almacenando la energía por el capacitor presente en el enlace Vdc, por su parte el lado del rotor es compuesto por los bloques similares a los de control de lado del rotor que en conjunto tiene el objetivo el control de la potencia activa y reactiva que es suministrada a la red.

Enlace Vdc

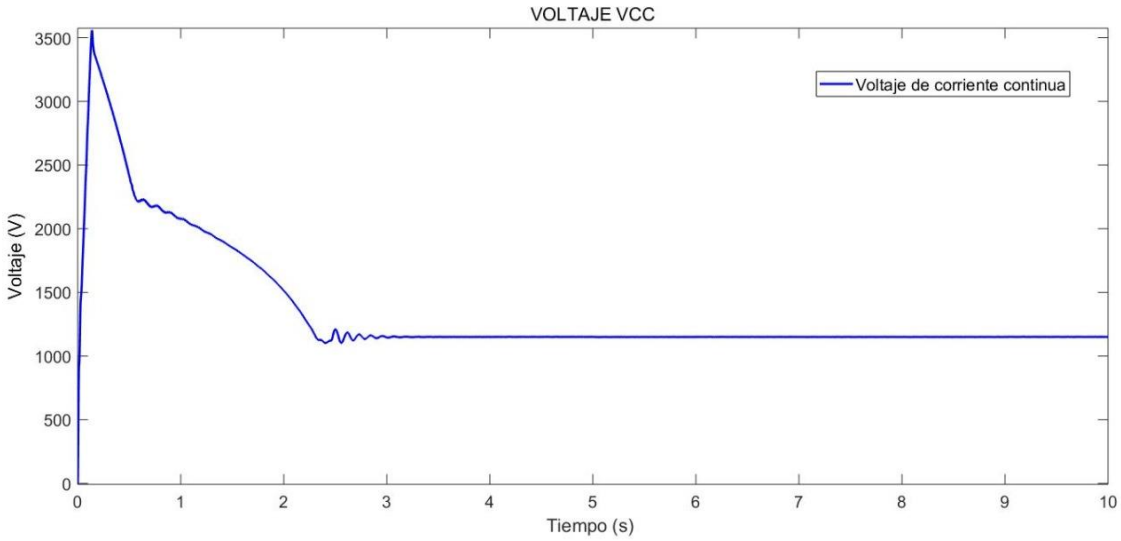


Figura 69. Señal de enlace del Vdc.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 69, se muestra la señal del enlace Vdc del back to back, el cual tiene un valor de referencia de 1150, este valor este valor se da cuando la índice modulación es 1.

Corriente: En la figura 70, se muestra las corrientes en el eje dq del lado de red, las cuales son obtenidas en los controles outer e inner loop, estas corrientes son necesarias para el cálculo de potencias entregadas por el control del lado de la red.

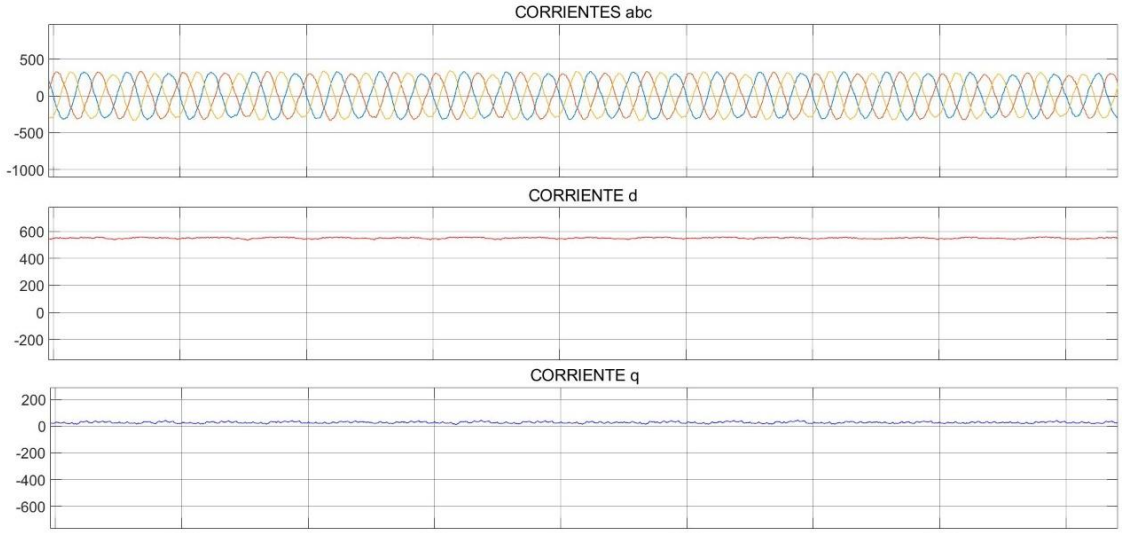


Figura 70. Señales de Corriente en los Sistemas abc y dq.

Realizado por: Los Autores.

Voltajes: En la figura 71, se muestra voltajes en el eje dq del lado de red, las cuales son obtenidas en el bloque de transformación de I a V, estos voltajes son necesarios para el cálculo de potencias entregadas por el control del lado de la red.

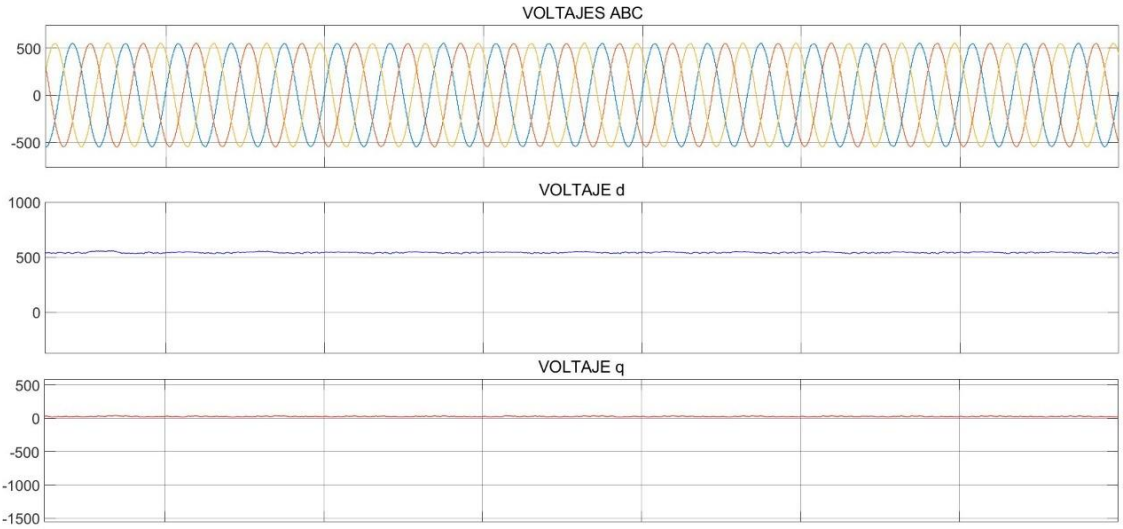


Figura 71. Señales de Voltaje en los Sistemas abc a dq.

Realizado por: Los Autores.

Las señales de voltaje y corriente en el eje dq permiten calcular los valores de potencia activa y reactiva, además se da como entrada que Qg_{ref} sea 0 por tal razón el valor de la potencia reactiva tiende a ser 0.

Potencia Activa y Reactiva

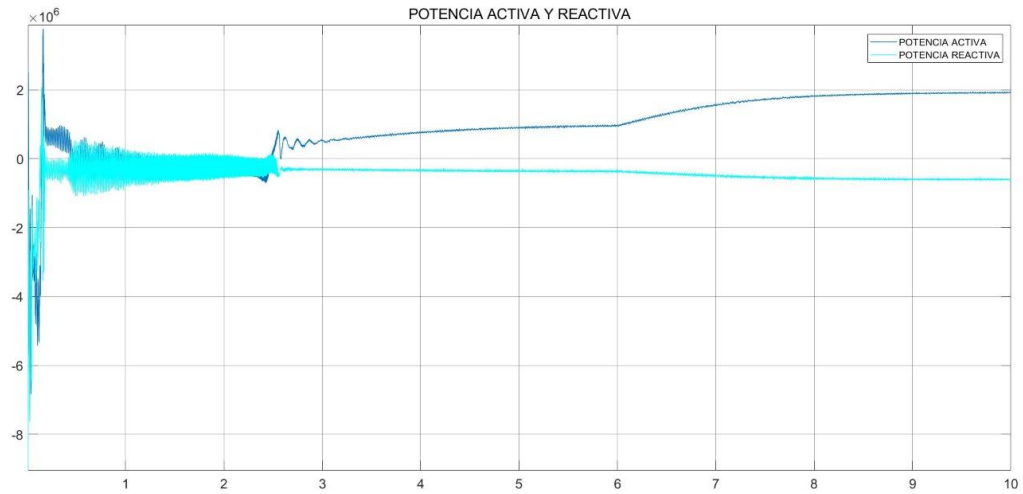


Figura 72. Señales de P. Activa y Reactiva

Realizado por: Los Autores.

En la figura 72, se presenta los resultados de potencia activa con un valor de 1.91 MW y la potencia reactiva tiende a ser aproximadamente 0, al minimizar el valor de la potencia reactiva a 0, se entregando a la red un factor de potencia cercano a la unidad cumpliendo con los requerimientos para la conexión a los sistemas eléctricos de potencia.

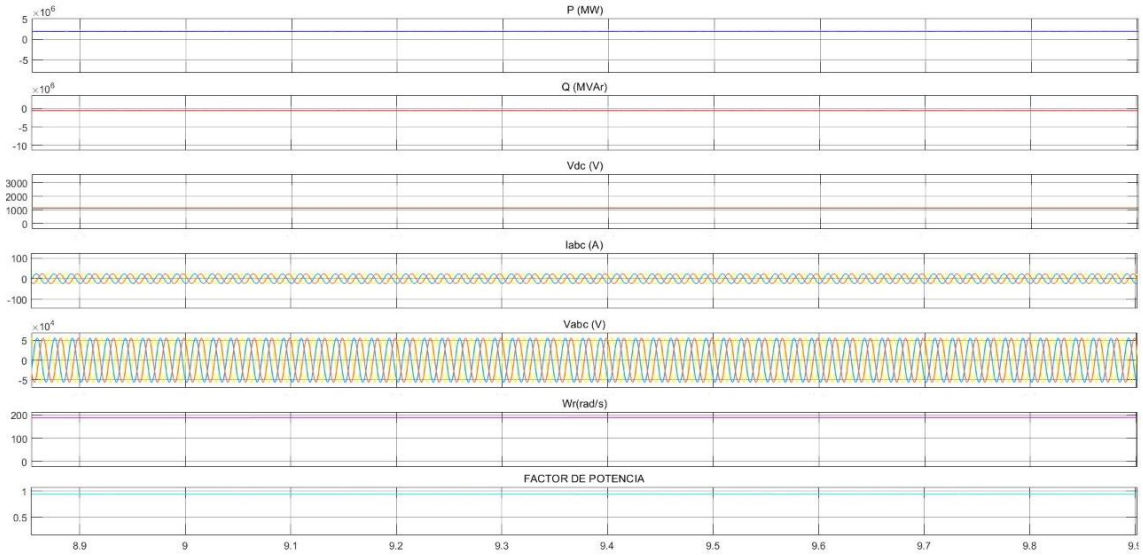


Figura 73. Señales de sistema de control propuesto

Realizado por: Los Autores.

Comportamiento de Seguimiento de Potencia a diferentes entradas y Factor de potencia entregado a la Red

A continuación, se presenta tres ejemplos con diferentes tipos de entradas (escalón, variable y rampa), se observa el seguimiento de la potencia generada por la turbina y el factor de potencia entregado a la red respectivamente**.**

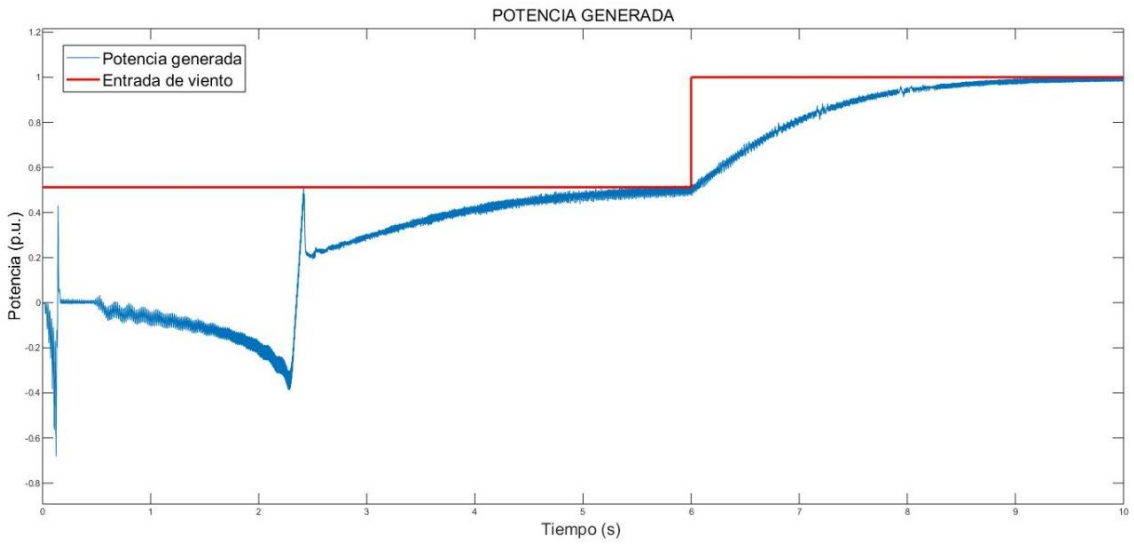


Figura 74. Entrada Escalón.

Fuente: Los autores

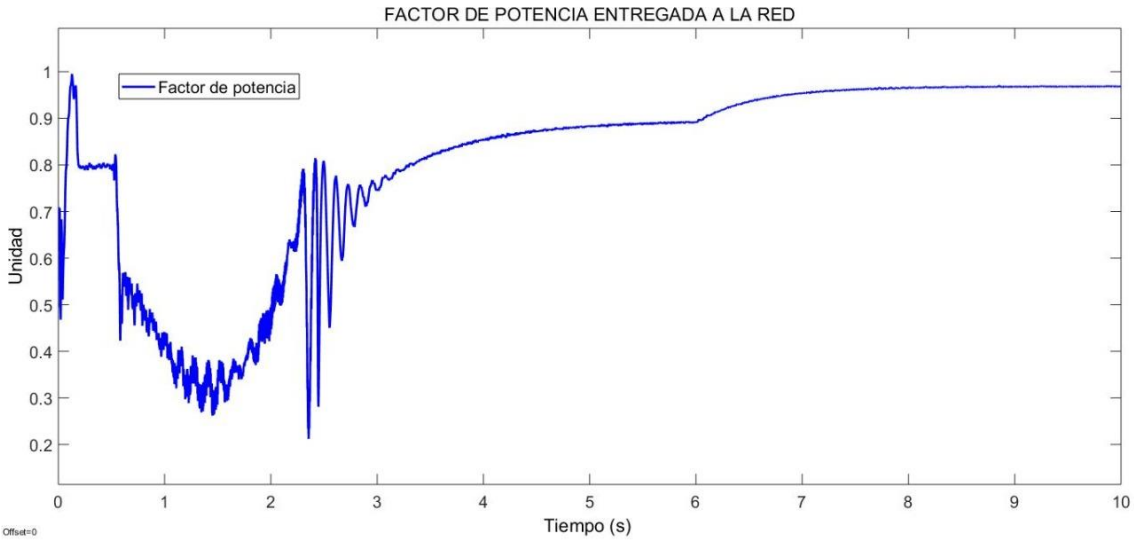


Figura 75. Comportamiento del factor de potencia ante una entrada escalón.

Fuente: Los autores

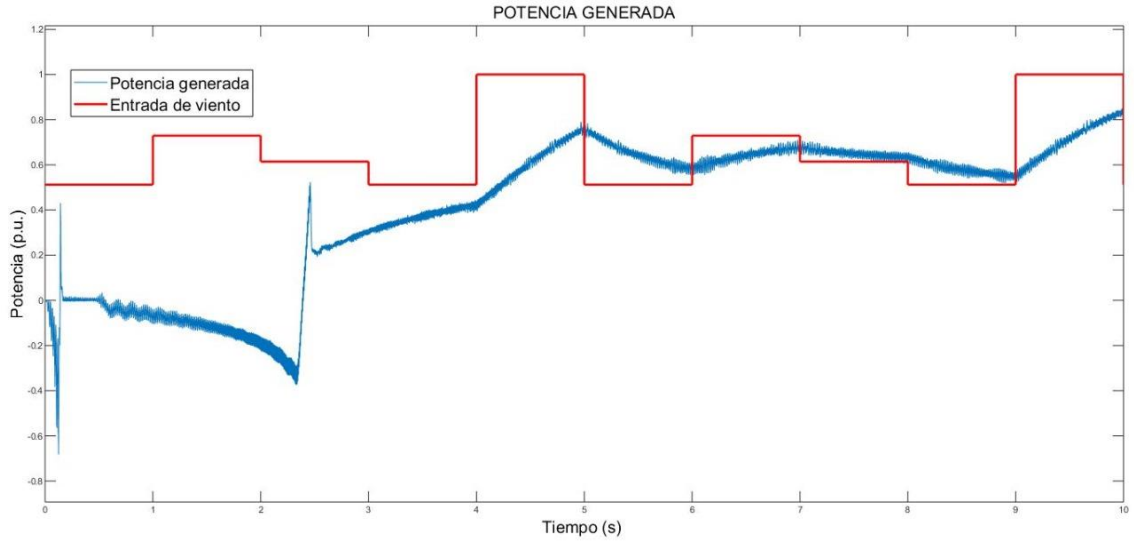


Figura 76. Entrada Variable**.**

Fuente: Los autores

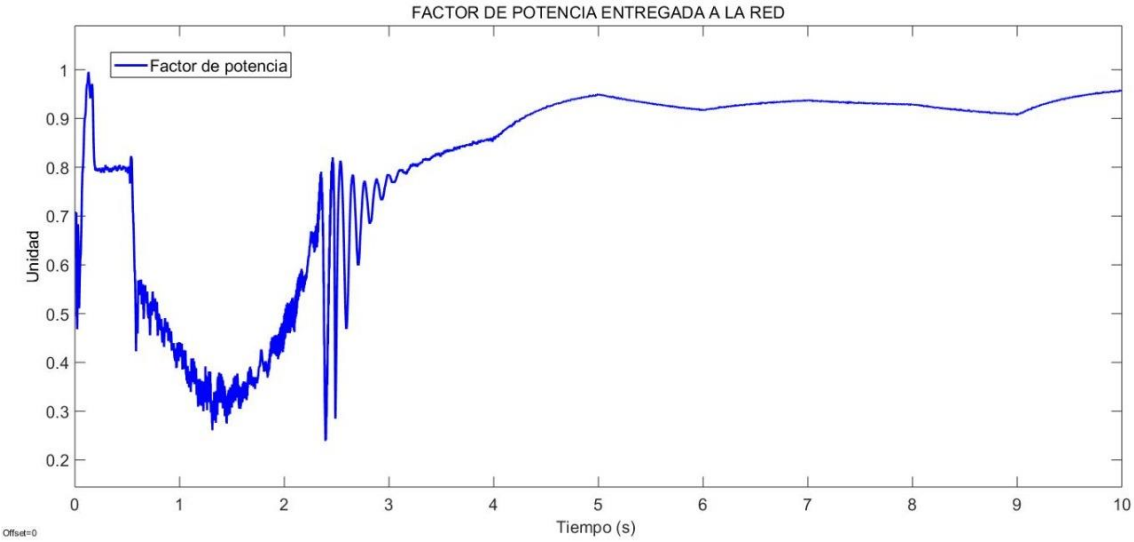


Figura 77. Comportamiento del factor de potencia ante una entrada variable.

Fuente: Los autores

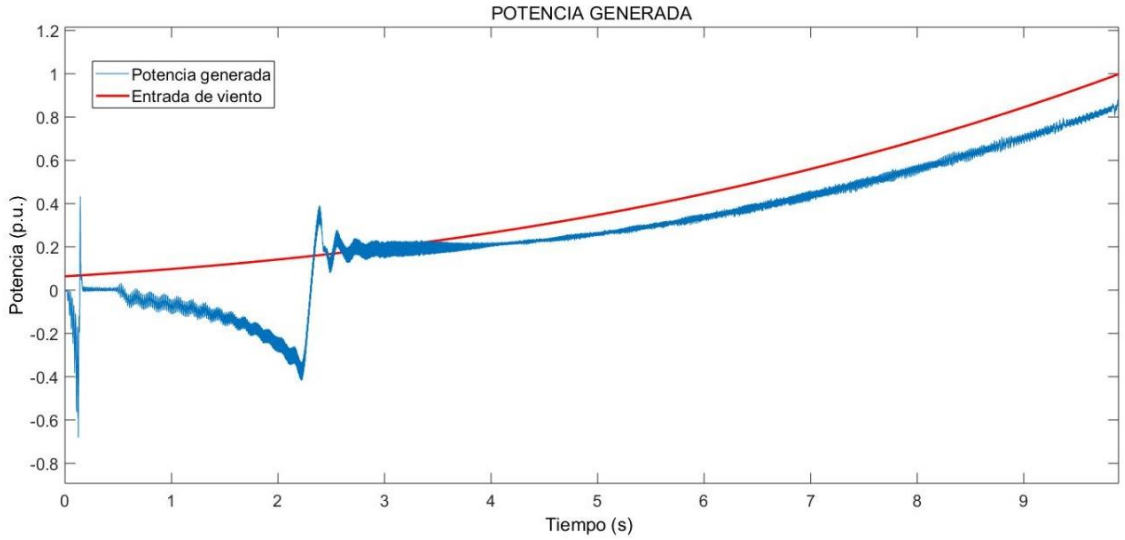


Figura 78. Entrada tipo rampa.

Fuente: Los autores

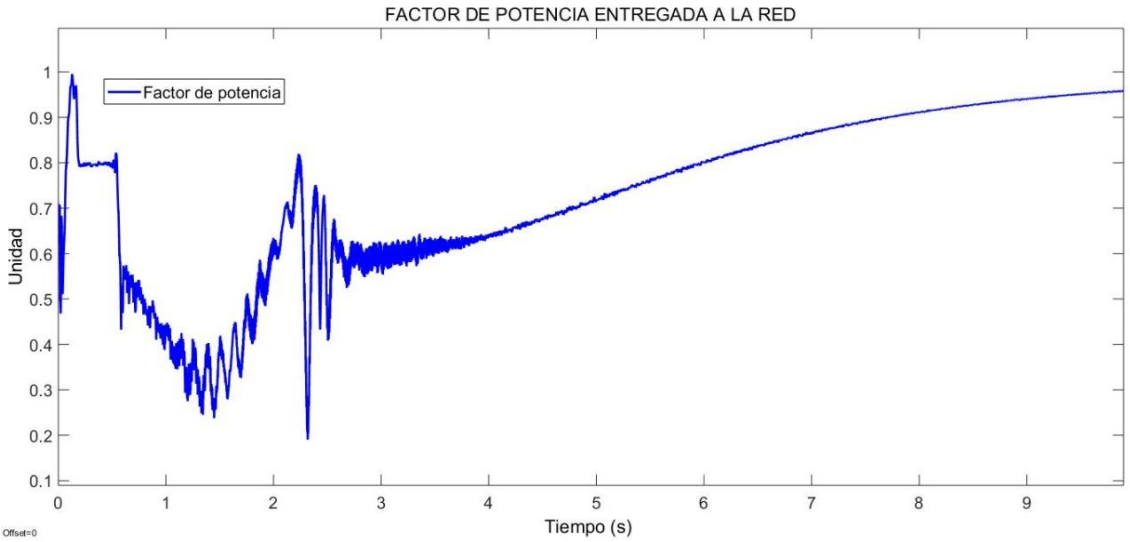


Figura 79. Comportamiento del factor de potencia ante una entrada tipo rampa.

Fuente: Los autores

Comparación entre la simulación realizada y el ejemplo propio de Matlab

A continuación, se presenta los valores obtenidos por la simulación realizada y comparada con la simulación de ejemplo en Matlab "Wind Farm – DFIG Detailed Model" el cual se observa en el anexo 13, la cual se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 166: Resultados de la Simulación vs Calculados

	Esquema de Matlab Wind Farm – DFIG Detailed Model	Esquema Realizado	% error
P. Activa (MW)	1,507	1,911	21,14
P. Reactiva (MVAr)	0,5825	0,6101	4,52
Vdc (V)	1148	1150	0,17
Factor de potencia	0,9327	0,954	2,23

Fuente: Los Autores.

Los valores expuestos en la tabla 16, expresa la potencia activa y reactiva comparada entre la simulación realizada y el ejemplo de Matlab, se debe considerar que la etapa de electrónica de potencia para dichas simulaciones es diferente, ya que en la simulación realizada se implementa un back to back con diodos ideales, mientras que en el ejemplo de Matlab presenta un rectificador por medio de diodos e IGBT´s.

También, se presenta el esquema unifilar en el programa ETAP, con el flujo de potencia, para su respectiva corroboración con los datos de la turbina utilizada en la investigación.

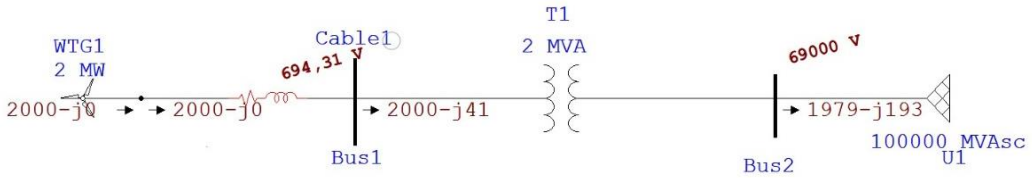


Figura 80. Flujos de potencia del aerogenerador.

Fuente: Los autores

En la figura 80, se presentan los valores del flujo de cargas del aerogenerador, por lo cual se considera que el rango de error entre la simulación y el flujo es del 3,44% en potencia activa, mientras que en potencia reactiva es del 24,75%, debido a que no se implementa el control propuesto, pero se puede visualizar que a la salida del aerogenerador tiene una potencia reactiva de 0, corroborando a la investigación.

Comportamiento ante una caída de tensión en la barra infinita

Estos tipos de aerogeneradores no pueden garantizar que durante caídas severas de voltaje la corriente del rotor se mantenga dentro de sus límites seguros, sin perder el control. Generalmente, debido a esta limitación de voltaje, las turbinas eólicas basadas en DFIG

incorporan una protección de palanca (Crowbar) adicional que resuelve estas caídas de voltaje severas.

Después de una caída severa de voltaje, durante el tiempo que el flujo del estator evoluciona, típicamente hay un período corto en el que se pierde el control, lo que normalmente produce sobrecorrientes en el estator y el rotor de la máquina, para proteger el sistema frente a las sobreintensidades provocadas por la pérdida de control, se activa una protección de palanca que simultáneamente acelera la evolución del flujo, intentando lo más rápido posible recuperar el control con el convertidor.

Para lo cual se presenta la respuesta que tiene el sistema con la protección ante una caída de tensión del 90% en la barra infinita.

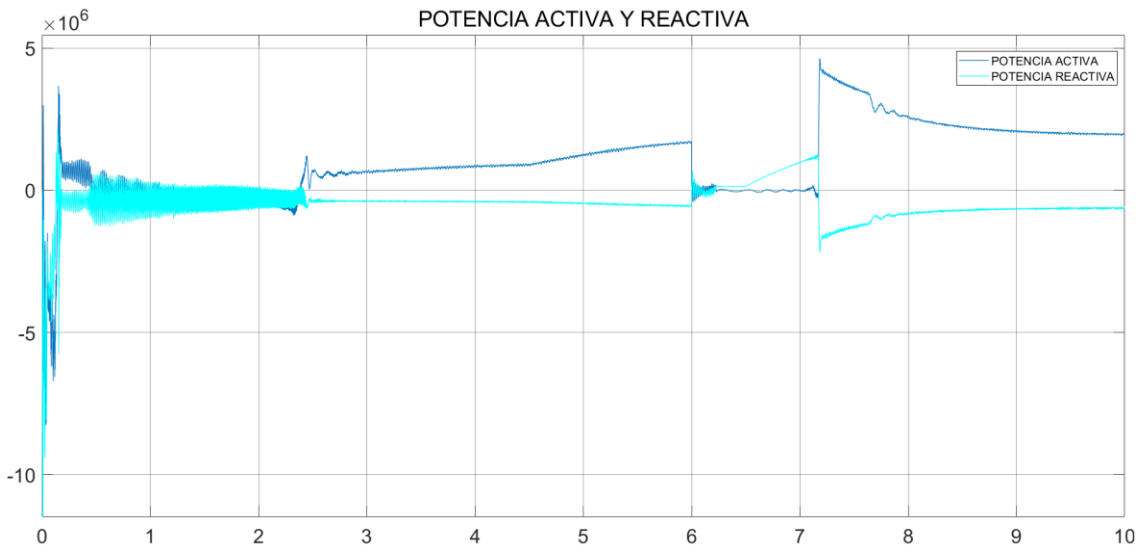


Figura 81. Comportamiento de la potencia activa y reactiva ante perturbación.

Fuente: Los autores

En la figura 82 se presenta la sobrecorriente absorbida por la protección (Crowbar) durante la perturbación.

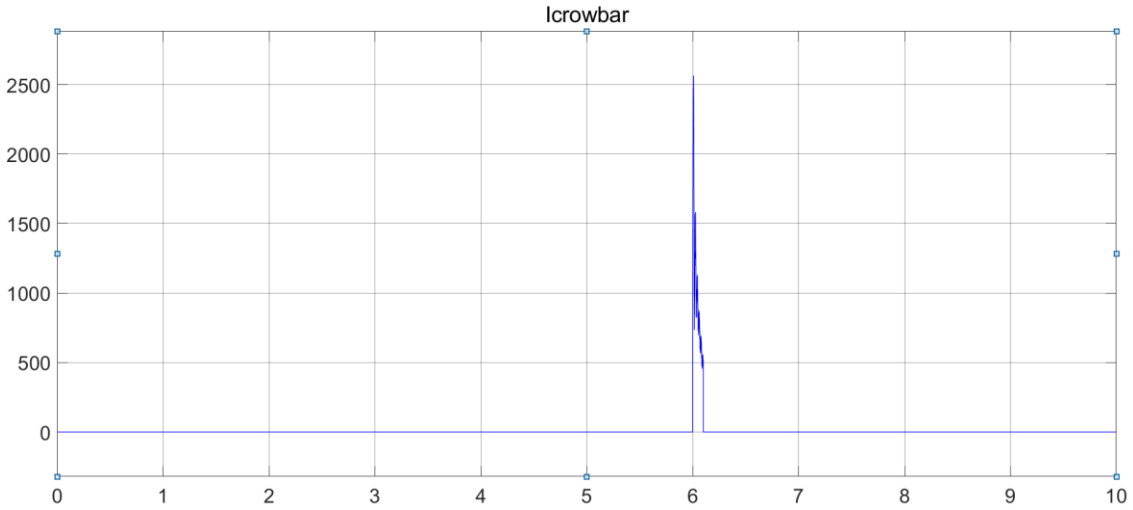


Figura 82. Corriente absorbida por protección ante una perturbación

Fuente: Los autores

IMPACTOS

Impactos Técnicos: Las energías renovables en la actualidad se han ido desarrollándose a pasos agigantados en los últimos años, optando por nuevas formas de generar energía limpia, eficiente y confiable sin destruir los recursos de la naturaleza, siendo una forma de generación de energía eléctrica limpia la energía eólica.

Debido a esto se ha considerado aprovechar la energía cinética del viento para convertirla en energía eléctrica, al implementar un aerogenerador en el que se puede encontrar diferentes configuraciones que han sido aplicadas, siendo una de ellas que ha ido tomando gran fuerza en los sistemas de generación eólica, la cual es utilizando generadores doblemente alimentados (DFIG), debido a la gran conversión de energía eléctrica a velocidad variable, así como los métodos de control eficientes que ayudan aprovechar mejor la energía cinética del viento.

Impactos Ambientales: La generación de energía eólica se ha ido presentado como una de las mejores alternativas para reemplazar y reducir las centrales convencionales de generación eléctrica, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero y reemplazando los usos energéticos de los combustibles fósiles, especialmente el del petróleo, así también permitiendo el suministro de energía eléctrica a comunidades rurales y marginales.

Impactos Sociales: Al generar energía limpia a partir de la energía cinética del viento, permite que la sociedad cuide el medio ambiente, al utilizar energía completamente renovable, así también mejorando la calidad de vida de las personas al instalar aerogeneradores en zonas marginales, permitiendo que accedan mayor gente a este servicio básico, además que en un futuro cercano se llegue a ser un país que promueva y sea referente en el uso de esta energía.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La tecnología asociada a la generación eólica ha avanzado significativamente, presentando en los últimos años varios estudios que han permitido garantizar una respuesta optima en la salida ante los cambios bruscos de la velocidad del viento los cuales puedan generar efectos negativos en la red o en la turbina, siendo una de ellas la estrategia de seguimiento de extracción de máxima potencia (MPPT) , la cual permite operar en el punto óptimo en cualquier régimen de viento y está dado por la relación de velocidad de punta optima y el ángulo optimo ($\beta=0$), y el control GSC el cual ayuda a tener estable el voltaje en enlace de corriente continua además de controlar el intercambio de flujo de potencia reactiva entre la red y el rotor de la máquina.
- La turbina tipo 3 permite inyectar y absorber potencia reactiva a la red con la intención mantener constante el factor de potencia, además de que presente un amplio rango de control de potencia activa y reactiva a distintas velocidades de operación. La configuración elegida se simuló mediante el software Simulink/Matlab y se realizó un control de velocidad indirecta , donde el ángulo de inclinación se mantiene constante en el valor optimo, mientras que la velocidad de punta se ajustas al valor óptimo para diferentes velocidades del viento adaptando la velocidad del rotor a su referencia, además de un control INNER LOOP, el cual modifica las corrientes de potencia activa y reactiva dq0 del sistema, conjuntamente con un control OUTHER LOOP que aporta con señales de referencia Vdq, y un control PWM encargado de mandar los pulsos a los convertidores para de esta manera entregar a la salida del convertidor back to back la máxima cantidad de potencia generada por el aerogenerador.

- El control es desarrollado conociendo el circuito equivalente de la máquina y actuando sobre las tensiones rotóricas y tensiones de la red, es así que al introducir la acción integral nos permite eliminar el error en régimen permanente, siendo así que no se considera la parte derivativa, debido a que más que una mejora en esta situación, es un problema ya que amplifica el ruido existente, además para este tipo de aerogeneradores se utiliza reguladores de corriente sincrónicos, ya que estos al ser implementados en un marco de referencia sincrónico son ampliamente aceptada para este tipo de controles.
- Los resultados obtenidos demuestra que la simulación mantiene un factor de potencia constante y muy cercano a la unidad con un valor de 0.95 ,además se corrobora con el ejemplo Matlab Wind Farm – DFIG Detailed Model , dando así un margen de error de 24% y 3% , en potencia activa y reactiva respectivamente entregadas a la barra infinita ,debido a que la electrónica de potencia para dichas simulaciones es diferente , y flujo de potencias desarrollado en el software ETAP dando como resultado un margen de error del 3,44% en potencia activa, mientras que en potencia reactiva es del 24,75%, debido a que no se implementa ningún tipo de control , pero se puede visualizar que a la salida del aerogenerador tiene una potencia reactiva de 0, corroborando así la investigación.

Recomendaciones

- Considerar nuevas investigaciones en las cuales se recomienda la implementación de estrategias de control más eficientes, teniendo en cuenta el factor económico.
- Utilizar otros tipos de software de simulación virtual donde se pueda realizar el control de la potencia activa y reactiva del sistema de generación eólica utilizando máquinas de inducción doblemente alimentadas, y enfocándose en el estado dinámico, capaz de observar la respuesta del sistema ante perturbaciones.
- Promover el diseño de sistemas de generación eólica utilizando máquinas de inducción doblemente alimentadas, para ayudar al cambio de la matriz energética del país.
- Realizar un análisis técnico-económico para la construcción de aerogeneradores de velocidad variable basados en generadores doblemente

alimentados, para determinar el costo de la implementación que tendrá en el país.

BIBLIOGRAFÍA

[1] D. F. Barrero Leal , Regulación de potencia de un aerogenerador de eje horizontal a partir de un sistema de control de velocidad de rotación, 2014.

[2] O. Díaz Toste, Comparación entre el comportamiento en régimen dinámico del aerogenerador de inducción doblemente alimentado y el de inducción jaula de ardilla, 2010.

[3] C. Henin, G. Iannace, L. Maffei, I. Roggio y G. Miretti, RUIDO DE GENERADORES EOLICOS ANALISIS Y APLICACION DE LA METODOLIA DE MEDICION SEGUN NORMATIVA VIGENTE, 2010.

[4] A. Arroyo Gutiérrez , M. Mañana Canteli, R. Martínez Torre, J. Mirapeix Serrano y C. Capellán Villacián , Energía y Telecomunicaciones, Santander , 2017.

[5] G. Abad, J. López, M. Rodríguez, L. Marroyo y G. Iwanski, DOUBLY FED INDUCTION MODELING AND CONTROL, Canada: IEEE Press, 2011.

[6] R. Y. Venkata Narasimha, PREDICTIVE CONTROL OF MULTILEVEL CONVERTERS FOR MEGAWATT WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS, Toronto-Canada , 2014.

[7] S. Sáenz Robles, «Biblioteca de Ingeniería Univerisdad de Sevilla- Generación Eólica El Aerogenerador, Tipos y Clasificación,» 20 Febrero 2013. [En línea]. Available: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5189/fichero/7.+Cap%C3%ADtulo+2.pdf. [Último acceso: 21 Abril 2020].

[8] A. Calo García, Simulacion del Funcionamiento de una Turbina Eólica con Generaor de Inducción Doblemente Alimentado, 2015.

[9] M. P. Guillén, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CONVERTIDOR ELECTRÓNICO BACK TO BACK PARA GRUPO DE GENERACIÓN DFIG DE 5KVA PARA TURBINAS EÓLICAS, Madrid, 2018.

[10] D. A. Acuña Morales, OPCIONES DE CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN AEROGENERADORES CON INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO (DFIG), 2013.

[11] F. Bianchi, H. De Battista y R. Mantz, Wind Turbine Control Systems, La Plata : Springer, 2006.

[12] F. E. Rodarte Gutiérrez, J. J. Rodríguez Rivas, O. Carranza Castillo y R. Ortega González, CONTROLADOR DE TENSIÓN Y CORRIENTE EN BUS DE CD DE UN CONVERTIDOR BACK-TO-BACK POR EL LADO DE LA RED PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA, México, 2018.

[13] J. Alcalá, V. Cárdenas, J. Pérez y R. Álvarez, «Asociación de México de Contol Automático,» 2011. [En línea]. Available: http://amca.mx/memorias/amca2011/papers/amca2011-51-tema10.pdf.

[14] C. García Santacruz, COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA EL CONTROL DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA MULTINIVEL, Sevilla, 2016.

[15] E. A. Cerón Rodríguez y A. J. Ventura Rodríguez, DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIGITAL, PARA LA VELOCIDAD DE UNA TURBINA EÓLICA, San Salvador, 2018.

[16] H. Abu-Rub, M. Malinowski y K. Al-Haddad, POWER ELECTRONICS FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS, TRANSPORTATION AND INDUSTRIAL APPLICATIONS, India: IEEE PRESS, 2014.

[17] G. ABAD, Power Electronics and Electric Drives for Traction Applications, España: Wiley, 2017.

[18] M. ÖZAKTÜRK, Modelling and Control System Design for Doubly-Fed Induction Generator Based Wind Turbines, Turquia, 2017.

[19] M. Bourdoulis y A. Alexandridis, A New Controller Design and Analysis of DFIG Wind Turbine Systems for MPP Operation, Croacia, 2013.

[20] A. Wulf Vilina, METODOLOGÍA PARA PROYECTOS DE CENTRALES EOLO-ELÉCTRICAS CON GENERADOR DOBLEMENTE ALIMENTADO, 2012.

[21] M. Ozakturk, «Controller Loops Segmentation Design for Doubly-Fed Induction,» 2014. [En línea]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6993212.

[22] G. Calderón , J. Mina, J. Calleja y A. López, Modelado y simulación de un Sistema de Conversión de Energía Eólica de velocidad variable interconectado a la red eléctrica, México, 2014.

[23] E. E. Campos Montero, Diseño del Esquema de Control para un Convertidor Back-to-Back Multinivel Aplicado a la Generación de Energía Eólica con un DFIG, México , 2019.

[24] W. A. Vásquez Guerrero, MODELACIÓN, SIMULACIÓN Y CONTROL DE AEROGENERADORES CON GENERADOR DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADO UTILIZANDO MATLAB, Quito, 2014.

[25] The MathWorks, Asynchronous Machine, 2020.

[26] T. MathWorks, PWM Generator (2-Level), 2020.

[27] T. MathWorks, Power (dq0, Instantaneous), 2020.

[28] T. MathWorks, Power (3ph, Instantaneous), 2020.

ANEXOS

Anexo I: Código del Script del Archivo .m

```
%% UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
%% FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADA
%% CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
%% CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA EN SISTEMAS DE GENERACIÓN
EÓLICA USANDO UNA MÁQUINA DE INDUCCIÓN DOBLEMENTE ALIMENTADA

% Autores:
% Cayo Pallasco Ivan Paul
% Panchi Escobar Edison Xavier

clc
clear all
%% PARAMETROS DE LA MAQUINA REFERIDOS AL LADO DEL ESTATOR
f=60;      %FRECUENCIA DEL ESTATOR    (Hz)
Ps=2e6;    %POTENCIA NOMINAL DEL ESTATOR (W)
n=1500;    %VELOCIDAD ROTACIONAL NOMINAL  (rev/min)
Vs=690;    %VOLTAJE NOMINAL DEL ESTATOR (V)
Is=1760;   %CORRIENTE NOMINAL DEL ESTATOR (A)
Tem=12732; %TORQUE NOMINAL  (N*M)

p=2;       %NUMERO DE POLOS
u=1/3;     %RELACION DE VUELTAS DEL ESTATOR Y EL ROTOR
Vr=2070;   %VOLTAJE DEL ROTOR NOMINAL (V)
smax=1/3 ; % DESLIZAMINETO MAXIMO
Vr_stator=(Vr*smax)*u; %TENSIÃ“N NOMINAL DEL ROTOR REFERIDA AL ESTATOR (V)
Rs=2.6e-3; % RESISTENCIA DEL ESTATOR (OHM)
Lsi=0.087e-3; % INDUCTANCIA DE FUGA (ESTATOR Y ROTOR) (H)
Lm=2.5e-3; %INDUCTANCIA MAGNETISANTE (H)
Rr=2.9e-3; %RESISTENCIA DEL  ROTOR REFERIDA AL ESTATOR (OHM)
Ls=Lm+Lsi; %INDUCTNACIA DEL ESTATOR (H)
Lr=Lm+Lsi; %INDUCTANCIA DEL ROTOR  (H)
Vbus=1150; %TENSION CONTINUA DE LA BARRA REFERIDA AL LADO DEL ESTATOR(V)
sigma=1-Lm^2/(Ls*Lr);
Fs=Vs*sqrt(2/3)/(2*pi*f); %FLUJO DEL ESTATOR (Wb)

J=127;       %INERCIA
D=1e-3;      % COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO
```

```
fsw=4e3;      %FRECUENCIA DE CONMUTACION (Hz)
Ts= 1/fsw/50; %TIEMPO DE MUESTRA (sec)

%Reguladores PI

tau_i=(sigma*Lr)/Rr;
tau_n=0.05/4;
wni=100*(1/tau_i)/5;
wnn=1/tau_n;

kp_id=(2*wni*sigma*Lr)-Rr;
kp_iq=kp_id;
ki_id=(wni^2)*Lr*sigma;
ki_iq=ki_id;

n_r= [kp_id/(sigma*Lr),ki_id/(sigma*Lr)];
d_r= [1 , 2*wni , wni^2];

kp_n=(2*wnn*J)/p;
ki_n=((wnn^2)*J)/p;

%Modelo de turbina eólica de tres palas
N=100; %radio del gearbox
Radio=42; %radio de las aspas
ro=1.225;  %densidad del aire
%Cp an Ct curves
beta=0;
ind2=1;

for lambda=0.1:0.01:11.8
   lambdai(ind2)=(1./((1./(lambda-0.02.*beta)+(0.003./(beta^3+1)))));
   Cp(ind2)=0.73.*(151./lambdai(ind2)-0.58.*beta-0.002.*beta^2.14-13.2).*(exp(-18.4./lambdai(ind2)));
   Ct(ind2)=Cp(ind2)/lambda;
   ind2=ind2+1;
end
tab_lambda=[0.1:0.01:11.8];

%kopt for MPPT
Cp_max=0.44;
```

```
lambda_opt=7.2;
Kopt =((0.5*ro*pi*(Radio^5)*Cp_max)/(lambda_opt^3));
%power curve in function of wind speed
P=1.0e+06*[0,0,0,0,0,0,0,0.0472,0.1097,0.1815,0.2568,0.3418,...
  0.4437,0.5642,0.7046,0.8667,1.0518,1.2616,1.4976,1.7613,2.0534,...
  2.3513,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024,2.4024];
V=[0.0000,0.5556,1.1111,1.6667,2.2222,2.7778,3.3333,3.8889,4.4444,...
  5.0000,5.5556,6.1111,6.6667,7.2222,7.7778,8.3333,8.8889,9.4444,...
  10.0000,10.5556,11.1111,11.6667,12.2222,12.7778,13.3333,13.8889,...
  14.4444,15.0000];

%grid side converter
Cbus=80e-3;
Rg=20e-6;
Lg=400e-6;

Kpg=1/(1.5*Vs*sqrt(2/3));
Kqg=-Kpg;

%pi regulators
tau_ig=Lg/Rg;
wnig=60*2*pi;

kp_idg=(2*wnig*Lg)-Rg;
kp_iqg=kp_idg;
ki_idg=(wnig^2)*Lg;
ki_iqg=ki_idg;

n_g= [kp_idg/Lg,ki_idg/Lg];
d_g= [1 , 2*wnig , wnig^2];

kp_v=-1000;
ki_v=-300000;

Rcrowbar = 1/5;
```

Anexo II: Transformada de Clarke y Park

Para la estrategia de control tanto para el lado del rotor como para el lado de la red la transformación de park es de gran utilidad para las variables eléctricas trifásicas, permitiendo transformar un sistema de coordenadas (abc) a un sistema de ejes (dq0).

La transformada de park en referencia estacionaria o transformada de Clarke es que permite multiplicar las componentes trifásicas de la magnitud a transformar por la matriz T de transformación la cual se representa a continuación:

$$T = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

Para realizar la operación inversa, se deberá multiplicar las componentes de clarke por la matriz de transformación inversa.

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

Comprendiendo así que al transformar una componente trifásica y anti transformar de nuevo, el resultado es la componente trifásica inicial como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = T * T^{-1} * \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

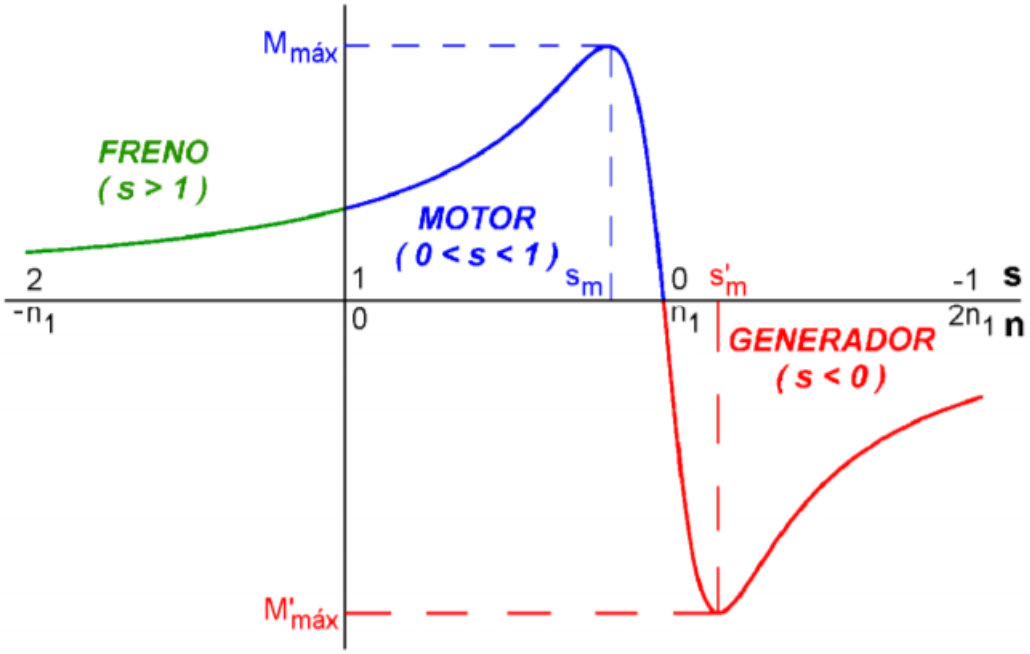
Para que realizar un cambio de marco de referencia o hacer que el marco de referencia siga un ángulo θ_α cualquiera, es esencial multiplicar las componentes transformadas de Clarke por la matriz de rotación directa M como se aprecia a continuación:

$$M = \begin{bmatrix} cos\theta_\alpha & -sin\theta_\alpha & 0 \\ sin\theta_\alpha & cos\theta_\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La transformada de rotación inversa es la misma matriz M a la que se debe aplicar un ángulo negativo.

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_\alpha) & -\sin(-\theta_\alpha) & 0 \\ sin(-\theta_\alpha) & cos(-\theta_\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_\alpha) & \sin(\theta_\alpha) & 0 \\ -sin(\theta_\alpha) & cos(\theta_\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Anexo III: Modos de operación de la máquina.



La máquina de inducción puede funcionar como: motor, freno electromagnético y generador.

a) Motor

La máquina funciona como motor cuando la velocidad angular del rotor ωr está comprendida en el siguiente rango:

$$0 < \omega_r < \omega_s$$

En función del deslizamiento se tiene:

$$0 < s < 1$$

b) Freno Electromagnético

En este modo de operación teóricamente la velocidad del rotor está entre:

$$-\infty < \omega_r < 0$$

Y su deslizamiento entre:

$$1 < s < \infty$$

c) Generador

La máquina de inducción funciona como generador cuando a través de algún medio motriz externo se hace girar al rotor con una velocidad mayor a la velocidad del campo magnético giratorio del estator, provocando que el deslizamiento sea negativo y que el fuljo magnético resultante sea opuesto al sentido de giro del rotor. Las condiciones en función de las velocidades del rotor y de deslizamiento para el funcionamiento como generador son las siguientes:

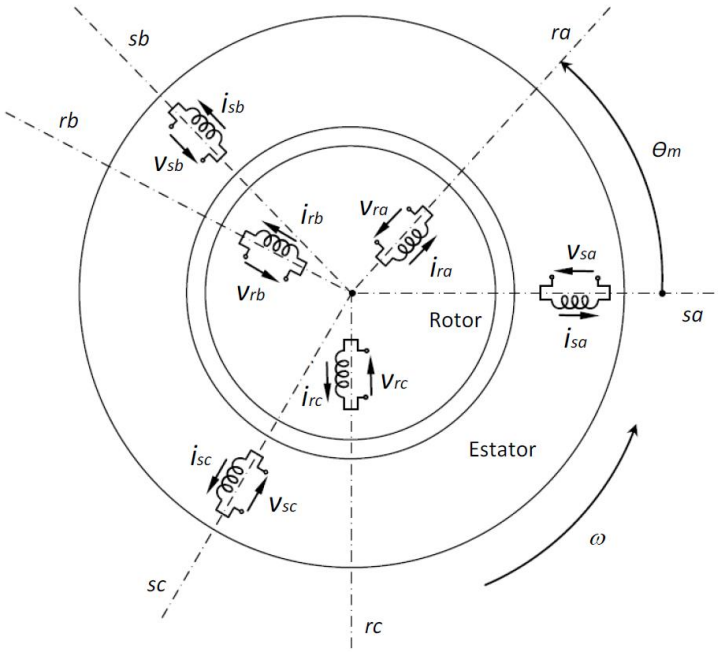
$$\omega_s < \omega_r < \infty$$

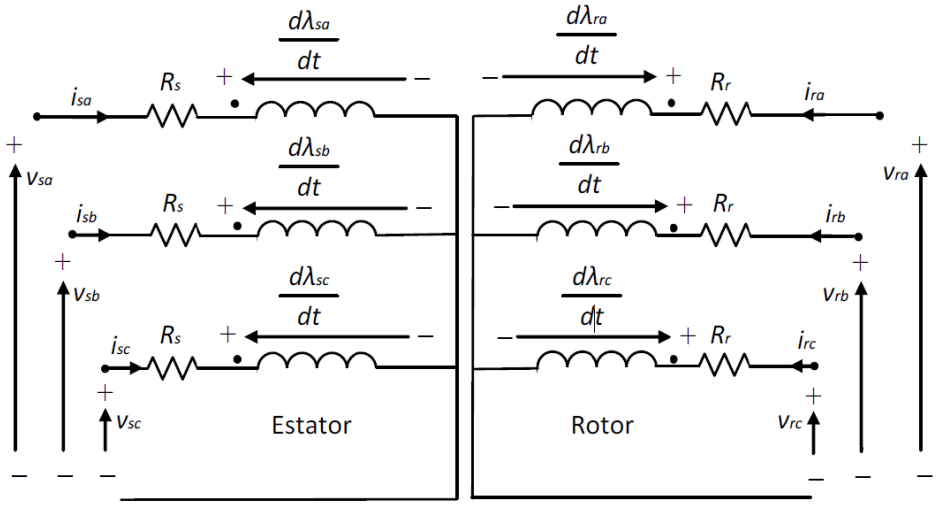
En función del deslizamiento se tiene:

$$-\infty < s < 0$$

Anexo IV: Modelo del DFIG

La máquina DFIG es trifásica y se la considera que los devanados tanto del rotor como del estator se encuentran conectados en estrella, son simétricos y están balanceados y los núcleos se consideran con pérdidas despreciables. El esquema del DFIG junto con el circuito equivalente de los devanados se muestra en la siguiente figura.





Siendo las ecuaciones que se dan a conocer ha continuación las que describen los voltajes en el estator y el rotor.

$$V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\lambda_{sa}}{dt}$$

$$V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\lambda_{sb}}{dt}$$

$$V_{sa} = R_s i_{sc} + \frac{d\lambda_{sc}}{dt}$$

$$V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\lambda_{ra}}{dt}$$

$$V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\lambda_{rb}}{dt}$$

$$V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\lambda_{rc}}{dt}$$

Así también el DFIG consta de un circuito acoplado magnéticamente, los enlaces de flujo pueden expresarse con las siguientes matrices:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{sabc} \\ \lambda_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix}$$

Donde:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix}$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix}$$

Obteniendo las matrices anteriores a partir de las ecuaciones de distribución de los conductores en los devanados después de realizar algunas sustituciones.

Siendo L_{ls} y L_{ms} las inductancias de dispersión y de magnetización del estator, respectivamente, mientras que L_{lr} y L_{mr} las inductancias de dispersión y de magnetización de rotor. La inductancia mutua entre el estator y el rotor es L_{sr} .

Partiendo de las ecuaciones en abc del modelo del DFIG se procede a realizar la transformación al modelo dq0 utilizando la transformada de Park invariante en magnitud. Como el sistema se considera balanceado la componente 0 se anula y las ecuaciones del modelo en dq0 son las siguientes:

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_s i_{sq} - \omega_s L_m i_{rq} + L_m \frac{di_{rd}}{dt}$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_s L_s i_{sd} + \omega_s L_s i_{rd} + L_m \frac{di_{rq}}{dt}$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_{sl} L_r i_{rq} - \omega_{sl} L_m i_{sq} + L_m \frac{di_{sd}}{dt}$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_{sl} L_r i_{rq} + \omega_{sl} L_m i_{sd} + L_m \frac{di_{sq}}{dt}$$

La potencia activa y reactiva generada tanto por el estator como del rotor en el marco de referencia dq0 están dadas por:

$$P_s = \frac{3}{2}(v_{sd}i_{sd} + v_{sq}i_{sq})$$

$$Q_s = \frac{3}{2}(v_{sq}i_{sd} - v_{sd}i_{sq})$$

$$P_r = \frac{3}{2}(v_{rd}i_{rd} + v_{rq}i_{rq})$$

$$Q_r = \frac{3}{2}(v_{rq}i_{rd} - v_{rd}i_{rq})$$

Anexo V: Variables de la máquina en el marco de referencia dq:

El modelo de vector espacial de la DFIG puede representarse en un marco de referencia dq de rotación sincrónica de la siguiente manera:

$$\vec{v}_s = R_s\overrightarrow{i_s} + \sigma L_r\frac{d\overrightarrow{\omega_s}}{dt} + j\overrightarrow{\omega_s}\overrightarrow{\Psi_s}$$

$$\vec{v}_r = R_r\overrightarrow{i_r} + \sigma L_r\frac{d\overrightarrow{\omega_r}}{dt} + j\overrightarrow{\omega_r}\overrightarrow{\Psi_r}$$

De igual manera del estator y el rotor:

$$\Psi_s = L_s i_s + L_m i_r$$

$$\Psi_r = L_s i_r + L_m i_r$$

Torque electromagnético:

$$\mathrm{T}_{em} = \frac{3}{2}\,p\frac{L_m}{L_s}(\Psi_{qs}i_{dr} - \Psi_{ds}i_{qr})$$

Anexo VI: Obtención de las constantes kp y ki en el lado de la red

Para la sintonización de los reguladores PI con un filtro se comienza hallando las ecuaciones de tensión del lado de la red en el sistema dq0, siendo dichas ecuaciones las siguientes:

$$V_{dg} = R_f * i_{dg} + L_f\frac{di_{dg}}{dt}$$

$$V_{qg} = R_f * i_{qg} + L_f\frac{di_{qg}}{dt}$$

Posteriormente se aplica la transformada de Laplace derivándose así las siguientes funciones de transferencia:

$$\frac{i_{dg}(s)}{V_{df}(s)} = \frac{1}{L_f s + R_f}$$

$$\frac{i_{qg}(s)}{V_{qf}(s)} = \frac{1}{L_f s + R_f}$$

Para consiguiente llevarlo a un modelo de bucle cerrado de corriente dándose las siguientes ecuaciones:

$$\frac{i_{dg}(s)}{{i_{ds}}^*(s)} = \frac{skp + ki}{s^2(L_f) + s(R_f + kp) + ki}$$

$$\frac{i_{qg}(s)}{{i_{qs}}^*(s)} = \frac{skp + ki}{s^2(L_f) + s(R_f + kp) + ki}$$

Gracias a estas expresiones de corriente en bucle cerrado, es posible afinar las ganancias de los actuales reguladores de PI, igualando los denominadores de las funciones, al denominador estándar de segundo orden de las teorías de control clásicas, como se detalla a continuación:

$$s^2(L_f) + s(R_f + kp) + ki = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$$

Obtenido así las ecuaciones de kp y ki:

$$k_i = L_f \omega_n^2$$

$$k_p = 2L_f \omega_n - R_f$$

Anexo VII: Obtención de las constantes kp y ki en el lado del rotor

Para la sintonización de los reguladores PI se comienza hallando las ecuaciones de tensión del lado del rotor en el sistema dq0, siendo dichas ecuaciones las siguientes:

$$V_{dr} = R_r i_{dr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{dr} - \omega_r \sigma L_r i_{qr} + \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \left|\overrightarrow{\Psi_s}\right|$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{qr} - \omega_r \sigma L_r i_{dr} + \omega_r \frac{L_m}{L_s} \frac{d}{dt} \left|\overrightarrow{\Psi_s}\right|$$

Posteriormente se busca las ecuaciones de las corrientes en el sistema dq0 cuales muestran el comportamiento dinámico de dichas corrientes con un desacoplamiento ideal.

$$\frac{i_{ds}(s)}{V_{ds}(s)}\frac{i_{qs}(s)}{V_{qs}(s)} = \frac{1}{\sigma L_s s + R_s}$$

Para consiguiente llevarlo a un modelo de bucle cerrado de corriente donde las ecuaciones vienen dadas de la siguiente manera:

$$\frac{i_{ds}(s)}{{i_{ds}}^*(s)} = \frac{skpi + kii}{s^2(\sigma L_f) + s(R_f + kpi) + kii}$$

$$\frac{i_{qs}(s)}{{i_{qs}}^*(s)} = \frac{skpi + kii}{s^2(\sigma L_f) + s(R_f + kpi) + kii}$$

Después se igualan los denominadores de las funciones, al denominador estándar de segundo orden de las teorías de control clásicas, como se muestra a continuación:

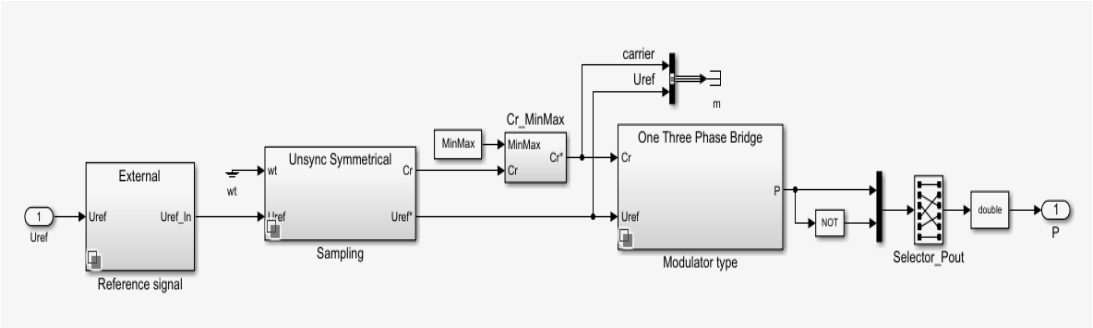
$$s^2(\sigma L_s) + s(R_s + kpi) + kii = s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2$$

Obtenido así las ecuaciones de kp y ki:

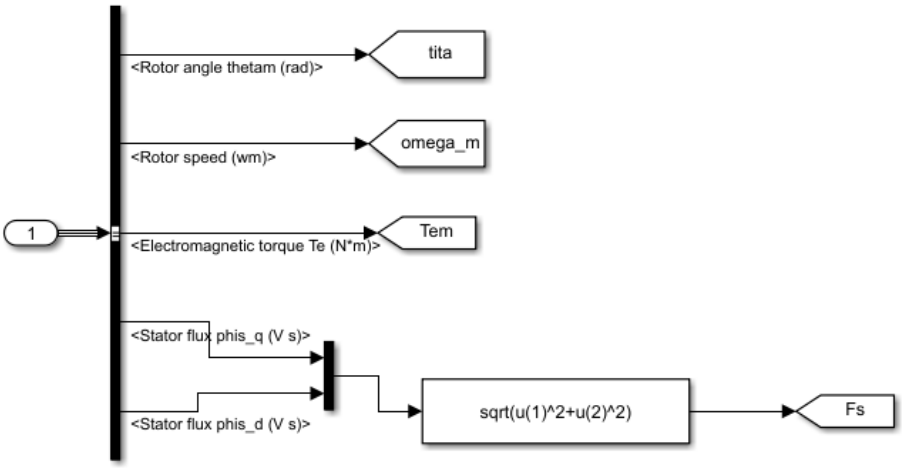
$$k_{ii} = \sigma L_s \omega_n^2$$

$$k_{pi} = 2\sigma L_s \omega_n - R_s$$

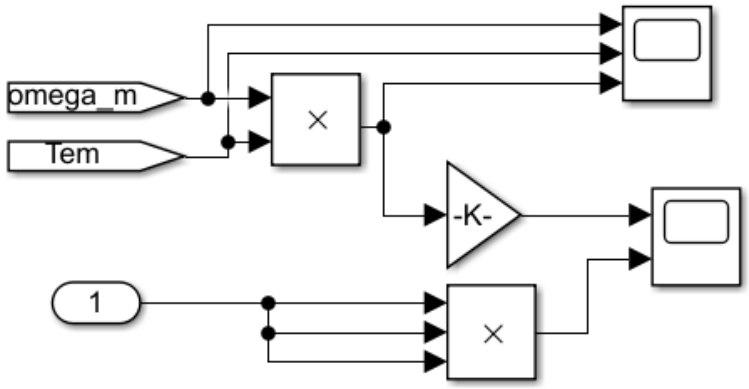
Anexo VIII: Diagrama interno del PMW generador de Pulsos



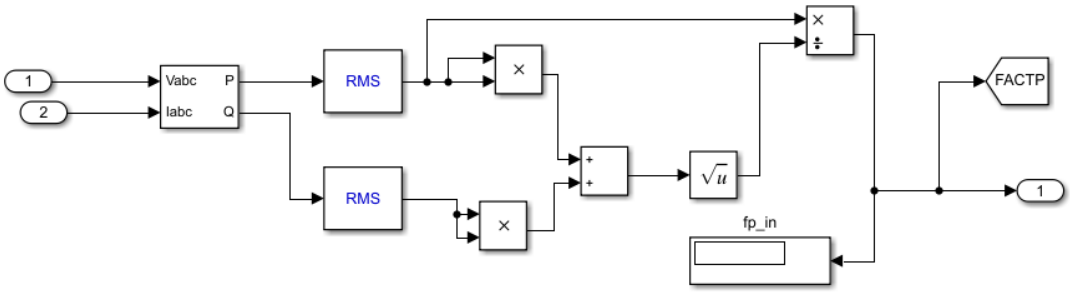
Anexo IX: Variables de salidas de la máquina asíncrona



Anexo X: Vista interna del Bloque de visualización de Variables

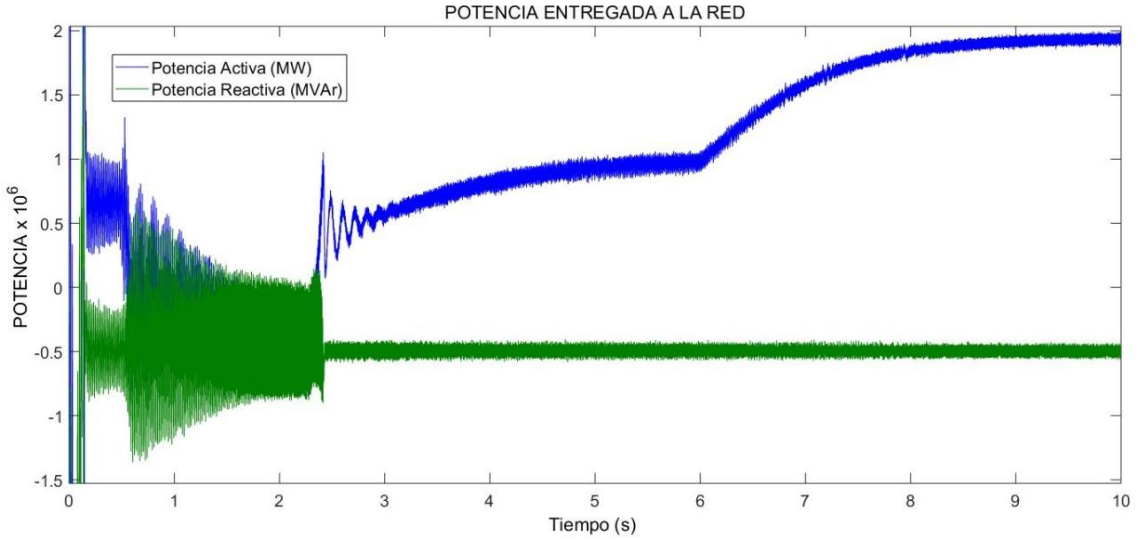


Anexo XI: Diagrama de Bloques para el Cálculo del Factor de Potencia

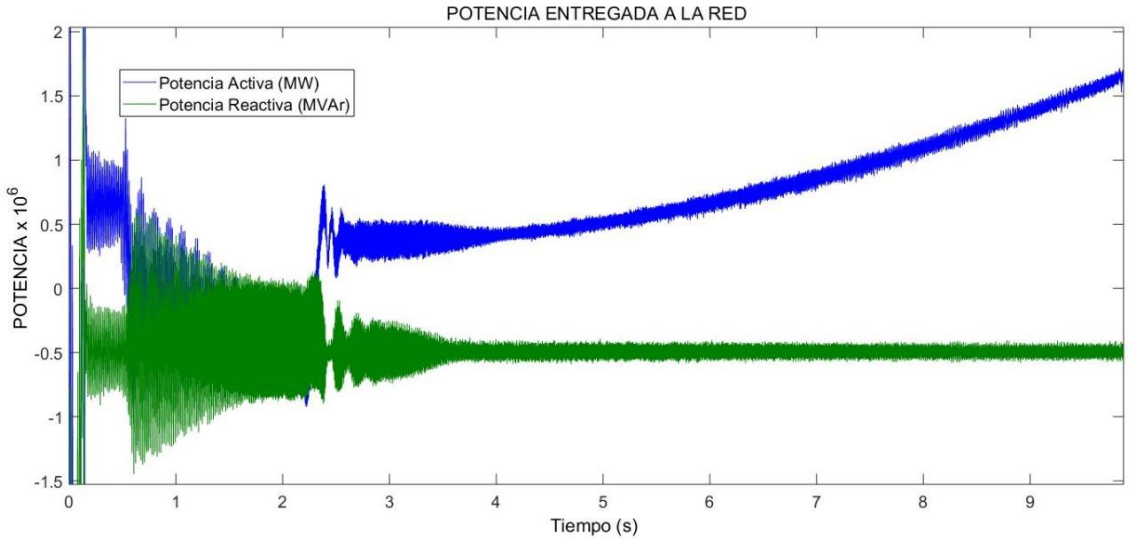


Anexo XII: Curvas de Potencia activa y reactiva ante diferentes tipos de entrada

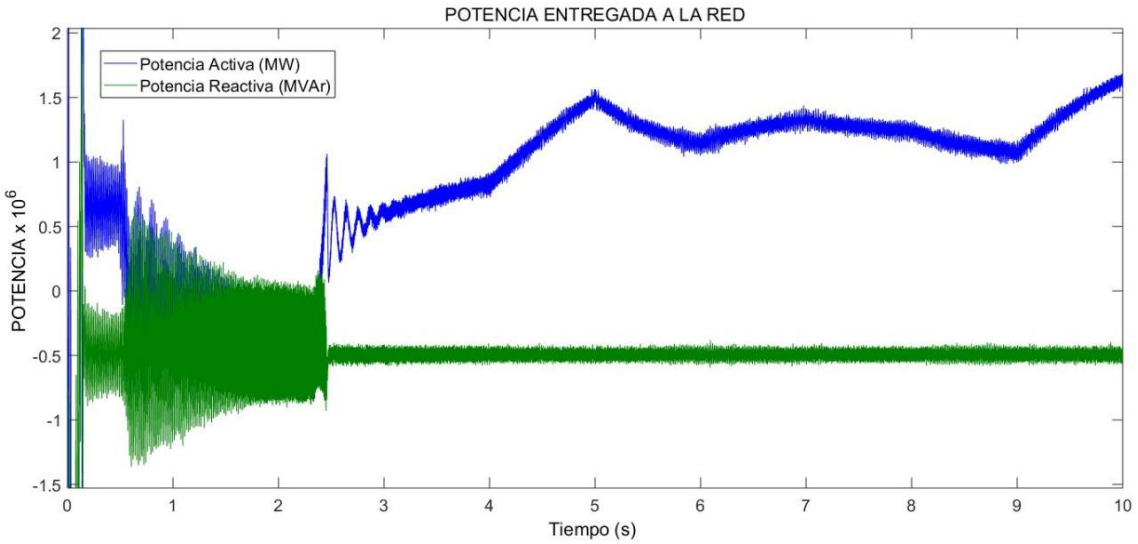
Señales de potencia activa y reactiva ante una entrada escalón.



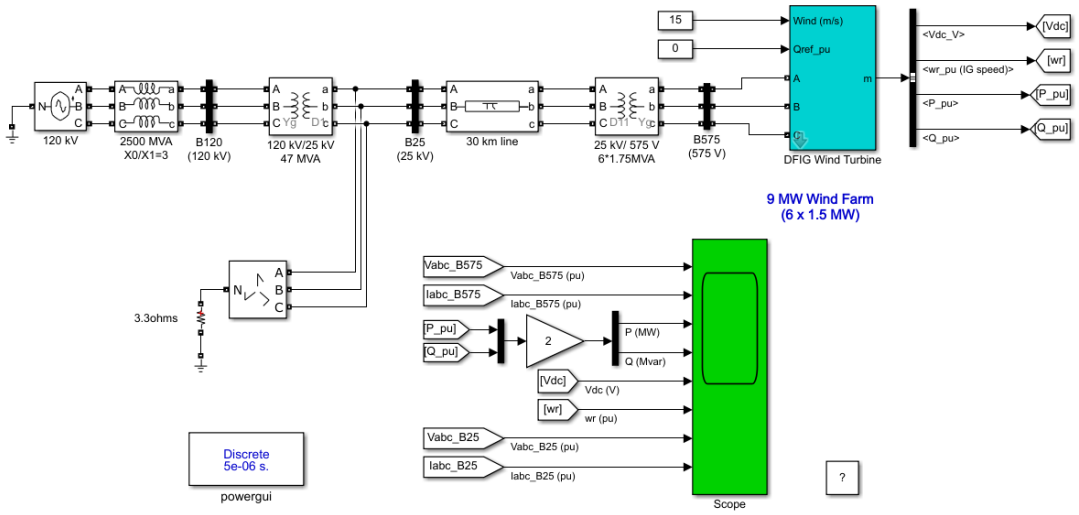
Señales de potencia activa y reactiva ante una entrada tipo rampa.



Señales de potencia activa y reactiva ante una entrada variable.



Anexo XIII: Matlab "Wind Farm – DFIG Detailed Model"



Wind Farm - DFIG Detailed Model