



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

**CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
POTENCIA**

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE UN
AEROGENERADOR”.**

AUTORES:

Freire Freire Armando Salvador

Toapanta Rocha Luis Miguel

TUTOR:

Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván

LATACUNGA - ECUADOR

2020

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Freire Freire Armando Salvador y Toapanta Rocha Luis Miguel, declaramos ser autores del presente proyecto de investigación: **“SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE UN AEROGENERADOR”**, siendo Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván, Director 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.

FREIRE FREIRE ARMANDO SALVADOR
050384283-3

TOAPANTA ROCHA LUIS MIGUEL
172432895-8

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

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

“SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE UN AEROGENERADOR”, de los señores Freire Freire Armando Salvador y Toapanta Rocha Luis Miguel, 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, Febrero, 2020

Tutor



Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Iván

APROBACIÓN DEL 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: **Freire Freire Armando Salvador** y **Toapanta Rocha Luis Miguel**, con el título de Proyecto de titulación: **“SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE UN AEROGENERADOR”**, 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, febrero 2020

Para constancia firman:



Lector 1 (Presidente)
Nombre: Ph. D Secundino Marrero
CC: 175710740-7



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



Lector 3
Nombre: Ing. MSc. Franklin Vásquez
CC: 171043449-7

AGRADECIMIENTOS

Nuestro más sincero y grande agradecimiento al Ing. Carlos Quinatoa por habernos guiado, compartiendo conocimientos y por ayudarnos en la realización de nuestro tema de tesis.

A nuestros padres, por darnos su apoyo constante y haber guiado de la mejor manera siendo el pilar fundamental para la culminación de nuestros objetivos.

Nuestro sincero reconocimiento y gratitud a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrimos las puertas de la Institución, para podernos formar como profesionales, impartiendo conocimientos de vital importancia para nuestro desempeño en el campo profesional, a mi gloriosa y grande carrera de Ingeniería Eléctrica.

Armando y Miguel

DEDICATORIA

En primer lugar dedico a Dios, por darme la vida y la sabiduría necesaria para realizar todos mis objetivos hasta ahora, segundo a mi gran madre Soledad Freire que con mucho esfuerzo y trabajo, cumplió el rol de padre y madre a la vez para culminar mis estudios universitarios, también a una gran mujer que me educó en valores y me enseñó que con trabajo duro y honrado, todo se puede, a mi abuelita Felipa Freire que desde el cielo nos da sus bendiciones y a mi hermano Marco Maigua que siga adelante en sus estudios que nada es imposible cuando uno se lo propone.

A Sandro Arcos y Blanca Guangashi que a más de ser mis jefes de trabajo fueron como un padre y una madre para mí, al apoyarme, aconsejarme y brindarme esa confianza absoluta para trabajar y estudiar para sacar adelante a mi familia.

Finalmente, a mi enamorada Carolina Tarco que estuvo siempre a mi lado a pesar del tiempo y la distancia y me ayudo con su apoyo incondicional en los últimos años de mi carrera universitaria.

Armando Freire

DEDICATORIA

Dedico primero a Dios, por permitirme día a día una nueva oportunidad de vida, segundo a mis padres Segundo Miguel y Blanca Celestina por su apoyo, consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos más difíciles y por dotarme de todos los recursos necesarios para estudiar y llegar al final de esta etapa de mi vida.

A mis hermanos José David, Jessica Cristina, Angélica Patricia y Erick Danilo por ser mi motivación e inspiración para seguir adelante.

A la teacher Erika Borja por el gran apoyo y consejos durante toda es etapa universitaria.

Miguel Toapanta

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
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.....	4
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	4
4. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO.....	5
Beneficiarios directos	5
Beneficiarios Indirectos	5
5. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	5
6. OBJETIVOS.....	6
General.....	6
Específicos	6
7. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS	6
8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	7
8.1. Energía Eólica.....	7
8.1.1. Turbina eólica.....	8
8.1.2. Ley de Betz.....	9
8.1.3. Coeficientes de potencia y par de un aerogenerador.....	10

8.1.4. Velocidad de las Turbinas: fija y variable.....	12
8.2. Componentes del Sistema.....	13
8.3. Tipos de generadores de turbinas eólicas.....	14
8.4. Configuraciones del sistema de conversión de energía eólica.....	14
8.4.1. Aerogenerador de velocidad Fija	15
8.4.2. Aerogeneradores de deslizamiento variable.....	15
8.4.3. Aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).....	16
8.4.4. Aerogeneradores de convertidor completo.....	17
8.5. Estrategias de control.....	18
8.5.1. Control de parada pasiva	19
8.5.2. Control de inclinación	19
8.5.3. Control de parada activa.....	19
8.6. Electrónica de potencia para aerogeneradores.....	20
8.6.1. Modulación de ancho de pulso (PWM).....	21
8.7. Marco de referencia síncrono (SRF).....	24
8.8. Control de lazo bloqueado de fase (PLL)	24
8.8.1. Control de lazo interno (Inner Loop)	25
8.8.2. Control de lazo externo (Outer Loop)	27
9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS	28
10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL	28
Modalidades de la Investigación.....	28
Técnicas de investigación	28
11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	29
Simulación del control de potencia activa y reactiva de un aerogenerador.....	29
Modelo de la turbina eólica	29
Máquina síncrona de imanes permanentes (PMSG).....	32
Control en lado del generador.....	34
Control Outer Loop	34
Control Inner Loop.....	35
Índice de Modulación.....	38
Control PLL.....	40
Transformada de Clarke y Park.....	41
Control INNER LOOP	44
Método de modulus optimum para encontrar Kp y Ki.....	45

Control OUTER LOOP	47
Espacio vectorial por modulación de ancho de pulso (SVPWM)	49
Control orientado de voltaje (VOC)	50
Integración de todos los bloques en la Simulación del Control de Potencia Activa y Reactiva de un Aerogenerador	52
IMPACTOS	61
Impactos Técnicos	61
Impactos Ambientales	61
Impactos Sociales	61
12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
13. BIBLIOGRAFÍA	63
14. ANEXOS	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución en el tamaño de la turbina eólica (Φ : diámetro de rotor, H: altura).....	9
Figura 2. Ley de Betz.	10
Figura 3. Coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$	12
Figura 4. Sistema de conversión de energía eólica.....	13
Figura 5. Tipos de generadores en los sistemas de conversión de energía eólica.	14
Figura 6. Tipo A Velocidad fija ($\pm 1\%$) WECS con SCIG.	15
Figura 7. Tipo B Semi de velocidad variable ($\pm 10\%$) WECS con WRIG.	16
Figura 8. Tipo C Semi de velocidad variable ($\pm 30\%$) WECS con DFIG.....	17
Figura 9. Tipo D velocidad variable completa (0-100%) WECS con SCIG o PMSG o WRSG.....	17
Figura 10. Curva de operación de la turbina eólica.....	19
Figura 11. Aerogenerador de velocidad variable – flujos de potencia activa y reactiva (superior) y Diagrama de fases y factor de potencia (inferior).....	20
Figura 12. Modulación sinusoidal de ancho de pulso (PWM).	22
Figura 13. Topología del convertidor de tensión de dos niveles (VSC) simplificado.	22
Figura 14. Estado de conmutación de un convertidor de seis pulsos (SVPWM).....	23
Figura 15. Conmutación de posiciones vectoriales para el SVPWM de dos niveles.....	23
Figura 16. Etapas de control y los respectivos marcos de referencia.	24
Figura 17. La estructura de un dq0 (PLL).	25
Figura 18. Diagrama del sistema PLL conectado a la red.....	25
Figura 19. Control de vector de corriente.....	26
Figura 20. Control outer loop.	27
Figura 21. Aerogenerador tipo 4 de velocidad variable con máquina síncrona de imanes permanentes (PMSG).	29
Figura 22. Potencia máxima a una velocidad de 12m/s con ángulo de beta a 0°	31
Figura 23. Potencia de salida para diferentes ángulos de beta= 0° , 5° , 10° , 15° y 20°	32
Figura 24. Bloque de máquina de imanes permanentes.	32
Figura 25. Curva de potencia de salida en por unidad.	33
Figura 26. Velocidad del rotor (superior) y torque electromagnético (inferior).	34
Figura 27. Esquema de control Outer Loop lado de generación.	34
Figura 28. Señal de la corriente de referencia en el control outer loop (I_d).....	35
Figura 29. Señales de corrientes y de referencia en el eje dq.....	36
Figura 30. Control Inner Loop lado de generación.	36
Figura 31. Señal moduladora.....	37
Figura 32. a) Transformada de Park de las corrientes, b) Velocidad de rotación para la transformación de Park.	37
Figura 33. Modulación de ancho de pulso PWM.	38
Figura 34. Pulsos que ingresan al rectificador.....	38
Figura 35. Esquema de simulación en el lado del generador.	39
Figura 36. Simulación del control PLL sincronizado con la red.	40
Figura 37. Ángulo de fase theta (Θ) con respecto a la onda de voltaje de fase de la red.....	41
Figura 38. Frecuencia estable al valor de 60 Hz.	41
Figura 39. Simulación de transformación de Clarke y Park.....	42

Figura 40. Curvas de la transformada de Clarke y Park.....	42
Figura 41. Simulación del control inner loop.....	44
Figura 42. Diagrama de bloques reducido en los ejes d y q.....	45
Figura 43. Simulación del control outer loop.....	47
Figura 44. Bloque para el cálculo de P y Q.....	48
Figura 45. Generador SVPWM de segundo nivel.....	49
Figura 46. Simulación en lado de red.....	50
Figura 47. Esquema integrado los controles en el lado del generador y la red.....	52
Figura 48. Señal de enlace del Vdc.....	53
Figura 49. Señales de corriente abc a dq.....	54
Figura 50. Señal voltaje abc a dq.....	54
Figura 51. Señales de P. Activa (inferior)y Reactiva (superior).....	55
Figura 52. Señales obtenidas de la simulación propuesta.....	56
Figura 53. Porcentaje de armónicos del voltaje a la salida del inversor.....	56
Figura 54. Porcentaje de armónicos de la corriente a la salida del inversor.....	57
Figura 55. Entrada variable.....	58
Figura 56. Comportamiento de la señal Vdc ante una entrada variable.....	58
Figura 57. Comportamiento de las señales de corriente abc – dq ante la entrada variable.....	58
Figura 58. Entrada tipo rampa.....	59
Figura 59. Comportamiento del Vdc ante una entrada rampa.....	59
Figura 60. Comportamiento de las señales de corriente abc – dq ante la entrada rampa.....	59
Figura 61. Flujo de potencia del aerogenerador.....	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aplicaciones de turbinas eólicas.	8
Tabla 2. Parámetros de diferentes turbinas.	9
Tabla 3. Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de velocidad fija y variable.	12
Tabla 4. Ventajas y desventajas de las configuraciones de turbinas eólicas.	18
Tabla 5. Interruptores: valores nominales y características máximas.	21
Tabla 6. Parámetros de turbina.	29
Tabla 7. Velocidades del viento.	30
Tabla 8. Parámetros calculados a distintas velocidades del viento.	30
Tabla 9. Parámetros calculados a distintos valores de beta.	31
Tabla 10. Parámetros de la máquina.	32
Tabla 11. Constantes de control outer loop.	34
Tabla 12. Constantes de control inner loop.	36
Tabla 13. Parámetros utilizados para la simulación en el lado de red.	39
Tabla 14. Valores calculados y obtenidos de voltaje por el Programa.	43
Tabla 15. Valores calculados y obtenidos de corriente por el programa.	44
Tabla 16. Valores calculados y obtenidos por el programa.	45
Tabla 17. Parámetros del control inner loop en el lado de la red.	45
Tabla 18. Constantes de los controladores PI.	46
Tabla 19. Constantes PI en el outer loop.	47
Tabla 20. Valores calculados y obtenidos por el programa Matlab.	49
Tabla 21. Comparación de valores entre la simulación realizada y “Power Wind Type 4”....	60

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS

TITULO: “SIMULACIÓN DEL CONTROL DE POTENCIA ACTIVA Y REACTIVA DE UN AEROGENERADOR”

Autor/es: Freire Freire Armando Salvador
Toapanta Rocha Luis Miguel

RESUMEN

En esta investigación, se mostró el análisis y control de la potencia activa y reactiva en el lado de la red de un aerogenerador, debido a las variaciones de la velocidad del viento, las variables de estado son fluctuantes y no se pueden acoplar a la barra infinita, para este problema se realizó una simulación mediante el software Simulink/ Matlab, se implementó un sistema de control capaz de solucionar estos inconvenientes. Para el desarrollo de la investigación se analizó la literatura científica y metodológica para determinar el estado de arte de las configuraciones y modelados de control utilizados en generadores eólicos. Como resultado se empleó la configuración tipo D, debido a que presenta una mayor eficiencia para el Sistema de Conversión de Energía Eólica (WECS), basado en una máquina síncrona de imanes permanente (PMSG) por accionamiento directo, un control back to back que cuenta con un rectificador e inversor accionado por IGBT's, conectados a través de un condensador de corriente continua. El control de potencia activa se realizó por el lado del generador, por medio del máximo coeficiente de potencia, en el estudio realizado, se utilizó un control pitch angle, donde la máxima potencia entregada por la turbina se obtiene con un valor de β de 0 grados. Mientras tanto el control de potencia reactiva, voltaje y frecuencia se hizo por el lado de la red, para lo cual se implementó diferentes tipos de controles, denominado control orientado de voltaje o COV, se procede a la transformación de Clarke y Park, tanto para voltajes y corrientes con valores CC en un sistema de referencia estacionario, cuenta también con un control PLL que mantiene el valor de ángulo de fase sincronizado con el voltaje de la red, además un control INNER LOOP capaz de variar las corrientes de salida del inversor y finalmente junto al control OUTER LOOP que entrega corrientes de referencia para controlar la potencia activa y reactiva a la red, demostrando la eficacia de la estrategia de control propuesta en teoría.

Palabras claves: Aerogenerador, Potencia activa, Potencia reactiva, Voltaje y Frecuencia.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL

THEME: “SIMULATION OF THE CONTROL OF ACTIVE AND REACTIVE POWER OF AN AEROGENERATOR”

Authors: Freire Freire Armando Salvador
Toapanta Rocha Luis Miguel

ABSTRACT

In this research project, the analysis and control of the active and reactive power on the network side of an aerogenerator is shown, due to variations in wind speed, the state variables are fluctuating and cannot be coupled to the bar infinite, for this problem a simulation is performed using the Simulink / Matlab software, implemented a control system capable of solving these problems. For the development of the research project, the scientific and methodological literature is analyzed in order to determine the state of the art of the configurations and control models used in wind generators. As a result, the type D configuration is used, because it has a greater efficiency for the Wind Energy Conversion System (WECS), based on a permanent magnet synchronous gadget (PMSG) by direct drive, a back to back control that counts with a rectifier and inverter powered by IGBT's, connected through a direct current capacitor. The active power control is carried out by the generator side, by means of the maximum power coefficient, in the study carried out a control pitch angle is used, where the maximum power delivered by the turbine is obtained with a betha value of 0 degrees. Meanwhile the control of reactive power, voltage and frequency is done on the network side, for which different types of controls, called voltage control oriented or VCO, both for voltages and currents with DC values in a stationary reference system, it also has a PLL control that keeps the phase angle value synchronized with the grid voltage, in addition to an INNER LOOP control capable of varying the inverter's output currents and finally next to the OUTER LOOP control that delivers reference currents to control the active and reactive power to the network, demonstrated the effectiveness of the control strategy proposed in theory.

Keywords: Aerogenerator, Active power, Reactive power, Voltage and Frequency.

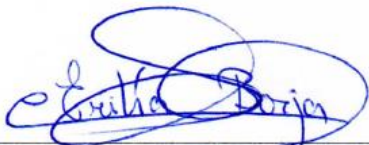
AVAL DE TRADUCCIÓN

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 del proyecto de investigación al Idioma Inglés presentado por los Señores Egresados de la Carrera de **Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, de los señores: **Freire Freire Armando Salvador y Toapanta Rocha Luis Miguel**, cuyo título versa “**Simulación del Control de Potencia Activa y Reactiva de un Aerogenerador**”, 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, febrero del 2020

Atentamente,



Msc. Erika Cecilia Borja Salazar
DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS
C.C. 0502161094

1. INFORMACIÓN GENERAL

Título del Proyecto:

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

Fecha de inicio:

Septiembre 2019

Fecha de finalización:

Febrero 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 una turbina eólica para generación de energía.
- Modelado, Control y Simulación de parques eólicos para contribuir a la regulación de frecuencia.
- Plataforma de simulación Matlab- Simulink de un accionamiento regulado para emular aerogeneradores.

Equipo de Trabajo:

- Ing. MSc. Quinatoa Caiza Carlos Ivan
- Freire Freire Armando Salvador
- Toapanta Rocha Luis Miguel

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:** Armando Salvador Freire Freire**Fecha de Nacimiento:** 17/10/1994**Estado Civil:** Soltero**Nacionalidad:** Ecuatoriana**Cédula de ciudadanía:** 050384283-3**Dirección:** Barrio Tapalán – Ignacio Flores – Latacunga**Teléfono:** 0984066776

Email: armando.freire2833@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela Fiscal “Dr. Isidro Ayora”, Latacunga -Ecuador.

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

Datos personales (Postulante 2):

Nombres y apellidos: Luis Miguel Toapanta Rocha

Fecha de Nacimiento: 10/08/1995

Estado Civil: Soltero

Nacionalidad: Ecuatoriana

Cédula de ciudadanía: 172432895-8

Dirección: Transversal Paquisha # 1- Barrio Primavera del Sur - Quito

Teléfono: 0958716140

Email: luis.toapanta8958@utc.edu.ec

Nivel primario: Escuela Fiscal “Latinoamérica Unida”, Quito - Ecuador.

Nivel secundario: Colegio Técnico Industrial “Miguel de Santiago”, Quito – 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 de la energía eléctrica.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente trabajo está orientado al 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, que se emplea un convertidor de fuente de voltaje (VSC), con una entrada de seis pulsos, por medio de la modulación por ancho de pulso en espacio vectorial (SVPWM). El trabajo abarca el sistema eléctrico del generador eólico y se concentra en maximizar la energía capturada del viento y realizar un control de forma eficiente, para con ello definir el estado de arte de las configuraciones y modelos de control 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 de Simulink/Simscape y flujo de potencia en el software ETAP.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Los Sistemas de Energía Eléctrica han sufrido una evolución desde sus orígenes hasta la actualidad, tanto en lo que se refiere a medios de generación, transporte, distribución y utilización, como a materiales empleados, estrategias de operación, nuevas aplicaciones y fuentes de energía, principalmente. En los últimos años, la energía no convencional ha ido tomando fuerza obteniendo iniciativas a lograr una mayor eficiencia en todos los aspectos relacionados con la energía, lo cual, unido a la creciente preocupación por el medio ambiente, ha reactivado el interés por las llamadas energías renovables. Una de ellas es la energía eólica, conocida como una fuente de energía producida por el viento, este tipo de generación busca desarrollar su eficiencia y producción por medio de estudios enfocados a su desarrollo, gracias al avance de nuevas tecnologías como el diseño de turbinas, el control de accionamientos mecánicos y la incorporación de la electrónica de potencia.

En un sistema eléctrico de potencia los generadores son la principal fuente de energía eléctrica ya que transforman la potencia mecánica en eléctrica. La transformación de la energía eólica a energía eléctrica es por medio de la utilización de un aerogenerador, donde su fuente principal de energía cinética es el viento que hace girar las hélices unidas a un eje

convirtiéndola en energía mecánica y a su vez conectada a un generador eléctrico que puede ser síncrono o asíncrono dependiendo de su configuración, por consiguiente, al ser el viento fluctuante, esta se manifiesta directamente al torque mecánico, para lo cual mantener un valor más o menos constante en su salida dependerá del control de la turbina, el cual varía la velocidad del rotor por medio del control Pitch Angle o ya sea acelerando o frenando el eje del generador por medio de una caja de cambios, para de esta manera ajustarlo para un máximo rendimiento.

Por lo tanto, debido a la variación de la energía primaria es muy difícil mantener constante las variables de estado y frecuencia al valor nominal de operación del sistema eléctrico, hace necesario buscar una metodología para controlar la potencia activa y reactiva de esos aerogeneradores con el propósito de poder integrar a la barra infinita. Para aquello se elige un modelo de control adecuado como es el tipo D o denominado tipo 4, el cual puede o no contar con caja de cambios o Gearbox, además de generar electricidad por medio de una máquina síncrona o de inducción, cuenta con mayores ventajas a las demás configuraciones debido a la eficiencia de conversión de energía eólica por medio de convertidores que utilizan electrónica de potencia capaces de realizar el control y entregar la máxima cantidad de generación cumpliendo los rangos permitidos de operación, se realiza una simulación tomando los parámetros matemáticos que compone el sistema de control eléctrico de un aerogenerador, los cuales por medio del software Matlab/Simulink se visualiza los resultados de la investigación.

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

En los sistemas distribuidos (conectados a la red), la generación eólica tiende a sufrir perturbaciones debido a la variación de velocidad del viento, esto provoca que las variables de estado sean fluctuantes y no se puede integrar el generador eólico a la red directamente.

6. OBJETIVOS

General

Simular el control de potencia activa y reactiva de un aerogenerador, para mantener constantes las variables de estado y frecuencia, con el fin de conectarlo a la barra infinita.

Específicos

- Establecer el estado del arte de las configuraciones y modelados de control en generadores eólicos.
- Proponer un modelo de control y su configuración, para la potencia activa y reactiva en el lado de red.
- Realizar la simulación en el programa Matlab/Simulink con parámetros que existen en la literatura científica.
- Corroborar los resultados obtenidos por la plataforma de simulación y el ejemplo “Turbine Wind Type 4”.

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

OBJETIVOS	ACTIVIDAD	RESULTADOS	TÉCNICAS O INSTRUMENTOS
Establecer el estado de arte de las configuraciones y modelados de control en generadores eólicos.	Investigación de los modelos de control en turbinas eólicas. Recolección de información de aerogeneradores.	Características de los distintos tipos de modelos de control. Ventajas y desventajas de las arquitecturas de turbinas de viento.	Investigación – Libros-Papers.
Proponer un modelo de control y su configuración, para la potencia activa y reactiva en el lado de red.	Fundamentaciones científicas/técnicas del modelo idóneo.	Parámetros matemáticos para una turbina de velocidad variable para el control de potencia activa y reactiva.	Investigación – Libros-Papers.

Realizar la simulación en el programa de Matlab/Simulink con parámetros que existen en la literatura científica.	Simulación del modelo de control propuesto.	Gráficas de entrada y salidas del aerogenerador.	Investigación aplicada - Simulación en el software Matlab/Simulink.
Corroborar los resultados obtenidos por la plataforma de simulación y el ejemplo “Turbine Wind Type 4”.	Realización del flujo de potencias del aerogenerador en Etap. Recolección de datos de la comparación entre simulaciones.	Tabla de valores con el porcentaje de error. Comportamiento de las variables de estado y frecuencia entre simulaciones.	Investigación aplicada – Word/Etap

8. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

8.1. Energía Eólica

En auge de las energías alternativas implementadas en varios proyectos del mundo ha permitido un gran crecimiento en varios sectores estratégicos, además de disminuir el impacto ambiental, por ello la energía eólica es el medio más prometedor, sostenible y limpia para la generación de energía eléctrica, que suele ser suministrada a la red o de forma aislada. Sin embargo, las fuentes de energía renovables tienen sus limitaciones en el caso del viento depende de las condiciones climáticas y esto afecta de manera directa a la generación de energía, por tal razón existen métodos y controles que favorecen a dicha producción.

En los últimos años, la energía eólica se ha mostrado la mayor tasa de crecimiento de cualquier forma de generación de electricidad con su desarrollo estimulado por preocupaciones de los responsables de las políticas nacionales sobre el cambio climático, la diversidad y la seguridad del suministro [1].

La mayoría de las fuentes de energía de la Tierra tienen su origen en el Sol. Esto no es diferente para la energía eólica; el origen del movimiento de la atmósfera es su calentamiento debido a




la radiación solar [2] da paso a la formación del viento a ser una fuente de energía inagotable y gratuita que contribuye a la disminución de la contaminación ambiental producida por las centrales convencionales.

8.1.1. Turbina eólica

El aprovechamiento de energía cinética del viento produce electricidad por medio de una turbina eólica. El flujo de aire que atraviesa las hélices hace mover el eje de la góndola, el cual puede estar o no conectado a una caja de engranajes esto dependerá la configuración de la turbina, luego por medio de un generador eléctrico transforma la energía mecánica recibida en energía eléctrica, a este proceso se lo denomina aerogenerador o turbina eólica, los cuales pueden ser aislados o distribuidos con la formación de varios aerogeneradores los cuales toman el nombre de parques eólicos.

La implementación de esta generación dependerá del lugar y tipo de consumo para lo cual existen en el mercado industrial una variedad de turbinas acorde a su necesidad.

Tabla 1. Aplicaciones de turbinas eólicas.

		
Pequeño (<10kW)	Intermedio (10-500 kW)	Grande (500 kW, 5MW)
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Casas (conectada a la red). ❖ Granjas. ❖ Aplicaciones remotas autónomas (micro-redes). 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Village power. ❖ Sistemas híbridos. ❖ Energía distribuida. 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Plantas de energía eólica. ❖ Energía distribuida. ❖ Generación de energía eólica en tierra y mar.

Fuente: [1].

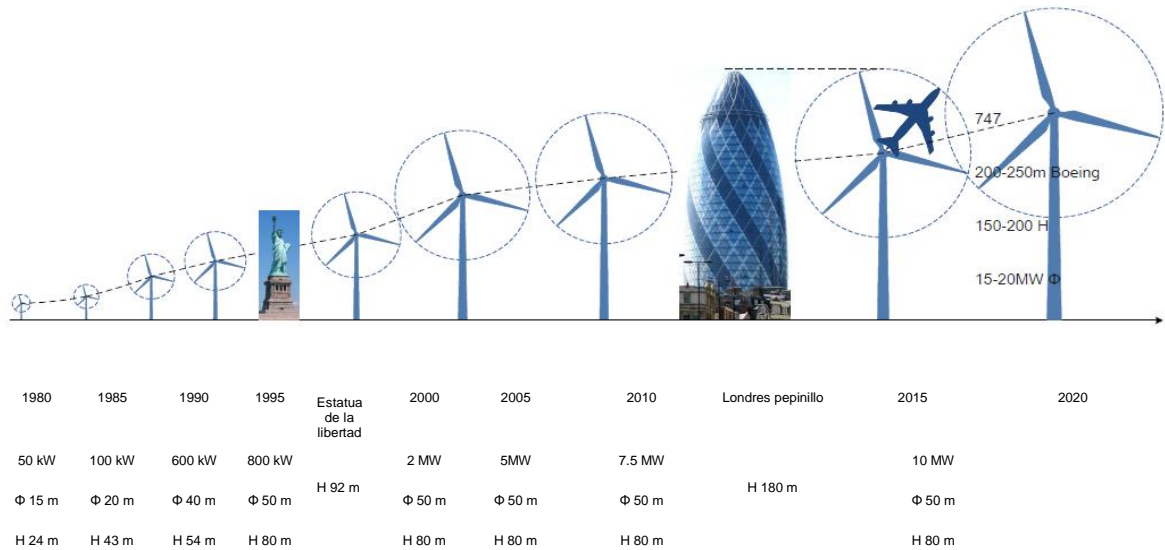


Figura 1. Evolución en el tamaño de la turbina eólica (Φ : diámetro de rotor, H: altura).

Fuente: [3].

Tabla 2. Parámetros de diferentes turbinas.

Potencia nominal (MW)	Rotor (diámetro)	Velocidad mínima (rpm)	Velocidad nominal (rpm)
0.75	46	15.0	30
1.00	53	12.5	25
1.50	65	10.5	21
1.75	70	9.50	19
2.50	84	8.00	16

Fuente: [3].

La tabla 2, se muestra valores equivalentes de funcionamiento de turbinas eólicas a diferente potencia nominal, estos parámetros varían de acuerdo con el fabricante.

8.1.2. Ley de Betz

Sabiendo que la velocidad del viento antes y después de las hélices varía, y que a su vez el área de paso del aire. Será necesario que existan dos fórmulas de la potencia. Pero debido a que también tiene que existir la conservación de la potencia podremos unir ambas de la siguiente forma:

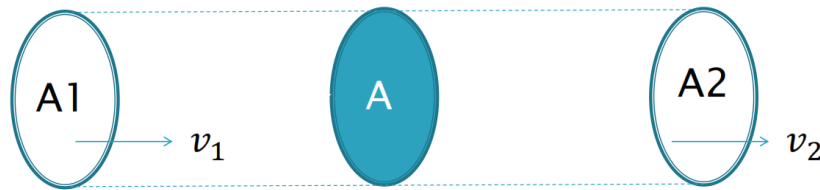


Figura 2. Ley de Betz.

Fuente: [2].

$$Av = A_1 * V_1 = A_2 * V_2 \dots \dots \dots (1)$$

La velocidad promedio del viento a través del área del rotor (A), es el promedio de la velocidad del viento v_1 sin perturbar y la velocidad del viento v_2 .

La potencia del viento incidente sobre el rotor, a la que se denomina P_o :

$$P_o = \frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3 \dots \dots \dots (2)$$

El valor máximo de la potencia extraída del viento es entonces de $16/27$ ó aproximadamente **0.59** veces la potencia del viento [2] [4].

A este límite de potencia se lo conoce como C_p (coeficiente de potencia):

$$\frac{P}{P_o} = C_p < 0,59 \dots \dots \dots (3)$$

8.1.3. Coeficientes de potencia y par de un aerogenerador

La velocidad relativa del viento con respecto a la velocidad de las hélices de la turbina puede expresarse en función de la razón de velocidad punta, la cual está definida como:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \dots \dots \dots (4)$$

Donde:

ω : velocidad angular [rad/s].

R: radio del rotor [m].

V: velocidad del viento [m/s].

y con la velocidad del viento nominal del diseño v definida, se calcula velocidad angular ω en rad/seg y luego n = velocidad de rotación de la hélice en número de revoluciones por minuto (rpm) [5].

$$\omega = \frac{n\pi}{30} \dots \dots \dots (5)$$

Por su parte la potencia disponible en el flujo de aire para una turbina de viento está dada por la siguiente ecuación donde ρ es la densidad del aire:

$$P_{aire} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \dots \dots \dots (6)$$

Aunque la ecuación de la potencia disponible en el viento, la potencia mecánica transferida al rotor de la turbina se ve reducida por el coeficiente de potencia (C_p); el cual está en función de la velocidad punta (λ) y el ángulo de inclinación de la hélice (β) [6].

Dicho coeficiente de energía se puede expresar de la siguiente forma:

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{turbina}}{P_{aire}} \dots \dots \dots (7)$$

La potencia mecánica de la turbina se obtiene al despejarla de la ecuación anterior y al sustituirle en ella la ecuación potencia disponible en el flujo de aire.

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \dots \dots \dots (8)$$

El valor máximo de C_p está definido por el límite de Betz, el cual indica que una turbina nunca podrá extraer más del 59% de la potencia de una corriente de aire. En realidad, los rotores de las turbinas de viento tienen un C_p máximo entre el rango de 25 y 45%.

La siguiente expresión es generalmente utilizada para determinar el C_p en la mayoría de las simulaciones de aerogeneradores [12]:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 * \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 * \beta - c_4 \right) * e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 * \lambda \dots \dots \dots (9)$$

Siendo λ_i [7]:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \dots \dots \dots (10)$$

En [8] se puede encontrar un modelo que se utiliza frecuentemente y que está dado por los siguientes valores de C_p constantes:

$$\begin{array}{lll} c1:0,5176 & c2:116 & c3:0,4 \\ c4:5 & c5:21 & c6:0,0068 \end{array}$$

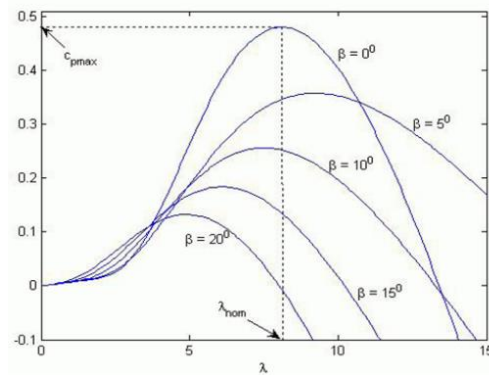


Figura 3. Coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$.

Fuente: [9].

Las características $C_p - (\lambda)$, se pueden apreciar en la figura 3, para distintos valores del ángulo de pitch (β). Vale distinguir que el valor óptimo de C_p es 0.48, el cual se da para un $\lambda = 8,1$, este valor de λ se define como su valor nominal (λ_{nom})[9].

8.1.4. Velocidad de las Turbinas: fija y variable

Las turbinas de velocidad fija se caracterizan por estar conectados directamente a la red y mantenerse en una velocidad constante submúltiplo de la frecuencia de la red, por medio de la caja multiplicadora como parte fundamental del sistema mecánico y eléctrico.

Las turbinas eólicas de velocidad variable pueden lograr la máxima eficiencia de conversión de energía en una amplia gama de velocidades del viento. La turbina puede ajustar continuamente su velocidad de rotación de acuerdo con la velocidad del viento [10].

Tabla 3. Ventajas y desventajas de las turbinas eólicas de velocidad fija y variable.

Modo de velocidad	Ventajas	Desventajas
Velocidad Fija	* Simple, robusto, confiable	* Relativamente baja conversión de energía
	* Bajo costo y mantenimiento	* Alto estrés mecánico * Fluctuaciones de alta potencia a la red
Velocidad variable	* Eficiencia de conversión de alta energía	* Costo y pérdidas adicionales debido al uso de convertidores
	* Uso mejorado de la calidad de la energía	* Sistema de control más complejo
	* Tensión mecánica reducida	

Fuente: [5].

8.2. Componentes del Sistema

En un sistema de conversión de energía eólica a eléctrica los componentes fundamentales son el viento (considerando las condiciones climáticas del lugar), el generador eléctrico conectado a un sistema mecánico de engranajes, considerando el tipo de configuración aplicado a las condiciones de la velocidad variable, en la cual interviene como eje fundamental la electrónica de potencia utilizando convertidores que permiten controlar la potencia activa y reactiva, y por etapa final la transmisión de la energía eléctrica a la red.

La Figura 4, indica el diagrama de bloques que involucra diferentes partes del sistema de conversión de energía eólica (WECS). El objetivo sensible de esos sistemas es idéntico: convertir la energía cinética del viento en electricidad e insertar esta energía a la red [11].

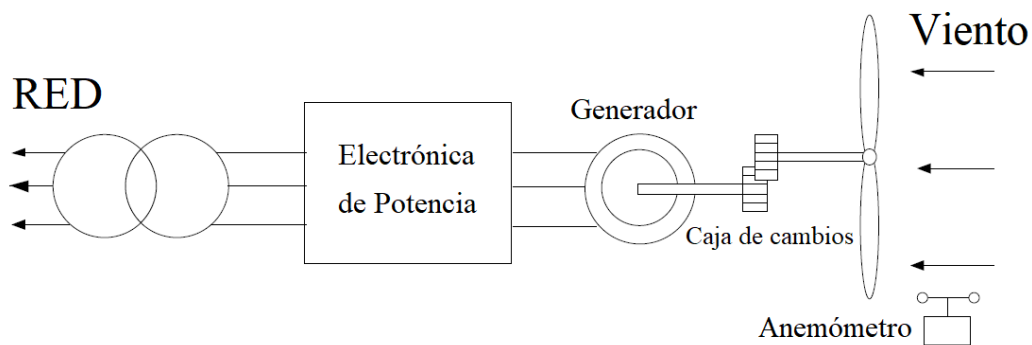


Figura 4. Sistema de conversión de energía eólica.

Fuente: [12].

Las partes fundamentales de un aerogenerador son las siguientes:

- Palas del rotor, cumple la función de captar la energía del viento y transformarla.
- Anemómetro y veleta, dispositivos que mide las velocidades y dirección del viento en base a las condiciones climáticas del lugar.
- Caja de cambios, enfocado en la conversión de la potencia de rotación lenta y de alto par del rotor de la turbina eólica en una de alta velocidad y bajo par de giro.
- Electrónica de potencia para convertir y acondicionar la energía a los estándares requeridos por medio de convertidores PWM, conectados por lo general en generadores síncronos de imanes permanente.
- Métodos de control que se basan en obtener el óptimo rendimiento de la máquina, manteniendo las condiciones de operación del sistema, con el fin de proteger las aspas de la sobrecarga y el generador del sobrecalentamiento, debido a las condiciones del viento.

- Transformador que permite aumentar el nivel de tensión de la turbina hacia la red.
- Enlace de transmisión para conectar la planta a la red del área.

8.3. Tipos de generadores de turbinas eólicas

Durante cuatro décadas, el avance de la ingeniería en la conversión de generación eólica ha generado el desarrollo de varios ajustes diferentes de generadores eólicos, que emplean una amplia selección de turbinas eléctricas. En la Figura 5, se presenta el grupo de tipos de fuentes eléctricas más populares utilizados en los sistemas de conversión de energía eólica (WECS) [11].

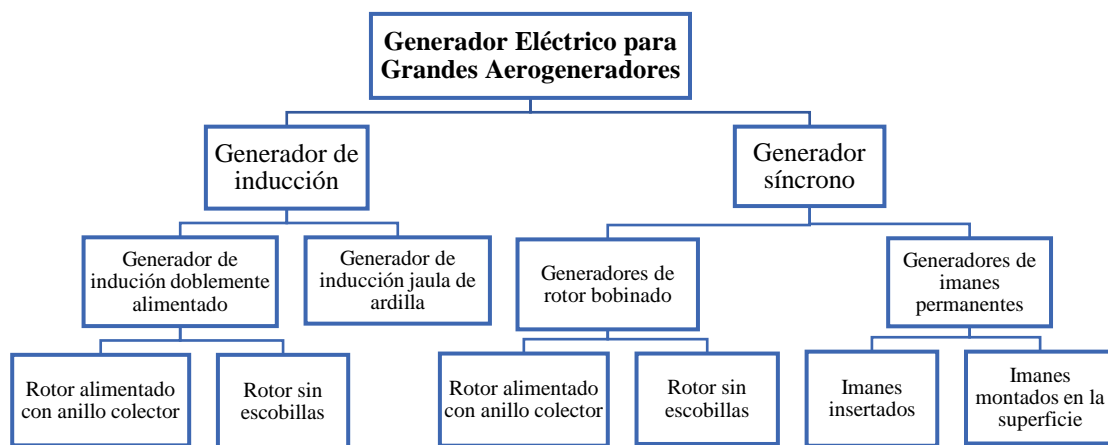


Figura 5. Tipos de generadores en los sistemas de conversión de energía eólica.

Fuente: [11].

8.4. Configuraciones del sistema de conversión de energía eólica

En la actualidad, el diseño de un aerogenerador considera muchos aspectos como: el gran esfuerzo en reducir costos, aumentar la fiabilidad y mejorar en los sistemas de conversión de energía eólica, dando como resultado diversas configuraciones con respecto a la velocidad que gira la turbina (fija o variable), además del tipo de generador síncrono o de inducción, considerando el tipo de configuración a instalarse.

El tema de investigación se centra en las turbinas de velocidad variable de accionamiento directo. Por lo general los generadores síncronos operan de forma directa, por lo que están diseñados para adaptarse a la velocidad de la turbina, de forma que la caja de cambios es eliminada. En caso de operar en modo indirecto, es necesario la caja de engranajes, que permite ajustar la velocidad de la turbina y además son equipados con convertidores de potencia a plena capacidad.

Según las diferencias en la tecnología de generación, las turbinas eólicas se han clasificado en cuatro tipos básicos [13]:

- Tipo 1: Aerogeneradores de velocidad fija.
- Tipo 2: Aerogeneradores de deslizamiento variable.
- Tipo 3: Aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG).
- Tipo 4: Aerogeneradores de convertidor completo.

8.4.1. Aerogenerador de velocidad Fija

Las turbinas eólicas de velocidad fija son las turbinas eólicas a escala de servicio público más básicas en funcionamiento [13].

- ✓ Se emplean máquinas de inducción de jaula de ardilla conectado directamente a la red y a un arrancador suave que permite limitar la corriente de arranque.
- ✓ No es necesario de un convertidor de potencia durante el funcionamiento normal, debido a que el arrancador suave que cumple su función.
- ✓ Para compensar el factor de potencia se implementa un banco de capacitores, por motivo que el generador asíncrono extrae potencia reactiva de la red.
- ✓ La desventaja principal de esta configuración es una menor conversión de energía, por motivo de que solo puede alcanzar su máxima eficiencia a una velocidad determinada.

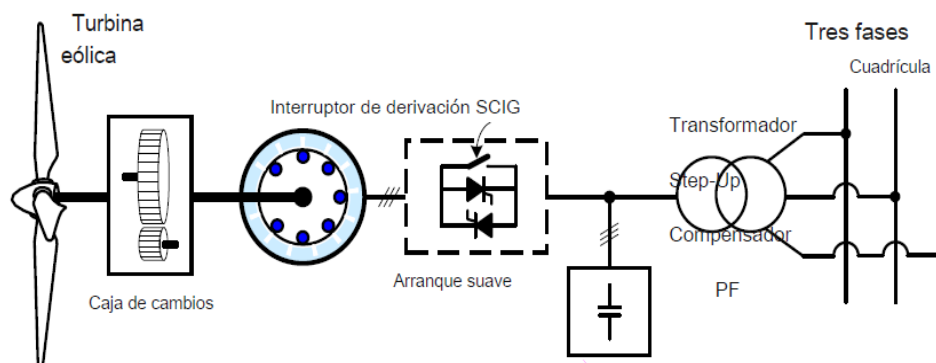


Figura 6. Tipo A Velocidad fija ($\pm 1\%$) WECS con SCIG.

Fuente: [3].

8.4.2. Aerogeneradores de deslizamiento variable

Las turbinas eólicas de velocidad variable están diseñadas para operar en una amplia gama de velocidades del rotor [13].

- ✓ Se emplean máquinas de inducción de rotor bobinado que permiten el acceso tanto al estator como al rotor de la máquina, conectado directamente a la red y en paralelo a una resistencia variable y un arrancador suave.
- ✓ Se minimiza el estrés mecánico producidos por las ráfagas del viento y aumenta la eficiencia de la conversión de la energía.
- ✓ El ajuste de la resistencia del rotor externo es controlado por un convertidor compuesto de un diodo rectificador y un picador IGBT.
- ✓ La desventaja es la incapacidad de controlar la potencia reactiva en el lado de red y por tal razón es necesario de un banco de capacitores.

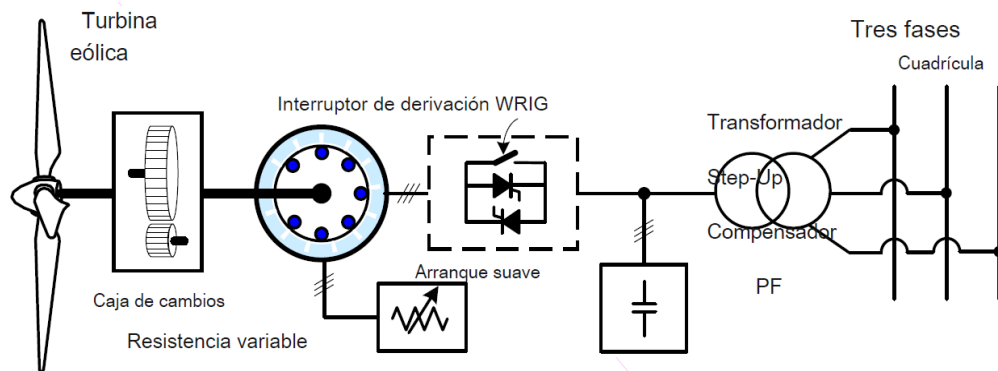


Figura 7. Tipo B Semi de velocidad variable ($\pm 10\%$) WECS con WRIG.

Fuente:[3].

8.4.3. Aerogeneradores con generador de inducción doblemente alimentado (DFIG)

Las turbinas DFIG solucionan el problema de la pérdida de potencia en el circuito del rotor mediante el uso de un convertidor de CA / CC / CA en el circuito del rotor para recuperar la potencia de deslizamiento [13].

- ✓ El convertidor de potencia de frecuencia variable tiene como objetivo alimentar el devanado del rotor, mientras que el estator esta conecta directamente a la red.
- ✓ El rango de la velocidad es del 30 %, además de que el flujo de potencia es bidireccional en el circuito del rotor.
- ✓ El aerogenerador controla la potencia activa y reactiva, por medio de la electrónica de potencia (convertidores de fuentes de tensión de dos niveles IGBT en configuración back to back).
- ✓ En esta configuración es indispensable el filtro, debido a que la electrónica de potencia produce distorsión armónica por la conmutación de los interruptores.

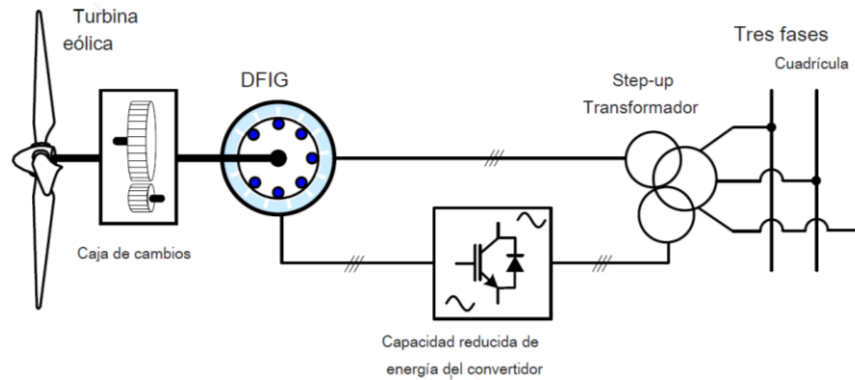


Figura 8. Tipo C Semi de velocidad variable ($\pm 30\%$) WECS con DFIG.

Fuente: [3].

8.4.4. Aerogeneradores de convertidor completo

En las turbinas de convertidor completo, un único convertidor de CA / CC / CA es la única ruta de flujo de energía desde una turbina eólica a la red [13].

- ✓ Se emplean los generadores síncronos o de inducción, considerando la caja de cambio o no para esta configuración.
- ✓ El generador funciona a cualquier velocidad de rotación, debido a que la frecuencia de la red está totalmente desacoplada.
- ✓ El intercambio de la potencia activa y reactiva con la red es completamente controlado por el generador, gracias a los convertidores.
- ✓ El mayor inconveniente son los costos por ser un sistema complejo.

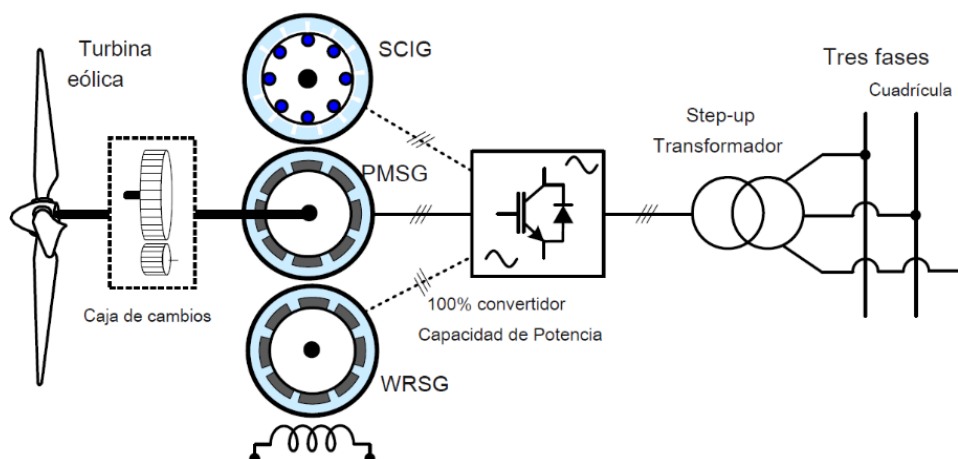


Figura 9. Tipo D velocidad variable completa (0-100%) WECS con SCIG o PMSG o WRSG.

Fuente: [3].

Tabla 4. Ventajas y desventajas de las configuraciones de turbinas eólicas.

TIPO	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tipo 1	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología simple • Bajo costo y bajo mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja eficiencia de conversión de energía eólica • Alto estrés mecánico en los componentes de la turbina. • Requiere arrancador suave y compensador PF
Tipo 2	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente mayor eficiencia de conversión de energía eólica • Relativamente menor tensión en los componentes de la turbina. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere mantenimiento debido a anillos colectores • Pérdidas de potencia debido a la resistencia del rotor. • Requiere arrancador suave y compensador PF
Tipo 3	<ul style="list-style-type: none"> • Relativamente mayor eficiencia de conversión de energía eólica • Relativamente menor tensión en los componentes de la turbina. • Elimina el arrancador suave y el compensador PF 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo y complejidad. • Requiere mantenimiento debido a anillos colectores
Tipo 4	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia de conversión de energía eólica • Excelente cumplimiento del código de red, caja de cambios opcional 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor costo, pérdidas de energía y complejidad.

Fuente: [3].

8.5. Estrategias de control

Alternativamente, existen tres estrategias principales para regular la cantidad de energía capturada por el rotor: control de bloqueo pasivo o paso fijo, control de inclinación y control de bloqueo activo [14]. En la actualidad, el dimensionamiento y construcción de turbinas eólicas en toda su gama se hacen más grandes y las cargas aumentan, por la razón que existe una tendencia hacia el control de cabeceo y el control de pérdida activa.

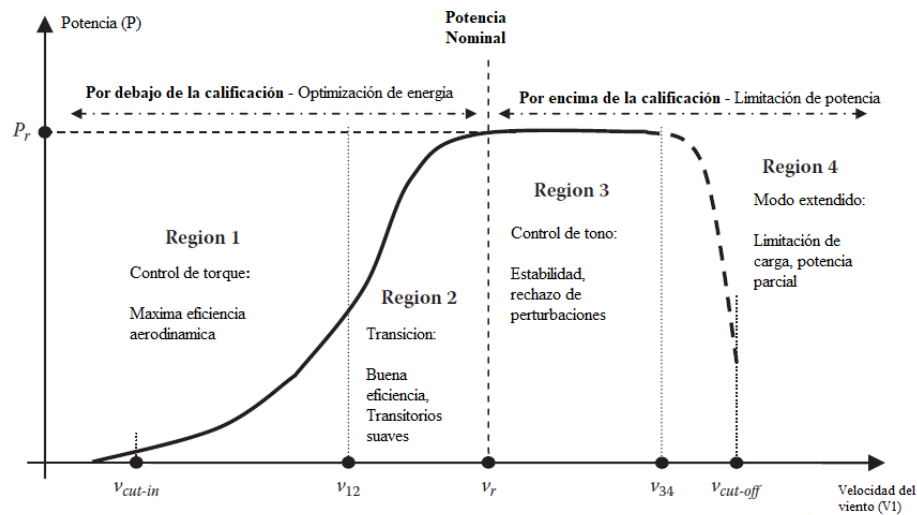


Figura 10. Curva de operación de la turbina eólica.

Fuente: [14].

8.5.1. Control de parada pasiva

Las turbinas con control de parada pasiva, se enfoca en la reacción del par del generador para regular la velocidad del rotor en un ángulo de ataque óptimo (nominal), para alcanzar la máxima captura de energía.

Los aerogeneradores de control pasivo no necesitan mecanismos de cabeceo complejos, pero las palas requieren un diseño aerodinámico complejo.[10].

8.5.2. Control de inclinación

Para el propósito del control de inclinación se requiere de una operación de velocidad variable, que se centra en fijar la posición de las palas, para capturar la energía máxima del viento o descartar el exceso, considerando la potencia de salida, si es mayor o menor a la potencia nominal sin exceder las limitaciones mecánicas. En la actualidad el control de inclinación es el más considerado y aplicado en los sistemas de energía eólica.

Para lograr esto, el par se mantiene constante y la inclinación se cambia continuamente siguiendo las demandas de un controlador de velocidad de rotor de circuito cerrado que limita la captura de energía y sigue las variaciones de la velocidad del viento [14].

8.5.3. Control de parada activa

En el control de parada activa, las pérdidas se producen por velocidad muy altas y por el aumento del ángulo de ataque de la pala, por ello se relaciona con el mecanismo de control de

inclinación. Cuando la velocidad del viento excede el valor nominal, las palas se controlan para girar más hacia el viento, lo que lleva a la reducción de la potencia capturada. La potencia capturada puede, mantenerse en el valor nominal ajustando el ángulo de ataque de la pala [10].

El objetivo del control es mantener la potencia nominal por encima de la velocidad del viento.

8.6. Electrónica de potencia para aerogeneradores

Los sistemas electrónicos de potencia se utilizan con frecuencia para la conversión de energía eléctrica a nivel de aerogenerador, a nivel de parque eólico o a ambos, y dentro del aerogenerador se utilizan convertidores electrónicos de potencia para controlar los flujos de energía activa y reactiva constantes y dinámicos hacia y desde el generador eléctrico [1] [15].

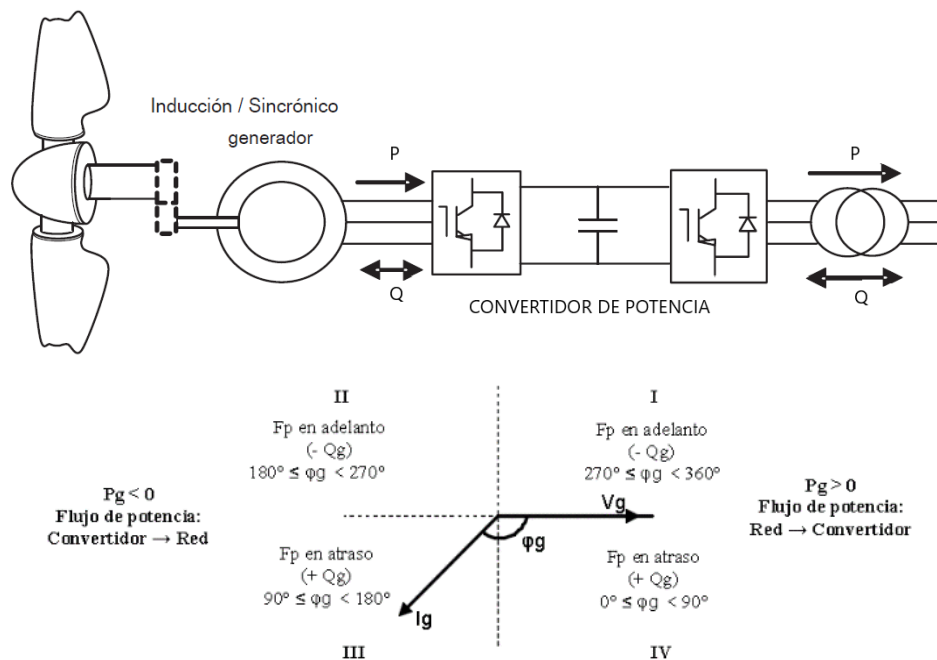


Figura 11. Aerogenerador de velocidad variable – flujos de potencia activa y reactiva (superior) y Diagrama de fases y factor de potencia (inferior).

Fuente: [1][10].

En la actualidad la electrónica de potencia cumple un rol indispensable en la conversión de energías renovables (eólica y fotovoltaica), las diversas topologías de convertidores dependen principalmente de las configuraciones o arquitecturas en el diseño de los aerogeneradores (síncronos o inducción), con el fin de aumentar la confiabilidad de los sistemas de conversión eólica, costos, eficiencia, posibilidades de control, complejidad y consumo de energía.

En la Tabla 5, se compara las características de los valores de tensión, corriente, frecuencia de conmutación y requisito del convertidor. En la frecuencia de conmutación se define la gama de frecuencias de funcionamiento típica de un IGBT se encuentra en el rango de 2 a 20kHz, el cual es utilizado en la simulación.

Tabla 5. Interruptores: valores nominales y características máximas.

Datos	Tipo de interruptor				
	GTO	IGCT	BJT	MOSFET	IGBT
Voltaje^a(V)	6000	6000	1700	1000	6000
Corriente^a(A)	4000	2000	1000	28	1200
Frecuencia de conmutación^b(kHz)	0.2-1	1-3	0.5-5	5-100	2-20
Requisitos del convertidor	Alto	Bajo	Mediano	Bajo	Bajo

^a*Máxima potencia de salida.*

^b*Rango de operación.*

Fuente: [16].

Los convertidores de fuente de voltaje (VSC) y los convertidores de fuente de corriente (CSC) suministran una forma de onda de tensión conmutada relativamente bien definida y una forma de onda de corriente, respectivamente, en los terminales del generador y de la red. En el caso de un VSC, la tensión en el almacenamiento de energía (barra de CC) se mantiene constante mediante un condensador de gran tamaño. En un CSC, es justo lo contrario; la corriente en el almacenamiento de energía (barra de CC) se mantiene constante por un gran inductor. Hay que subrayar que la conversión de la fuente de voltaje y la conversión de la fuente de corriente son conceptos diferentes. Se pueden implementar de varias maneras: en seis pasos, modulación de amplitud de pulso (PAM) o modulación de ancho de pulso (PWM). Mediante el uso de la técnica PWM, se eliminan los armónicos de baja frecuencia, y la frecuencia de los primeros armónicos de orden superior se encuentra en torno a la frecuencia de conmutación del inversor o rectificador.

8.6.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

Es el proceso de modificar un tren de pulsos en razón directa a una pequeña señal de control; cuanto mayor sea el voltaje de control sea más ancho el pulso resultante [17].

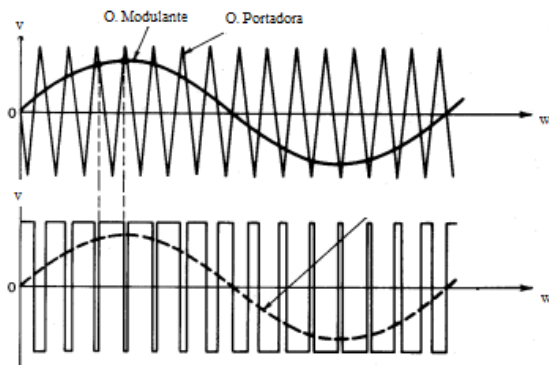


Figura 12. Modulación sinusoidal de ancho de pulso (PWM).

Fuente: [18].

En la figura 12, se presenta el PWM sinusoidal con la señal triangular (portadora), que se fija en un convertidor de dos niveles, el cual produce los pulsos que ingresan al convertidor [10].

El índice de modulación de la amplitud permite controlar la tensión de salida del inversor y viene dada por la siguiente ecuación:

$$m_a = \frac{V_m}{V_{cr}} \dots \dots \dots (11)$$

Donde

V_m : valor máximo de la onda moduladora.

V_{cr} : valor máximo de la onda portadora.

Para el caso del índice de modulación de frecuencia se define en la siguiente ecuación:

$$m_f = \frac{f_{cr}}{f_m} \dots \dots \dots (12)$$

Donde

f_m : frecuencia de la onda moduladora.

f_{cr} : frecuencia de la onda portadora.

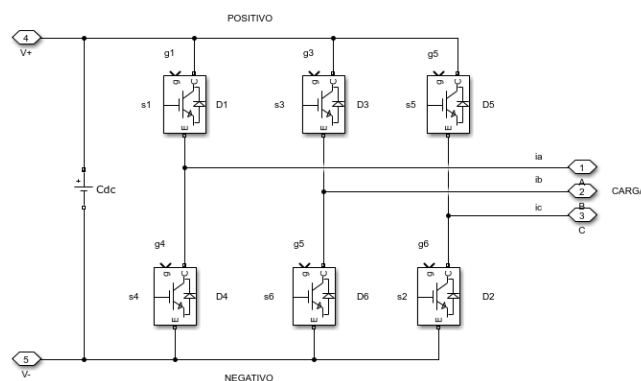


Figura 13. Topología del convertidor de tensión de dos niveles (VSC) simplificado.

Fuente: [18].

En la figura 13, se muestra la topología del convertidor conectado a una carga y alimentado por una fuente Vdc, el cual está en paralelo con un capacitor.

Para un convertidor de dos niveles usando la estrategia de conmutación de (PWM) de vector espacial (SVPWM), los vectores de conmutación se definen por los estados de los interruptores del convertidor, que están en ON y OFF respectivamente cada uno, por lo cual aplicando la siguiente formula 2^n ; donde n es el número de fases, por ejemplo ($2^3 = 8$), da como resultado 8 estados de conmutación como se muestra en la figura 14.

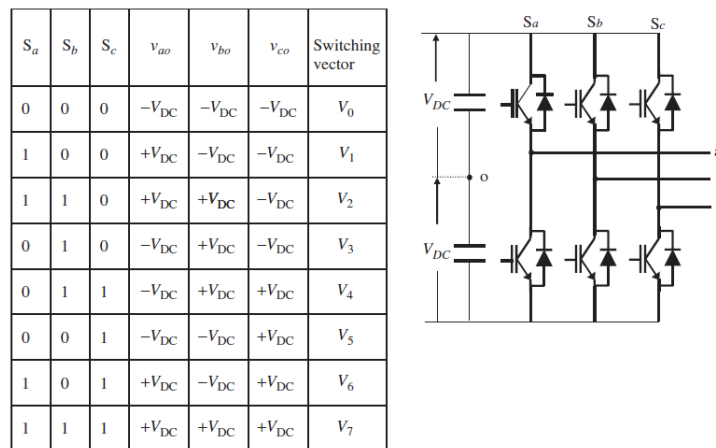


Figura 14. Estado de conmutación de un convertidor de seis pulsos (SVPWM).

Fuente: [3].

La modulación del vector espacial es una técnica en tiempo real muy ampliamente usado en los VSC o VSI, en la figura 15, se ilustra el diagrama vectorial espacial para un inversor de dos niveles, formando un hexágono regular con los 6 vectores activos, para cada vector se establece los estados de conmutación.

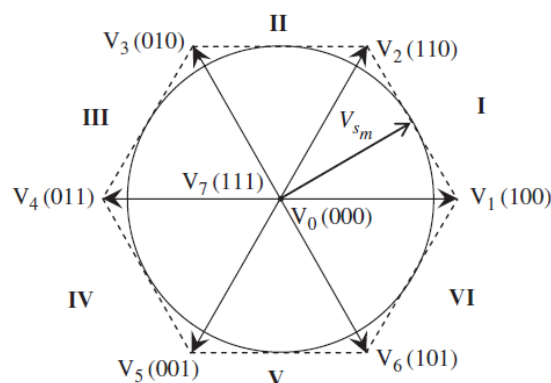


Figura 15. Conmutación de posiciones vectoriales para el SVPWM de dos niveles.

Fuente: [3].

8.7. Marco de referencia síncrono (SRF)

El marco de referencia síncrono es un cambio en la referencia de abc a un marco de cuadratura denominado “dq0”. Esto se aplica en las máquinas eléctricas para tener un marco que gira a una velocidad síncrona, ¡por lo general! depende de la frecuencia eléctrica del sistema, que es la frecuencia con la que se sincroniza. La transformación se desarrolla en dos pasos, una transformación de un sistema trifásico abc a un sistema de coordenadas estacionario $\alpha\beta$, que se conoce como Transformación de Clarke, y una transformación del sistema de coordenadas estacionario $\alpha\beta$ a el sistema de coordenadas dq0 rotativo, que se conoce como transformación de Park.

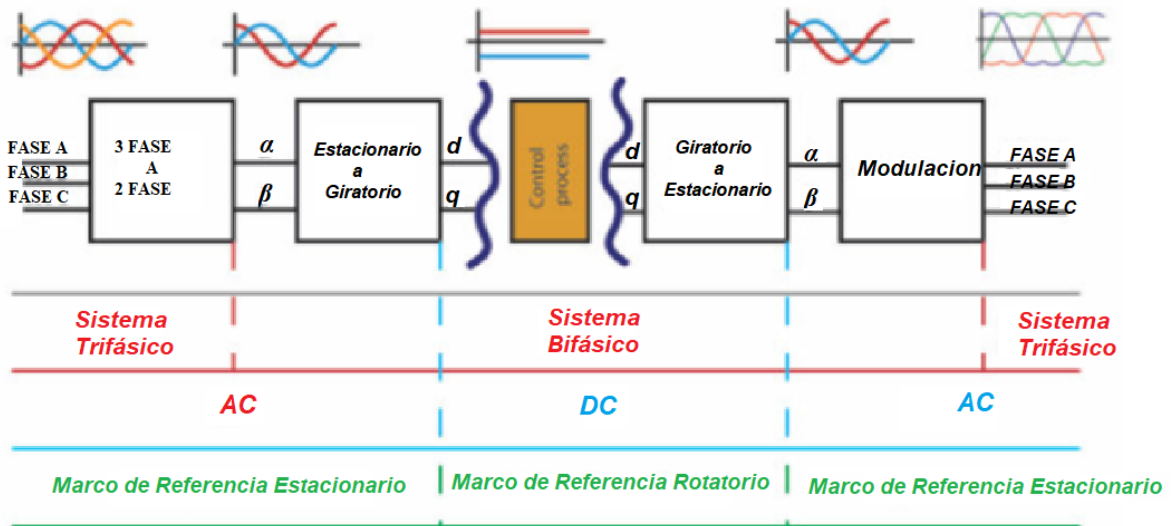


Figura 16. Etapas de control y los respectivos marcos de referencia.

Fuente: [19].

8.8. Control de lazo bloqueado de fase (PLL)

Es un sistema que sincroniza su señal de salida con una señal de entrada o una señal de referencia tanto en frecuencia como en fase se conoce como lazo bloqueado de fase (PLL). Es un control no lineal de bucle cerrado que cambia automáticamente la frecuencia de un oscilador controlado en función de la frecuencia y fase de la señal de entrada, de forma que la salida se sincroniza tanto en frecuencia como en fase con la referencia o la señal de entrada [11].

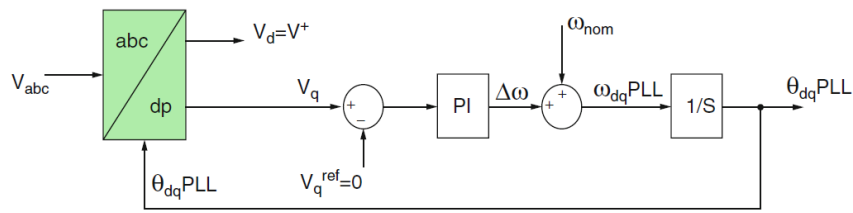


Figura 17. La estructura de un dq0 (PLL).

Fuente: [11].

El PLL sincroniza el ángulo de fase instantáneo de un inversor de voltaje con el ángulo de fase de la red eléctrica para lograr un factor de potencia cercano a la unidad.

En la figura 18, se muestra el control en el lado de red, que consta de un convertidor abc al cual llegan las referencias de voltaje y corrientes de la red en el marco de referencia dq0, entran a un controlador desacoplado, para luego enviar los pulsos al PWM para la conmutación de los IGBT's.

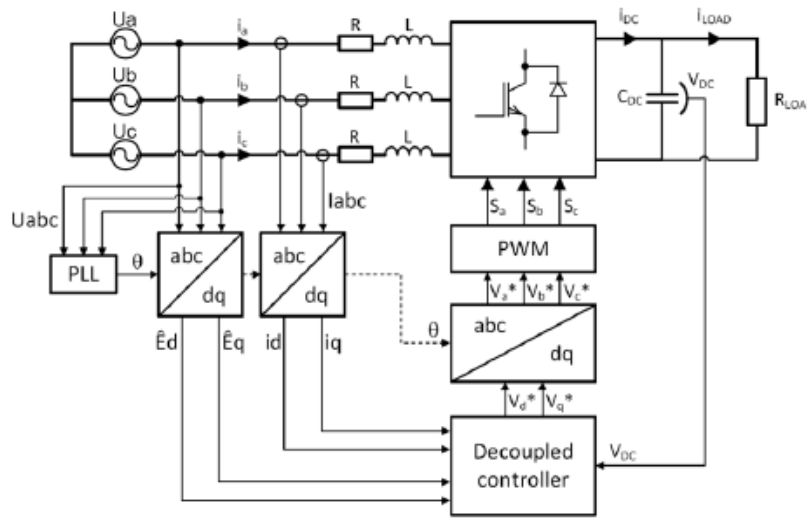


Figura 18. Diagrama del sistema PLL conectado a la red.

Fuente:[20].

8.8.1. Control de lazo interno (Inner Loop)

Para diseñar un controlador de corriente interno, los términos de acoplamiento cruzado, en la Ecuación (14), se desacoplan de la siguiente manera [21]:

$$V_x = i_{ac}R + L \frac{di_{ac}}{dt} + V_s(t) \dots\dots\dots (13)$$

$$\begin{bmatrix} V_{xd} \\ V_{xq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

Donde:

R: Resistencia de la línea [Ω].

L: Inductancia de la línea [H].

V_{xd} y V_{xq} : Voltaje a la salida del convertidor en el marco de referencia estacionario [V].

V_{sd} y V_{sq} : Voltaje en el lado de red en el marco de referencia estacionario [V].

i_d y i_q : Corrientes en el marco de referencia estacionario [A].

i_{ac} : Corriente alterna en la salida del convertidor [A].

ω : velocidad angular [rad/s].

El lazo de control consiste en reguladores PI para las corrientes i_d e i_q , factores de desacoplamiento que permiten transformar el error entre las comparaciones de componentes d y q en valor de tensión [11].

Las ecuaciones de tensión transformadas de cada eje tienen un término inducido por velocidad/frecuencia ($\omega L i_d$ y $\omega L i_q$) que permite el acoplamiento transversal entre los dos ejes. Para cada eje, el término de acoplamiento cruzado puede considerarse una perturbación desde el punto de vista del control. Por lo tanto, una corriente continua de doble circuito con compensación de corriente desacoplada y compensación de la tensión de alimentación. necesario para obtener un buen rendimiento de control [19].

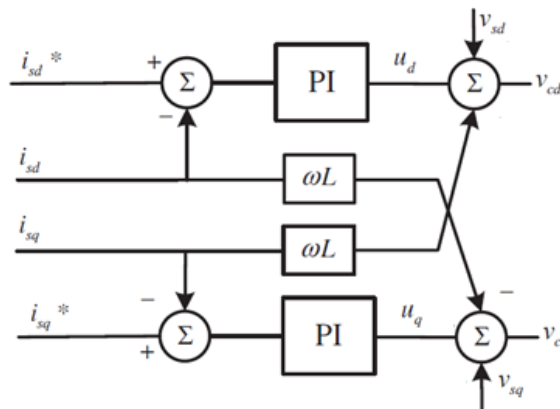


Figura 19. Control de vector de corriente.

Fuente: [22].

8.8.2. Control de lazo externo (Outer Loop)

El controlador de voltaje de CC se discute como el controlador externo. El dimensionamiento viene determinado por la función de transferencia entre el valor de referencia actual que debe darse y la tensión de CC [19].

En la ecuación 15 y 16 se muestra la expresión de la potencia activa y reactiva en el estado de operación estable que es entregado al punto de acoplamiento común:

$$P(t) = \frac{3}{2} v_{sd}(t) * i_{sd}(t) \dots\dots\dots (15)$$

$$Q(t) = -\frac{3}{2} v_{sd}(t) * i_{sq}(t) \dots\dots\dots (16)$$

En la figura 18, se toma las corrientes de $i_{ref,d}$ y $i_{ref,q}$, las cuales son calculadas mediante las siguientes expresiones:

$$i_{sd}^* = \frac{2P^*}{3v_{sd}} \dots\dots\dots (17)$$

$$i_{sq}^* = \frac{-2Q^*}{3v_{sd}} \dots\dots\dots (18)$$

Donde:

P*: Potencia activa de referencia.

Q*: Potencia Reactiva de referencia.

v_{sd} : Voltaje en el eje d del marco de referencia estacionario del lado de red.

i_{sd}, i_{sq} : Corrientes en el eje dq del marco de referencia estacionario del lado de red.

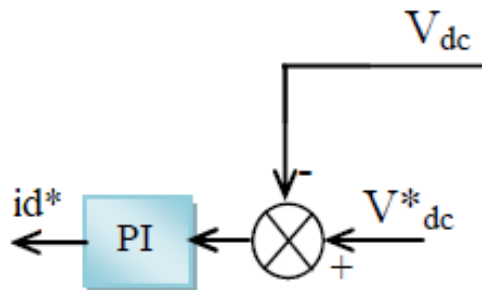


Figura 20. Control outer loop.

Fuente: [23].

9. PREGUNTAS CIENTÍFICAS O HIPÓTESIS

El diseño de control para la potencia activa y reactiva de un aerogenerador permitirá la sincronización de las variables de estado y frecuencia a la barra infinita.

10. METODOLOGÍAS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Modalidades de la Investigación

El diseño de la investigación responde a las modalidades, bibliográfico-documental y de campo.

Investigación Bibliográfica-Documental: Tiene el propósito de detectar, ampliar y profundizar diferentes enfoques, teorías conceptualizaciones y criterios de diversos autores sobre el análisis de los sistemas de conversión de energía eólica por medio de las fuentes primarias, y el aporte de los comentarios de las fuentes secundarias es decir el aporte del investigador. Mediante la cual se recopilará y se analizará toda la información teórica relacionada con las variables, dimensiones e indicadores.

Niveles o Tipos de Investigación

Descriptivo: El nivel descriptivo facilita la identificación de las variables, el análisis crítico de la situación; en el caso del estudio, los métodos de control y las configuraciones de los aerogeneradores que se han desarrollado para poder determinar la operación y control de los generadores eólicos.

Técnicas de investigación

Observación: Es la Técnica más adecuada en la investigación, ya que parte de la utilización sensorial para el correspondiente registro de datos obtenidos en el proceso, llegando a obtener resultados de gran ayuda para la ejecución del proyecto.

Simulación: La simulación se la desarrollará mediante el uso del software Simulink/Matlab, el cual permite diseñar y analizar el resultado obtenido en base a las condiciones y parámetros propuestos.

11. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Simulación del control de potencia activa y reactiva de un aerogenerador

La configuración empleada en la simulación es el aerogenerador tipo D o tipo 4, debido a que presenta una mayor eficiencia de conversión de energía eólica. Para la turbina eólica se utiliza un control de pitch angle ($\beta = 0$), que es el más utilizado para velocidades variables ya que permite captar la mayor potencia mecánica por la turbina, además estará conectado mediante un generador síncrono de imanes permanentes por accionamiento directo (sin caja de engranajes), para lo cual se implementa un control back to back compuestos por un rectificador e inversor accionado por IGBT's, capaz de permitir el flujo de potencia bidireccionalmente, el esquema descrito es el siguiente:

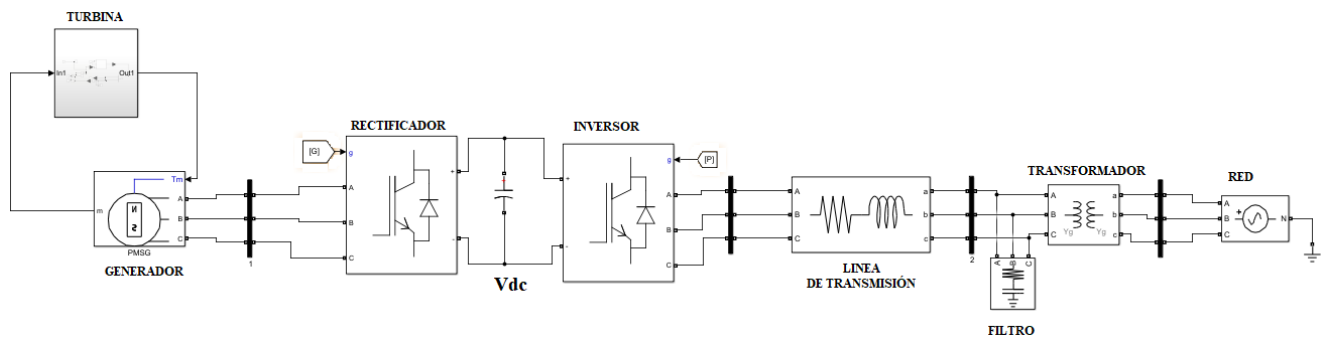


Figura 21. Aerogenerador tipo 4 de velocidad variable con máquina síncrona de imanes permanentes (PMSG).

Realizado por: Los Autores.

Modelo de la turbina eólica

Para la simulación, el modelo se basa en las características de potencia de la turbina en estado dinámico. La salida de la potencia viene dada por la (ecuación 8) y el coeficiente de potencia viene dada por la (ecuación 9). El bloque de la turbina se utiliza el que proporciona Simulink en la carpeta Simscape, asignando los siguientes parámetros de trabajo.

Tabla 6. Parámetros de turbina.

Potencia mecánica nominal	2 MW
Potencia base del generador	2.04 MVA
Velocidad del viento	12 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
Diámetro	80 m
RPM mínimos	10.2
RPM nominal	22
Velocidad mecánica del rotor	2.3 rad/s
Área del rotor	5026.54 m ²
Densidad del aire	1.225 Kg/m ³

Realizado por: Los Autores.

Turbina de velocidad variable con máxima transferencia de potencia bajo el siguiente perfil de vientos evaluados:

Tabla 7. Velocidades del viento.

V(m/s)	6	7.2	8.4	9.6	10.8	12
--------	----------	------------	------------	------------	-------------	-----------

Realizado por: Los Autores.

Las ecuaciones para implementarse se muestran a continuación:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot A \cdot V_w^3$$

$$\lambda = \frac{\omega_m}{V_w} * \left(\frac{\phi}{2}\right)$$

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

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 * \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4 * \beta - 5\right) * e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.01 * \lambda$$

Para la turbina de velocidad variable ω_m opera desde $\omega_{min} = 10.2 \text{ rpm}$ hasta $\omega_{nom} = 22 \text{ rpm}$. Para la turbina con las mismas características, se halla el C_p para cada valor del viento V_w . Para cada curva obtenida, se encuentra el valor máximo de coeficiente de potencia C_p donde se halla el valor de λ_{optimo} .

Tabla 8. Parámetros calculados a distintas velocidades del viento.

Velocidades del viento	Lambda	Lambda prima	Coficiente de potencia	Potencia de la turbina (MW)
6	15.33	15.29	0.43	0.287
7.2	12.77	12.74	0.48	0.553

8.4	10.95	10.91	0.49	0.885
9.6	9.58	9.54	0.46	1.256
10.8	8.51	8.48	0.42	1.639
12	7.66	7.63	0.38	2.007

Realizado por: Los Autores.

En la tabla 8, se presenta los valores de lambda, coeficiente de potencia y la capacidad de la turbina a diversas velocidades, considerando que el valor de beta ($\beta = 0$), por tal motivo la velocidad de 12 m/s proporciona la potencia mecánica nominal por la turbina, debido a que genera 2 MW con un coeficiente máximo de potencia de 0.38, valor nominal de la turbina dispuesta por el bloque de Matlab/Simulink.

La potencia mínima entregada por la turbina es a una velocidad de 6 m/s, en la figura 22 se muestran las curvas de la potencia para diferentes velocidades evaluadas en la tabla 8.

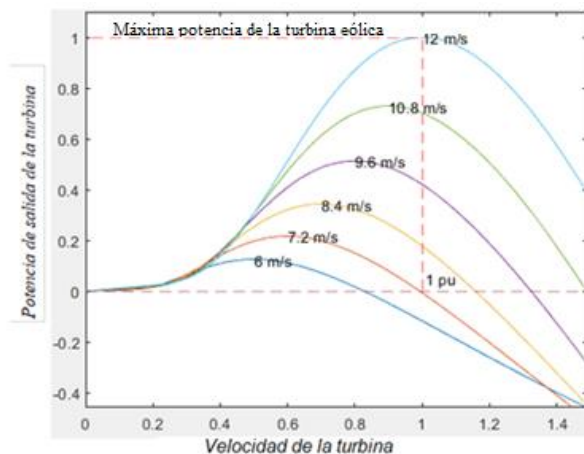


Figura 22. Potencia máxima a una velocidad de 12m/s con ángulo de beta a 0° .

Fuente: [8].

Tabla 9. Parámetros calculados a distintos valores de beta.

Velocidad	Lambda	Beta	Coefficiente de potencia	Potencia de la turbina (MW)
12	7,6	0	0.38	2.007
		5	0.33	1.73
		10	0.25	1.321
		15	0.15	0.796
		20	0.03	0.144

Realizado por: Los Autores.

En la tabla 9, se muestra para diversos valores de beta a una velocidad de 12 m/s, se determina que, al aumentar el valor de beta, el coeficiente de potencia y la potencia mecánica de la turbina tienden a disminuir. En la figura 23, se muestra la curva de potencia de salida del aerogenerador para diversos valores de beta.

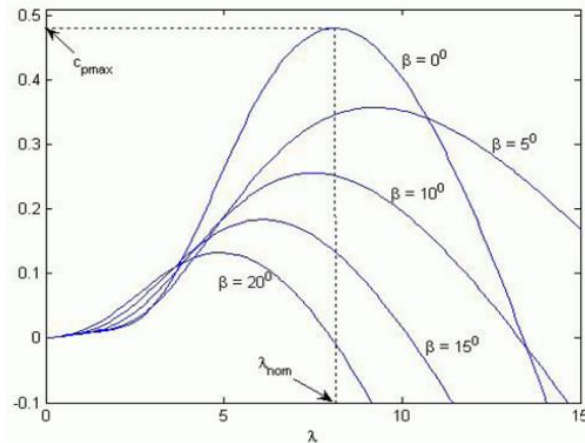


Figura 23. Potencia de salida para diferentes ángulos de beta= 0°, 5°, 10°, 15° y 20°.

Fuente: [7].

Máquina síncrona de imanes permanentes (PMSG)

En el proyecto se ha utilizado el bloque de Simscape, dentro de Simulink, que simula el funcionamiento del generador síncrono de imanes permanentes. El bloque de la máquina opera en ambos casos como generador o motor. El modo de operación es dado por la señal del torque mecánico (positivo en modo motor y negativo modo en generador).

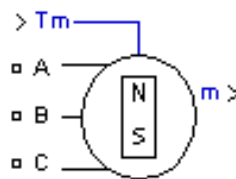


Figura 24. Bloque de máquina de imanes permanentes.

Fuente: [8].

Tabla 10. Parámetros de la máquina.

Resistencia del estator	0.00119	Ohm
Inductancia de armadura	0.00089145	H
Enlace de flujo	2.8	Wb-V
Inercia	2.26E+03	kg.m ²

Amortiguamiento viscoso	1.35E-05	N.m.s
Par de polos	45	
Fricción estática	0	
Frecuencia	34 Hz	

Realizado por: Los Autores.

Las señales de salida de medición del bloque son la velocidad del rotor (W_r) y el torque electromagnético (T_e), y por ende el producto de dichos términos indica la potencia generada que se muestra en la figura 25 en p.u a una entrada escalón para una velocidad de 12 m/s.

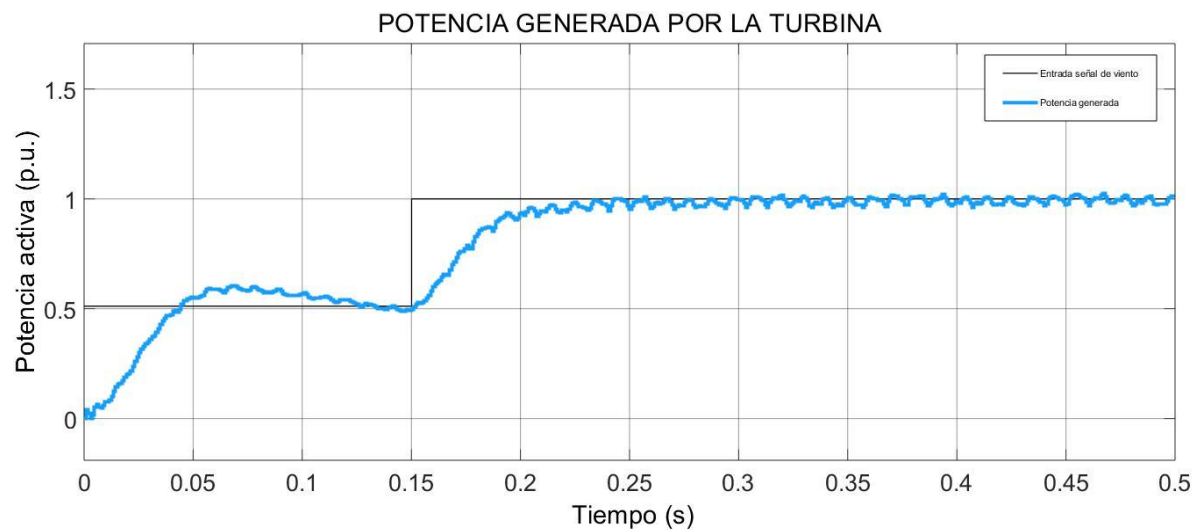


Figura 25. Curva de potencia de salida en por unidad.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 26, se presentan las curvas del torque electromagnético y la velocidad del rotor, por tal razón, para que la máquina este trabajando en modo generador, el torque mecánico debe ser negativo dando un valor de $-4 * 10^5 N * m$ ($T_m = T_e$), además, se debe considerar que a mayor número de polos menor es la velocidad de la máquina.

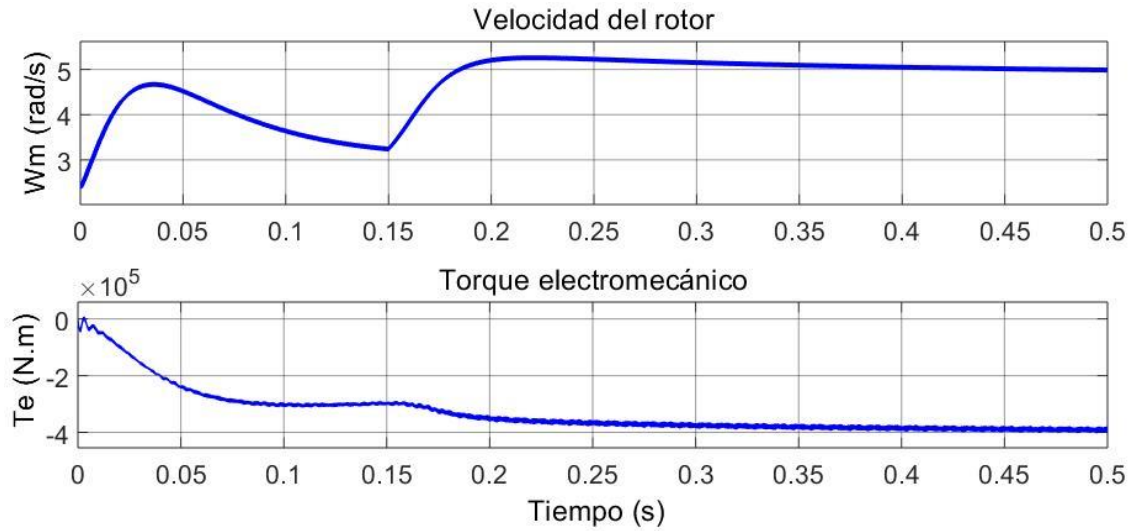


Figura 26. Velocidad del rotor (superior) y torque electromagnético (inferior).

Realizado por: Los Autores.

Control en lado del generador

Control Outer Loop

El bloque de control toma de entrada las variables de la velocidad mecánica y potencia activa por unidad, dando el límite de la señal de entrada a los valores de saturación superior e inferior a la velocidad mecánica y la diferencia con el valor de la potencia, forman un lazo abierto mediante un controlador PI ajustado con respecto a la tabla 11, se obtiene en su salida la corriente de referencia (I_{dq}), como se muestra en el siguiente bloque.

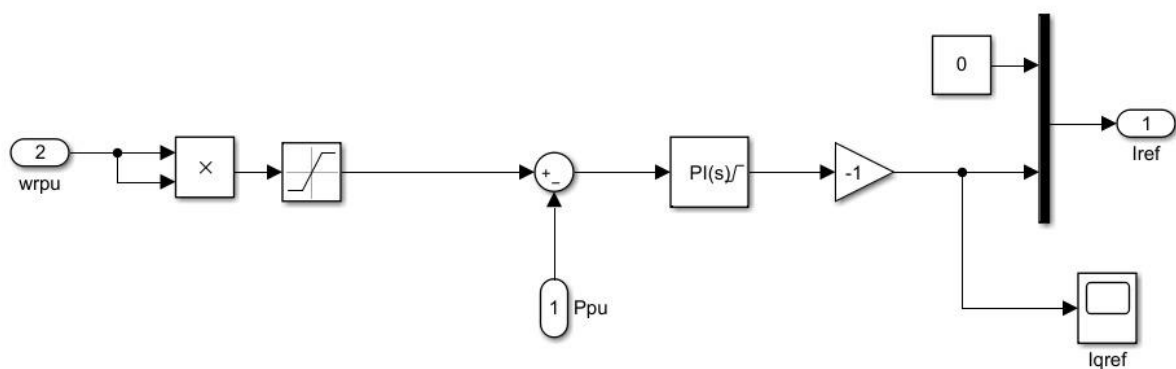


Figura 27. Esquema de control Outer Loop lado de generación.

Realizado por: Los Autores.

Tabla 11. Constantes de control outer loop.

Ki	Kp	Ganancia
100	500	-1

Realizado por: Los Autores.

El objetivo del control outer loop es determinar una corriente de referencia, la cual permite ser variada de acuerdo con la velocidad mecánica y la potencia por unidad, considerando un límite de saturación.

El límite de saturación propuesto en el control outer loop, permite que la señal se mantenga dentro del rango de ± 3000 , debido a que la sintonización de los controladores PI son muy sensibles y pierden estabilidad, además que la potencia generada por la turbina no debe exceder el valor nominal.



Figura 28. Señal de la corriente de referencia en el control outer loop (Id).

Realizado por: Los Autores.

En la figura 28, se aprecia la señal de I_{d_ref} del outer loop basado en las constantes de control, la cual se estabiliza a partir de tiempo de 0.3 s., para la señal de referencia en el eje $I_q=0$, debido a que se inserta toda la potencia activa dada por la turbina.

Control Inner Loop

Las variables de entrada del control inner loop son las corrientes generadas por la máquina en el eje I_{dq} , las cuales siguen la referencia de corriente entregada por el control outer loop como se muestra en la figura 29.

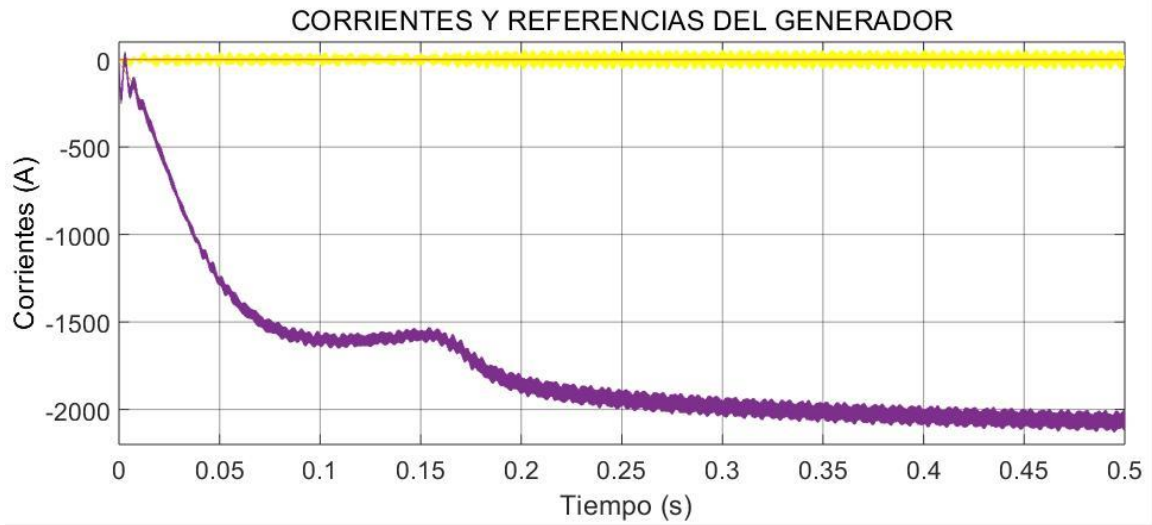


Figura 29. Señales de corrientes y de referencia en el eje dq.

Realizado por: Los Autores.

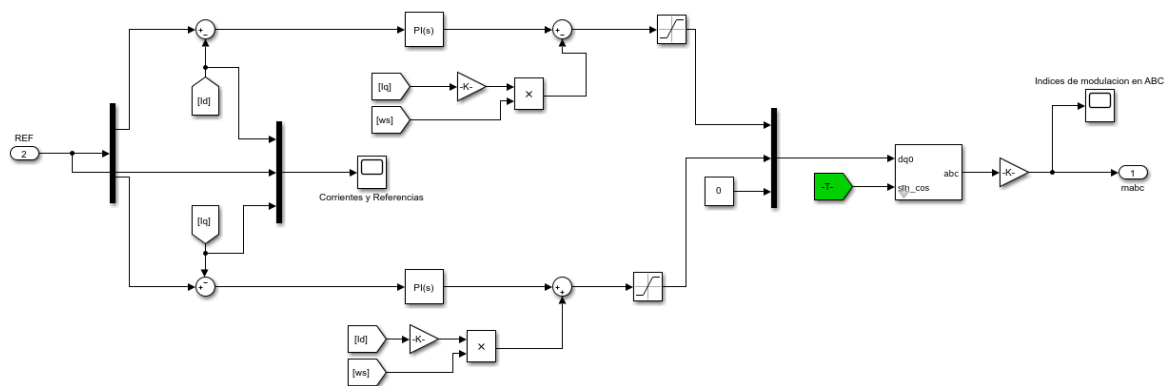


Figura 30. Control Inner Loop lado de generación.

Realizado por: Los Autores.

Tabla 12. Constantes de control inner loop.

Ki	Kp	Ganancia
1	5000	8.9145e-04

Realizado por: Los Autores.

En la figura 30, se muestra el lazo de control interno, en el cual compara la corriente de referencia con las corrientes del eje estacionario (dq0) calculada por medio de la transformada de Park mostrada en la figura 32 a), además de los controladores PI para Id e Iq respectivamente, por lo cual se considera contrastar la señal de onda entre los controladores y el valor multiplicado entre la inductancia de la armadura y las corrientes del eje estacionario independientemente, dichas señales se centra en un límite de saturación alto y bajo que permite

estabilizar la señal, para dirigirse al bloque de transformación (dq0 a abc) para obtener el índice de modulación en la figura 34.

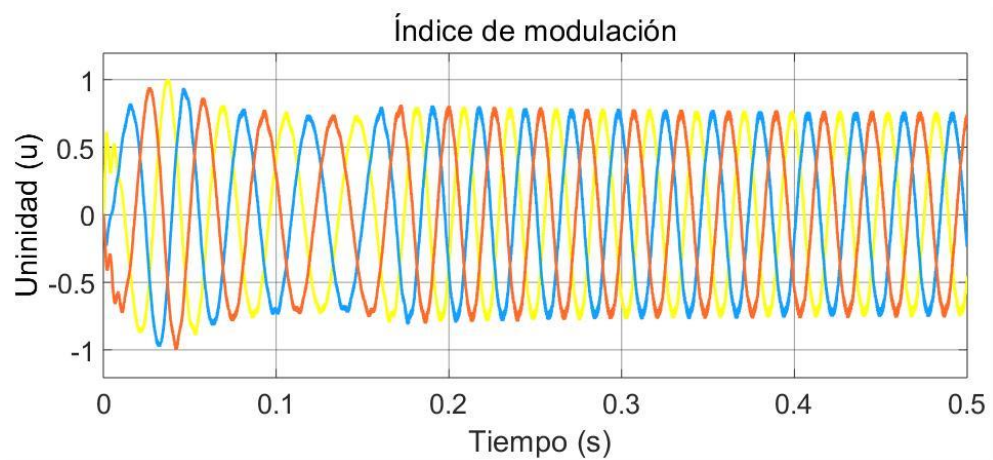


Figura 31. Señal moduladora.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 32 b), se muestra el diagrama de bloque para encontrar la velocidad de rotación sincrónica y ángulo de desfase necesario para la transformada de Park.

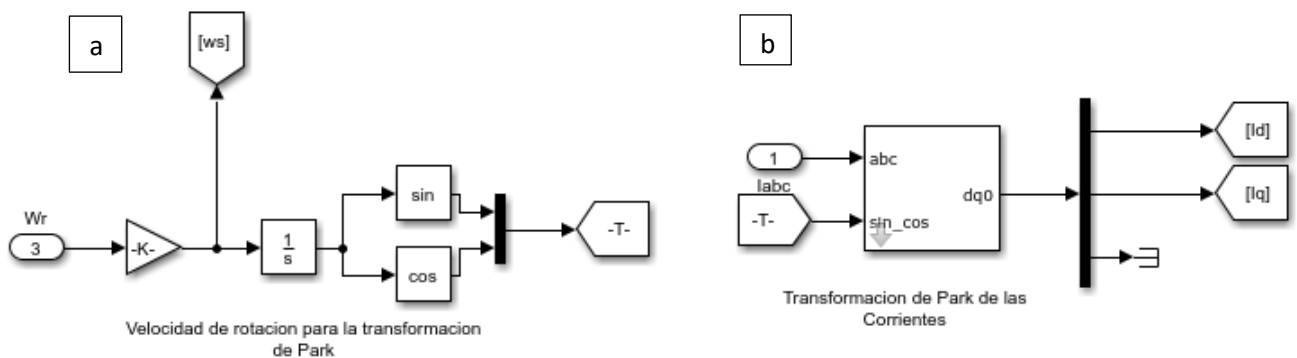


Figura 32. a) Transformada de Park de las corrientes, b) Velocidad de rotación para la transformación de Park.

Realizado por: Los Autores.

El objetivo del inner loop, se basa en controlar la corriente de referencia con relación a las corrientes en el eje dq0, considerando la inductancia y la velocidad sincrónica de la máquina para el control, definiendo un límite de saturación que permite que las señales obtenidas no sean superadas y afecte al índice de modulación a la salida de la conmutación de pulsos enviadas al rectificador.

Índice de Modulación

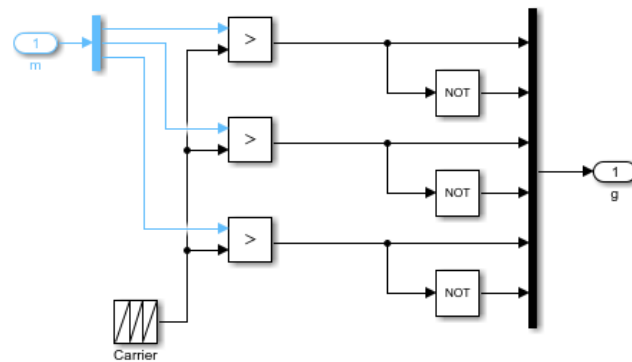


Figura 33. Modulación de ancho de pulso PWM.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 33, se muestra las señales de entrada del índice de modulación de la figura 31, es la señal de referencia a la frecuencia fundamental, que se vincula con una onda en forma de diente de sierra que es la onda portadora a mayor frecuencia. La onda de referencia es comparada con la onda portadora y se comporta de la siguiente manera:

- la onda de referencia $>$ onda de portadora, la salida de conmutación será alta.
- la onda de referencia $<$ onda portadora, la salida de conmutación será baja.

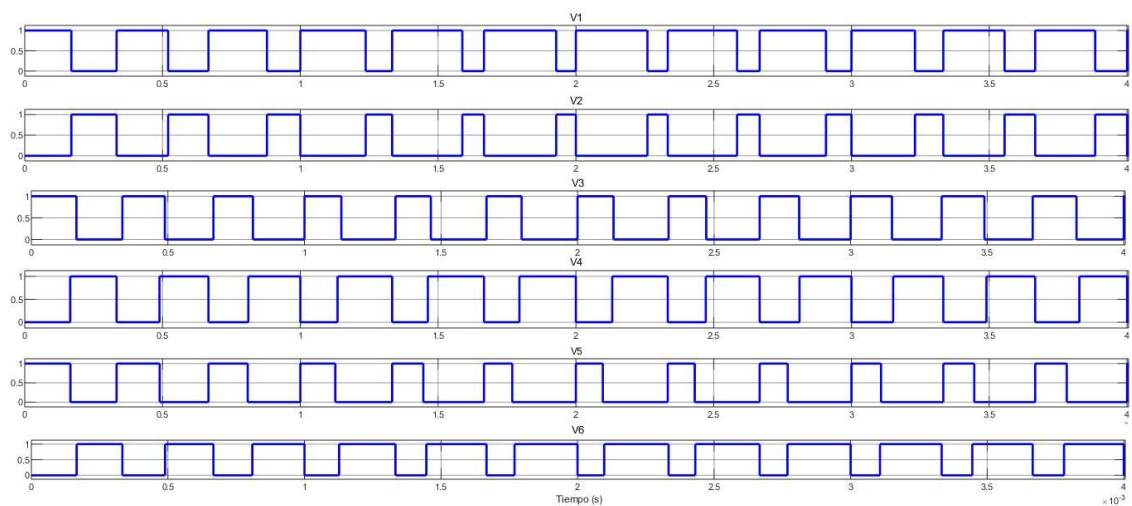


Figura 34. Pulsos que ingresan al rectificador.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 34, se presentan los pulsos que son determinados por el PWM, de acuerdo con la condición de la onda portadora y la onda de referencia, mientras que en la figura 35, se muestra el esquema del control en el lado del generador.

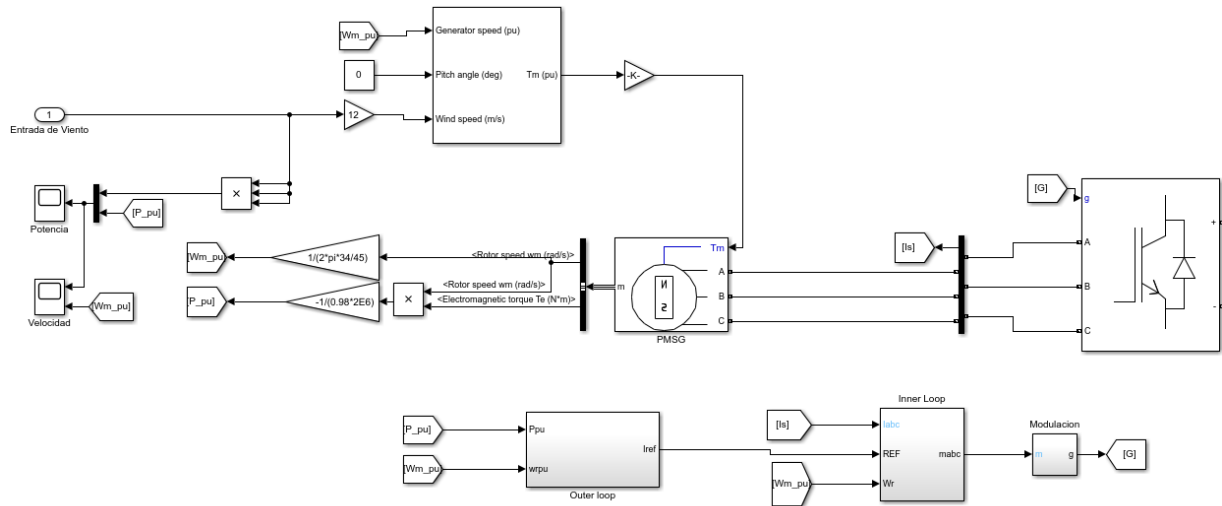


Figura 35. Esquema de simulación en el lado del generador.

Realizado por: Los Autores.

Control en el lado de red

Valores utilizados:

Tabla 13. Parámetros utilizados para la simulación en el lado de red.

Componentes	Valores
Barra C.C.	$C = 1000 \mu F$
Línea de transmisión	$R = 2 \Omega$
	$L = 0.2 mH$
Barra salida del convertidor	$V_{L-L} = 1225 V$
	$f = 60 Hz$
Tiempo de simulación	$0.5 s.$
Tiempo discreto	$1e-6$

Realizado por: Los Autores.

Barra de corriente continua (Vdc)

Cálculos

A continuación, se presentan los valores utilizados en la simulación:

$$V_{L-L} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{\frac{2}{3}} * 2}$$

$$V_{DC}: V_{L-L} * \sqrt{\frac{2}{3}} * 2$$

$$V_{DC}: 1225 * \sqrt{\frac{2}{3}} * 2$$

$$V_{DC}: 2000 \text{ V}$$

Voltaje Vdc de referencia para el Outer Loop:

$$V_{dc_referencia}: \frac{V_{DC}}{\sqrt{3}}$$

$$V_{dc_referencia}: \frac{2000}{\sqrt{3}}$$

$$V_{dc_referencia}: 1155 \text{ V}$$

Control PLL

Para el control de lazo se determinan las señales de voltaje de la red en el eje dq0, por medio de un control a lazo cerrado se toma la frecuencia de trabajo de la red y se la compara con un valor de referencia de $2 * \pi * f$.

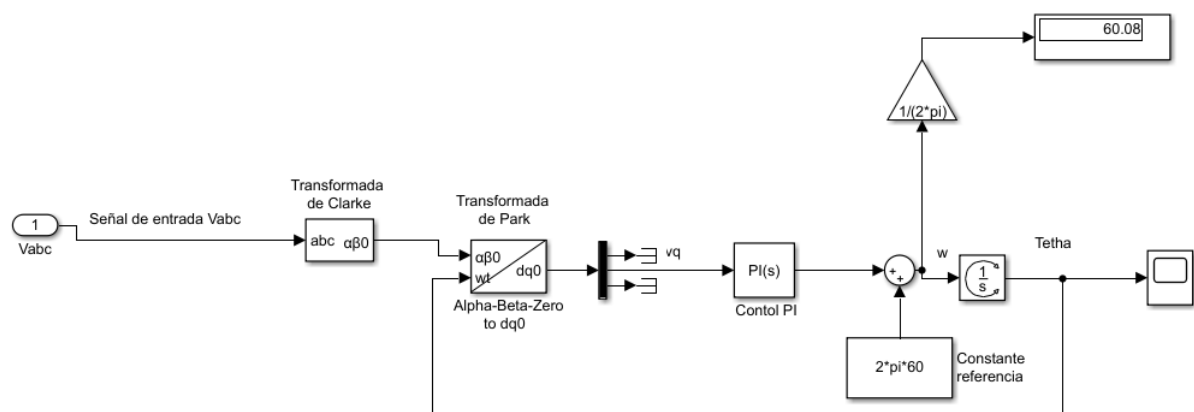


Figura 36. Simulación del control PLL sincronizado con la red.

Realizado por: Los Autores.

El resultado del lazo cerrado que es implementado para la sincronización de la velocidad angular que variará el valor de theta como se observa en la figura 40, este ángulo es utilizado para la transformadas de las componentes Park dq0 en los siguientes controles posteriores, de esta

manera el sistema trabajará a una frecuencia de 60 Hz y a una velocidad angular de $2\pi f = 377$ aproximadamente.

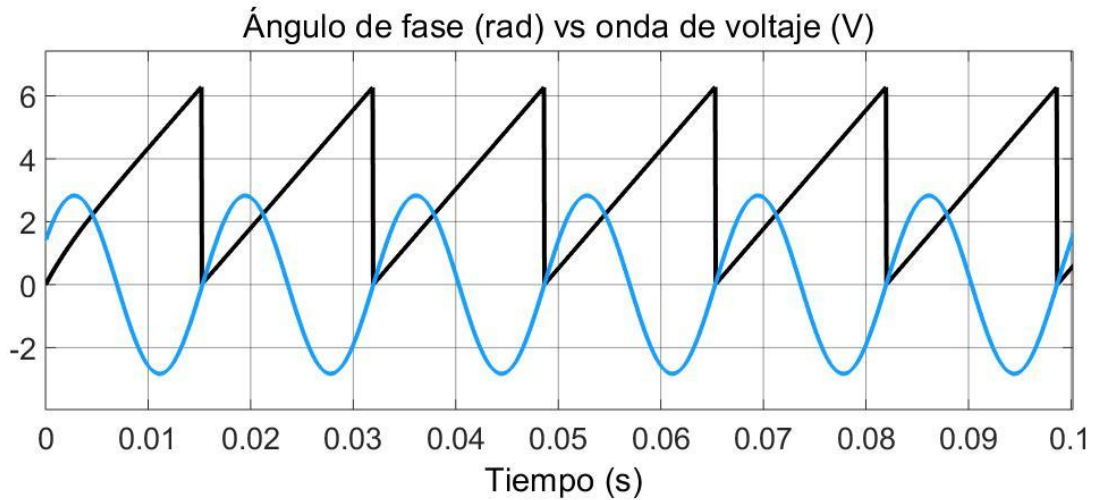


Figura 37. Ángulo de fase theta (Θ) con respecto a la onda de voltaje de fase de la red.

Realizado por: Los Autores.

El ángulo theta es utilizado en la transformada de Park, para obtener las corrientes y voltajes en el eje dq0.

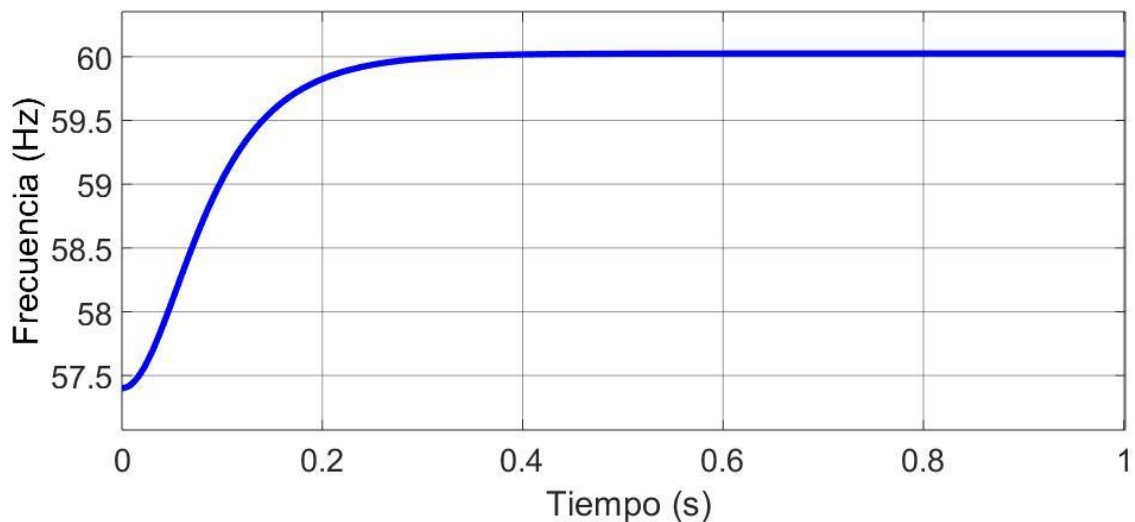


Figura 38. Frecuencia estable al valor de 60 Hz.

Realizado por: Los Autores.

Transformada de Clarke y Park

La transformada de componentes en dominio de tiempo para un sistema trifásico en componentes estacionarios alpha y beta (transformada de Clarke), para luego llevar a un modelo rotatorio de ejes dq0 (transformada de Park) [17][24]. Este proceso ayuda a simplificar cálculos

y procesos de control necesarios para transformar las señales alternas en continuas manteniendo su magnitud y ángulo.

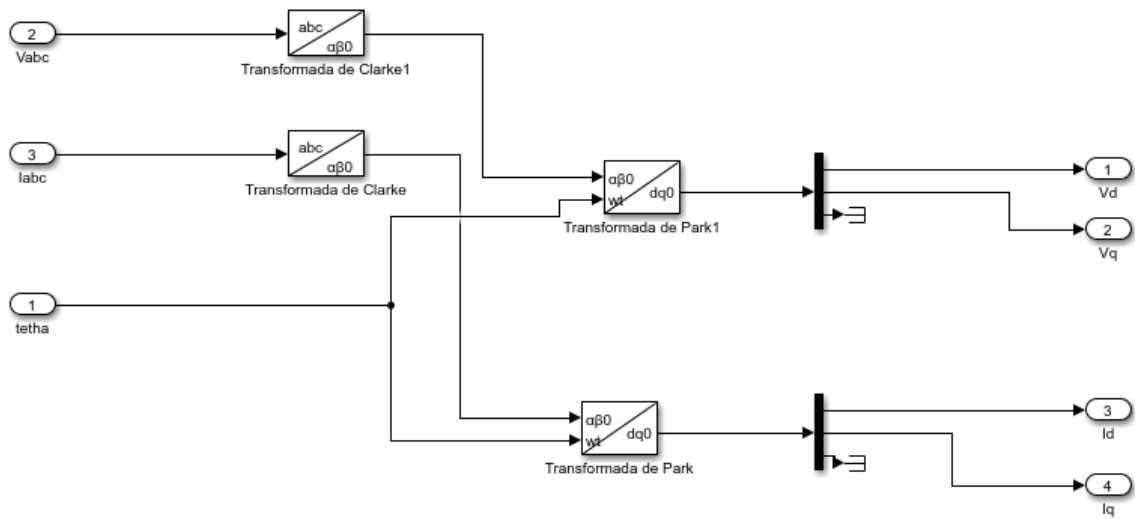


Figura 39. Simulación de transformación de Clarke y Park.

Realizado por: Los Autores.

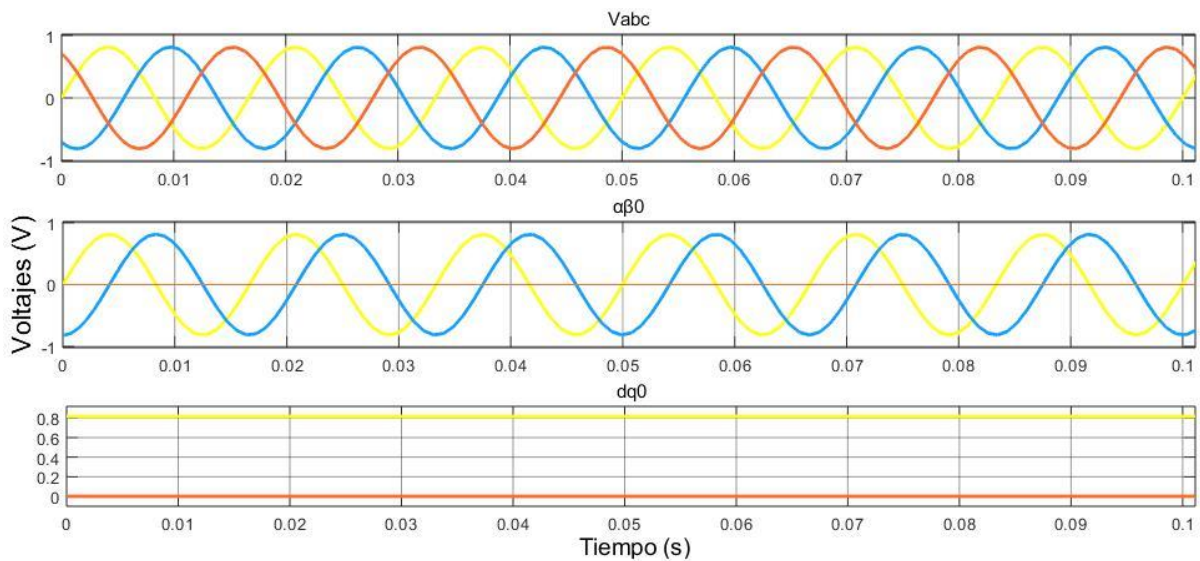


Figura 40. Curvas de la transformada de Clarke y Park.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 40, en la parte superior se muestra la señal abc obtenida por la red, en la parte intermedia se presenta las curvas obtenidas por la transformada de Clarke, en la parte inferior se observa el resultado por parte de la transformada de Park, las cuales son utilizadas en los controladores a realizarse.

Cálculo de abc-dq0 para corrientes y voltajes en el lado de red en un tiempo de $t= 0.5$ s.

- Voltajes

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

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(6.143) & \sin(6.143 - \frac{2\pi}{3}) & \sin(6.143 + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(6.143) & \cos(6.143 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(6.143 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -133.7 \\ -789.2 \\ 922.9 \end{bmatrix}$$

Tabla 14. Valores calculados y obtenidos de voltaje por el Programa.

	Calculados	Matlab/Simulink
Vd	997.46	997.4
Vq	5.72	5.77
V0	2e-12	3e-9

Realizado por: Los Autores.

- Corrientes

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(6.143) & \sin(6.143 - \frac{2\pi}{3}) & \sin(6.143 + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(6.143) & \cos(6.143 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(6.143 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 245.9 \\ 813.5 \\ -1059 \end{bmatrix}$$

Tabla 15. Valores calculados y obtenidos de corriente por el programa.

	Calculados	Matlab/Simulink
Id	-1104.82	-1105
Iq	92.29	92.38
IO	0.13	-1.27e-9

Realizado por: Los Autores.

Control INNER LOOP

El control vectorial de corrientes que circula del inversor hacia la red se realiza mediante el lazo interno.

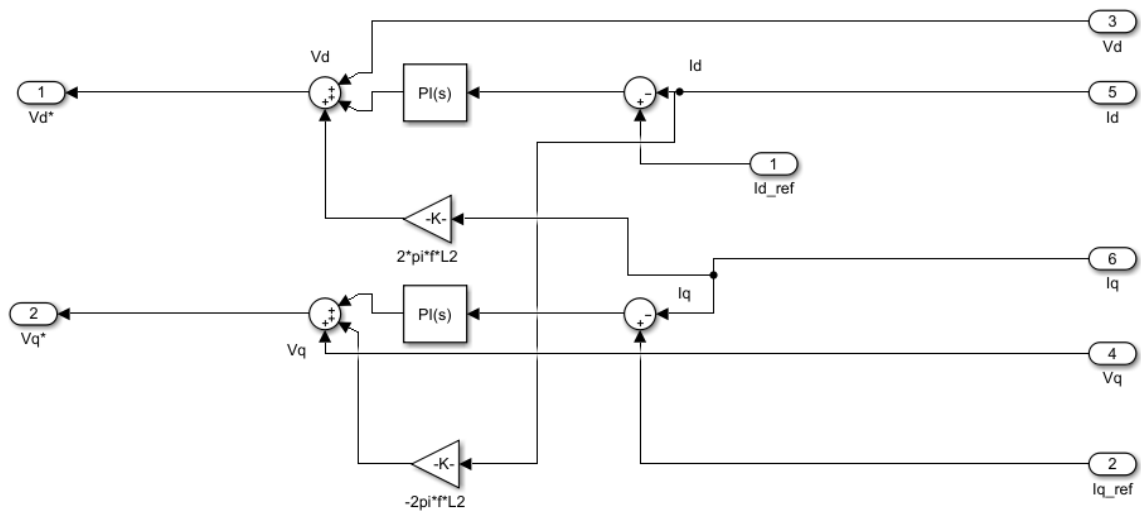


Figura 41. Simulación del control inner loop.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 41, se muestra el esquema de control inner loop que tiene como variables de entrada V_d , V_q , I_d , I_q , que son calculadas por parte del bloque de la transformada de Park utilizando el ángulo (ωt) de la sincronización con la red, además de la I_{d_ref} y I_{q_ref} que son valores dados por el investigador o también pueden ser calculados que se presentarán más adelante.

Cálculo

$$\begin{bmatrix} V_{xd} \\ V_{xq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} 0 & -\omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}$$

Datos:

R: 2 ohm**Iq:** -92.38**L:** 0.2e-3 H**Vsd:** 997.4**Id:** -1105**Vsq:** 5.776

$$\begin{bmatrix} V_{xd} \\ V_{xq} \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} -1105 \\ -92.38 \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} -1105 \\ -92.38 \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} 0 & -6.143 \\ 6.143 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1105 \\ -92.38 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 997.4 \\ 5.776 \end{bmatrix}$$

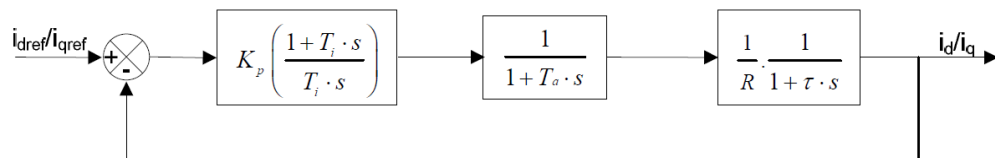
Tabla 16. Valores calculados y obtenidos por el programa.

	Calculados	Matlab/Simulink
V_{xd}	-1213	-1235
V_{xq}	188.96	71.66

Realizado por: Los Autores.

Obteniendo como respuesta las variables de V_d^* y V_q^* , que permitirán acoplarse a un modulador por ancho de pulso en vector espacial (SVPWM) mediante la transformada de Clarke de dq0 a $\alpha\beta 0$ para convertir la señal por medio del bloque SVPWM de segundo nivel, el cual es encargado de enviar los pulsos al inversor.

Método de modulus optimum para encontrar K_p y K_i .

Figura 42. Diagrama de bloques reducido en los ejes d y q.**Fuente:**[19]

Los parámetros del circuito son:

Tabla 17. Parámetros del control inner loop en el lado de la red.

R	2 (Ohm)
L	0.2e-3 (H)
fs	10000 (Hz)
f	60 (Hz)

Realizado por: Los Autores.

Donde se busca del diagrama de bloques que el término $(1+T_i*s)$ sea igual al término $(1+\tau s)$, se define entonces que $\tau = T_i$.

Se obtiene entonces la función de transferencia del sistema en lazo abierto:

$$G_{C,ol}(s) = \frac{K_p}{\tau * R} * \frac{1}{s * (1 + T_a * s)}$$

Siendo:

$$T_i = \tau = \frac{K_p}{K_i}$$

$$T_a = \frac{T_s}{2} = \frac{1}{2 * f_s} = 50 * 10^{-6}$$

Realizando el control de la corriente con Modulus Optimum se obtiene:

$$T_i = \tau = \frac{L}{\omega * R} = \frac{0.2 * 10^{-3}}{120\pi * 2} = 2.6525e - 7$$

$$K_p = \frac{\tau * R}{2 * T_a} = \frac{2.6525e - 7 * 2}{2 * 50 * 10^{-6}} = 0.005305$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} = 20000$$

Tabla 18. Constantes de los controladores PI.

Kp	0.0058
Ki	20000

Realizado por: Los Autores.

Control OUTER LOOP

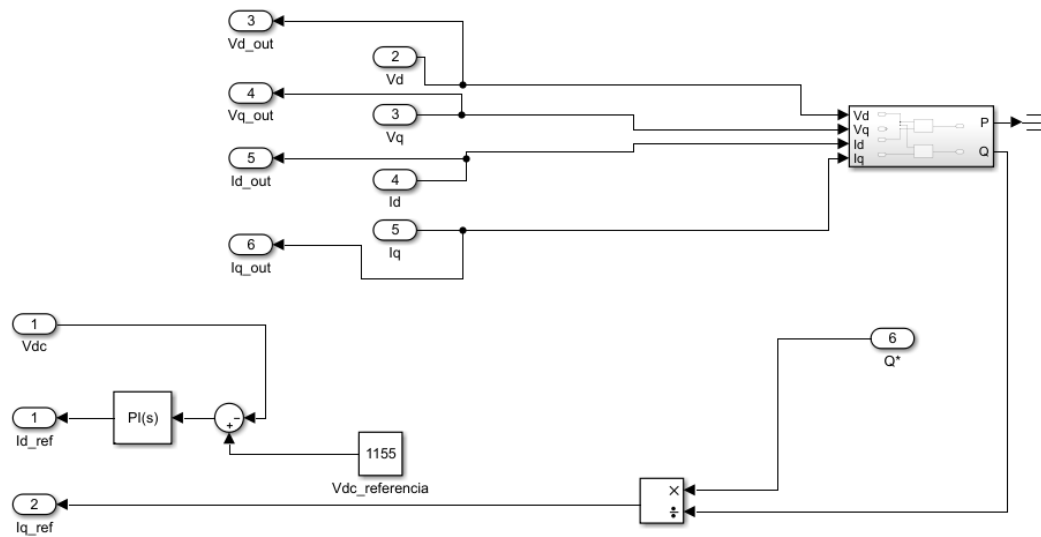


Figura 43. Simulación del control outer loop.

Realizado por: Los Autores.

Tabla 19. Constantes PI en el outer loop.

Kp	0.8
Ki	200

Realizado por: Los Autores.

En la figura 43, se muestra el control outer loop que tiene como entrada Q^* , es el valor con respecto a la cantidad de potencia reactiva de referencia a suministrar a la red, la división entre la referencia y la calculada da como resultado la corriente I_q de referencia.

Además, para obtener la corriente I_d de referencia se realiza un lazo de control abierto, mediante la diferencia V_{dc} de la barra de corriente continua y el V_{dc} calculado anteriormente, da como resultado una corriente de referencia en el eje I_d que entrará juntamente con el eje I_q al control interno Inner Loop.

Nota: Para minimizar el valor de Q por medio del control outer se tomó un valor de referencia 0 y además el valor de $V_q=0$ por tal razón las ecuaciones quedarían de la siguiente manera mostrada en lenguaje de una función empleadas por el programa.

Cálculo de P y Q

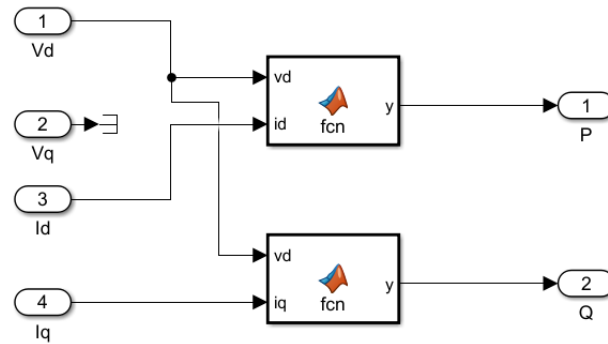


Figura 44. Bloque para el cálculo de P y Q.

Realizado por: Los Autores

Cálculo de P:

```
function y = fcn(vd,id)
```

```
u=(3/2)*(vd*id);
```

```
y = u;
```

Cálculo de Q:

```
function y = fcn(vd,iq)
```

```
u=-(3/2)*(vd*iq);
```

```
y = u;
```


Cálculo de la potencia en el eje dq0

$$P(t) = \frac{3}{2} v_{sd}(t) * i_{sd}(t)$$

$$P(t) = \frac{3}{2} (348.5) * (-313.4)$$

$$Q(t) = -\frac{3}{2} v_{sd}(t) * i_{sq}(t)$$

$$Q(t) = -\frac{3}{2} (348.5) * i_{sq}(91.83)$$

Tabla 20. Valores calculados y obtenidos por el programa Matlab.

	Calculados	Matlab/Simulink
P (MW)	-1.65	-1.65
Q (MVar)	0.14	0.12

Realizado por: Los Autores.

Espacio vectorial por modulación de ancho de pulso (SVPWM)

En la figura 45, se muestra el esquema del vector espacial por modulación de ancho de pulso compuesto por las variables de entrada V_q^* y V_d^* obtenidas anteriormente por el control Inner Loop.

Las respuestas V_d^* y V_q^* deberá realizar la conversión de $dq0$ a $\alpha\beta0$ para después ingresar al bloque (SVPWM) que enviará los pulsos al inversor con una frecuencia de conmutación de 10 kHz.

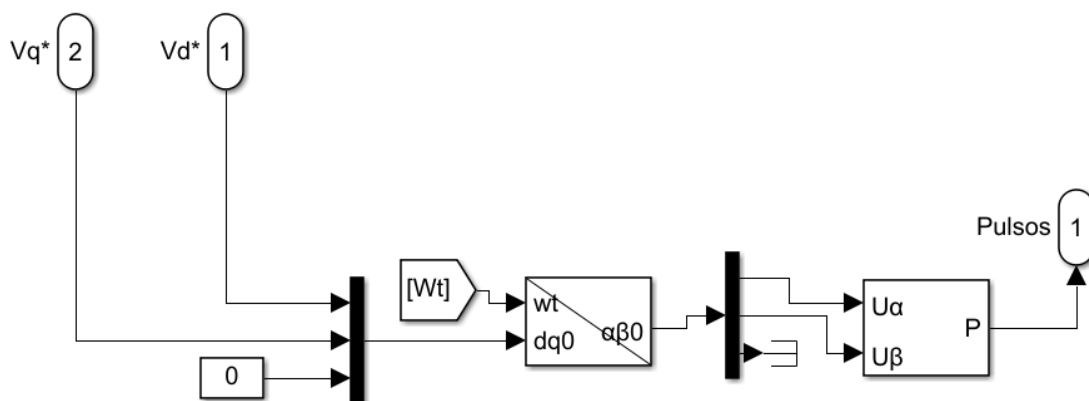


Figura 45. Generador SVPWM de segundo nivel.

Realizado por: Los Autores.

Control orientado de voltaje (VOC)

En la figura 46, se muestra el control en el lado de la red que este compuesto por el inversor, transformador elevador, línea de transmisión, filtro y la barra infinita.

El VOC está constituido por el PLL, inner y outer que se detallaron anteriormente y permite en conjunto el control de la potencia activa y reactiva por medio de los controladores PI y los valores de referencia de P^* , Q^* , I_d_ref y I_q_ref .

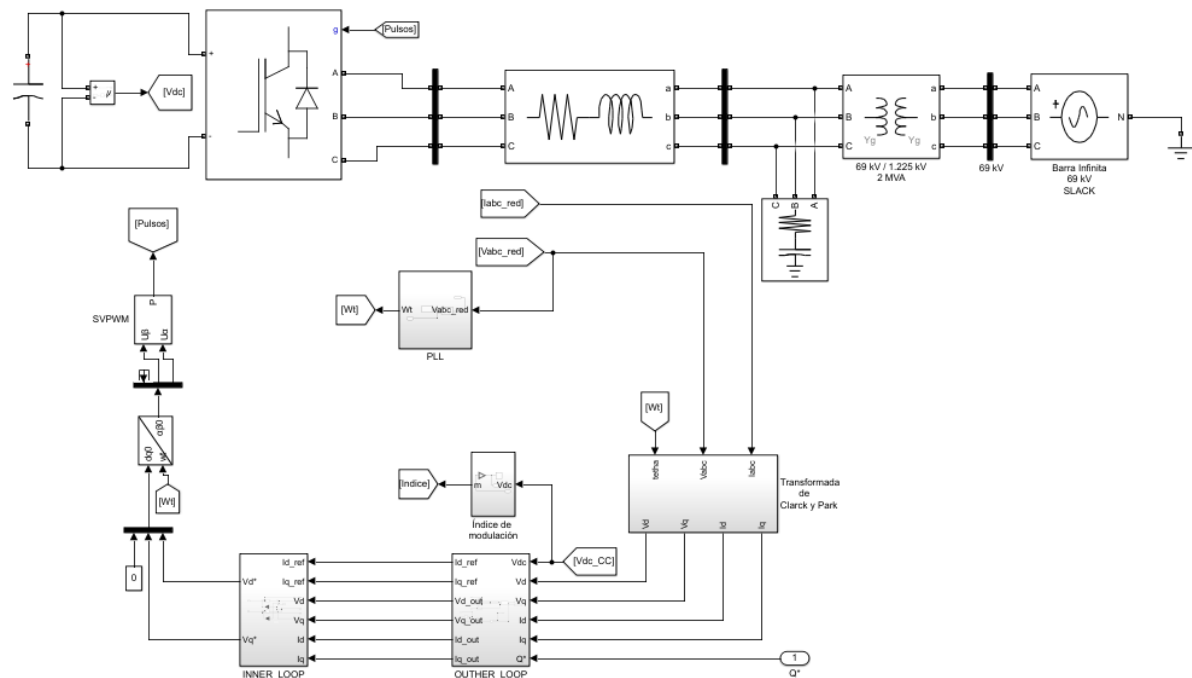


Figura 46. Simulación en lado de red.

Realizado por: Los Autores.

Filtro

Para inyectar potencia a la red es necesario la implementación de un filtro a la salida del convertidor, para filtrar y minimizar el orden de los armónicos que se presentan debido a la conmutación por los IGBT's.

Cálculo

$$Q_C = S * 0.1$$

$$Q_C = 2.04 \text{ MVA} * 0.1$$

$$Q_C = 204000 \text{ MVar}$$

Transformador

Para elevar a un nivel de medio voltaje se implementa un transformador 1.225 kV/ 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 orientado de voltaje (VCO) a una barra Slack de 69 kV a 60 Hz, por medio de un filtro capacitivo y un transformador.

Integración de todos los bloques en la Simulación del Control de Potencia Activa y Reactiva de un Aerogenerador.

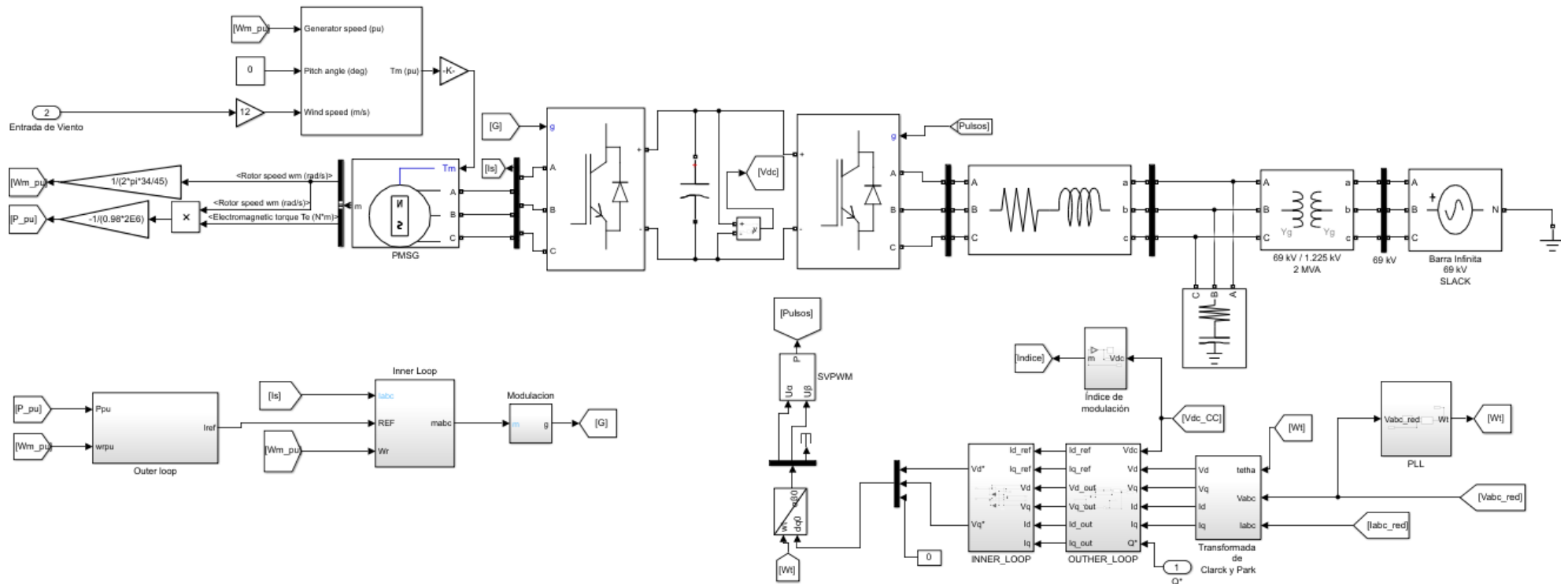


Figura 47. Esquema integrado los controles en el lado del generador y la red.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 47, se muestra la simulación completa integrada por varios componentes: el bloque de la turbina en el cual se detalla los parámetros en la tabla 6, el bloque de la máquina síncrona de imanes permanentes detallada en la tabla 10, los controladores inner y outer loop en el lado del generador, que permite enviar las señales aun PWM (modulación de ancho de pulso), almacenando la energía por el capacitor Vdc, mientras que en el lado de red están los controladores PLL, inner y outer loop, que en conjunto forma el control orientado de voltaje, que tiene como objetivo el control de la potencia activa y reactiva que es suministrada a la red.

Índice de modulación

El índice de modulación compara la señal moduladora y señal portadora, el cual da como resulta los pulsos que activa la conmutación de los IGBT's, además se considera el rango de operación de dicho elemento, de 2 a 20 KHz y por ende la frecuencia de conmutación de los IGBT's es de 10 KHz.

A continuación, se detalla la siguiente formula:

$$ma = \frac{V_{dc}}{V_{LL} * \sqrt{\frac{2}{3}} * 2} \qquad ma = \frac{2000}{1225 * \sqrt{\frac{2}{3}} * 2} \qquad ma = 0.999$$

El índice de modulación varía de acuerdo con el voltaje del enlace Vdc.

Enlace Vdc

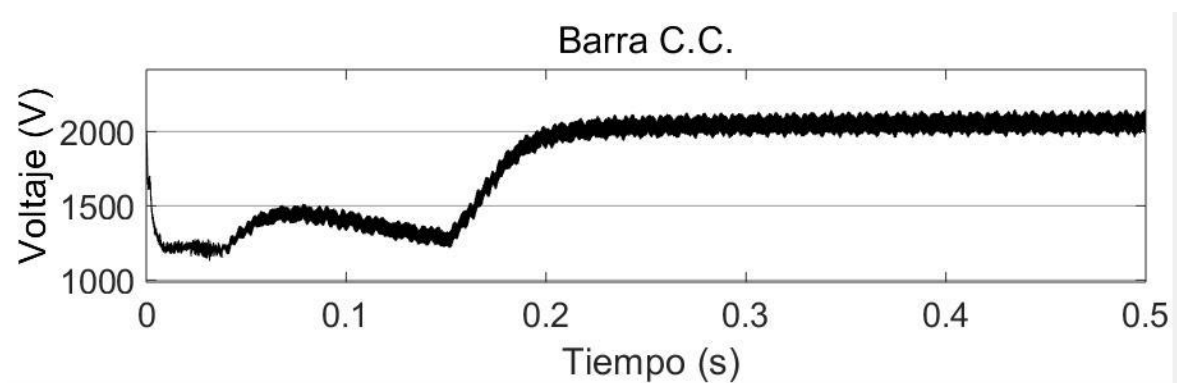


Figura 48. Señal de enlace del Vdc.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 48, se muestra la señal del enlace Vdc del back to back, el cual tiene un valor de referencia de 1155, y tienden a estabilizarse de acuerdo con el valor del Vdc anteriormente calculado de 2000 V, que llega cuando la índice modulación es 1.

Corriente: En la figura 49, se muestra las corrientes en el eje dq en el lado de red, que permite manipular por medio de los controladores PI, que son utilizadas en inner y outer loop respectivamente.

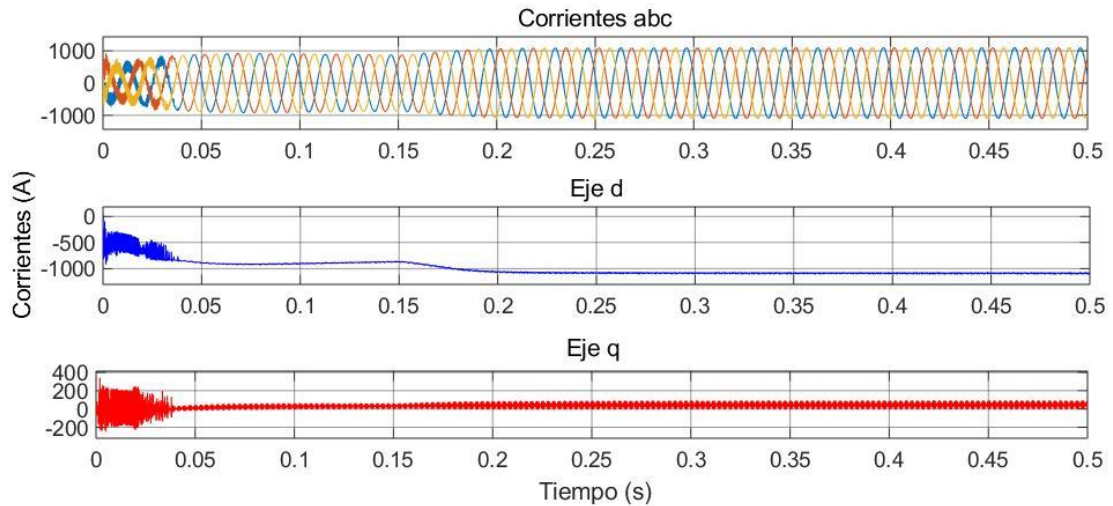


Figura 49. Señales de corriente abc a dq.

Realizado por: Los Autores.

El comportamiento de las señales de corriente en el eje dq, se deben al control desacoplado inner loop, la cual es descrita anteriormente y se puede detallar que el valor de $I_q=0$.

Voltajes: En la figura 50, se muestra los voltajes en el eje dq en el lado de red, que intervienen en conjunto con señales de las corrientes dq, en los controles inner y outer loop respectivamente.

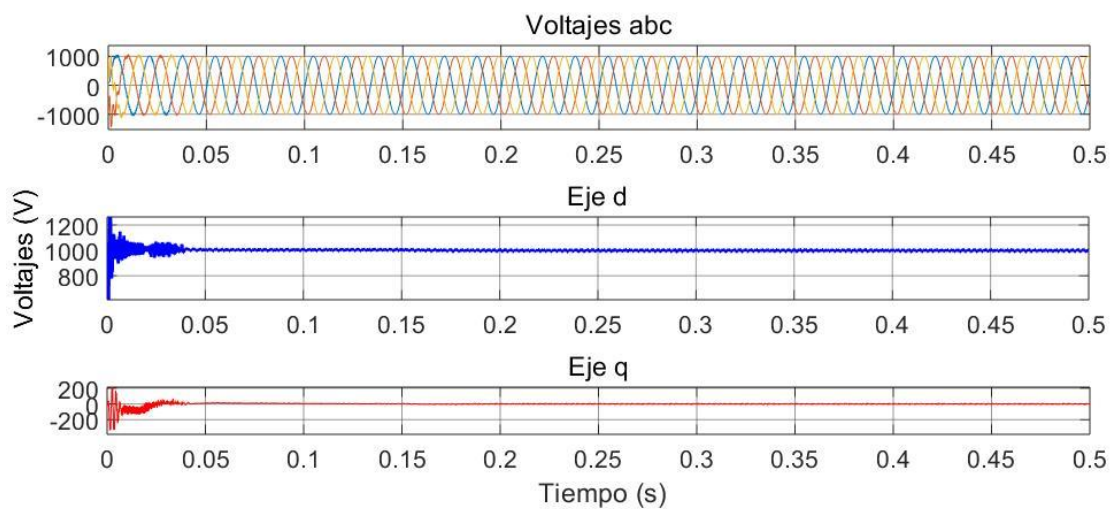


Figura 50. Señal voltaje abc a dq.

Realizado por: Los Autores.

Las señales de voltaje y corriente en el eje dq permiten calcular los valores de potencia activa y reactiva, considerando que la señal $I_q=0$ y además que la variable $V_q=0$ no se emplea para el cálculo mencionado anteriormente y por tal razón el valor de la potencia reactiva tiende a ser 0.

Potencia Activa y Reactiva

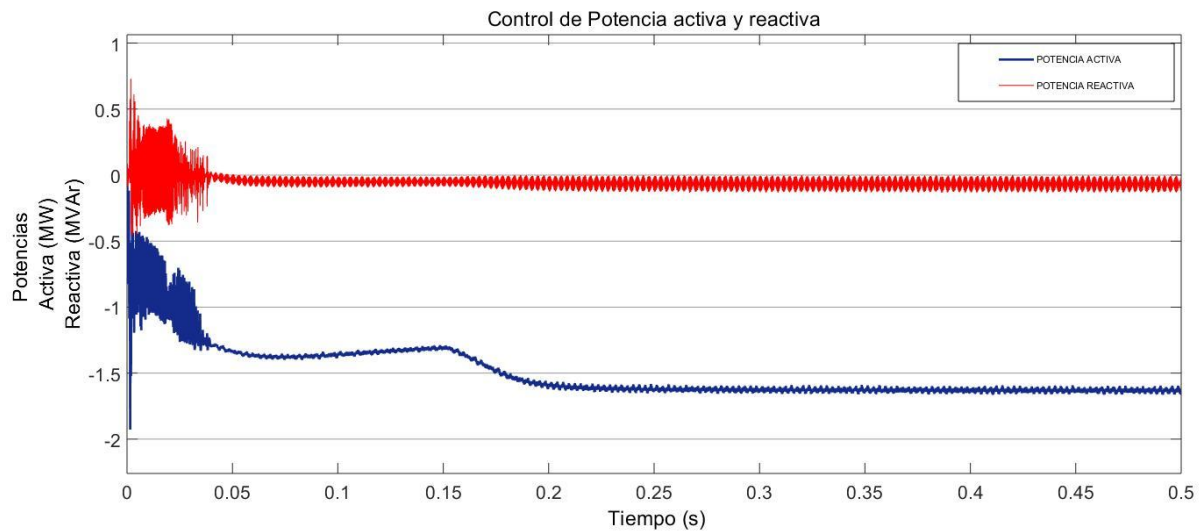


Figura 51. Señales de P. Activa (inferior) y Reactiva (superior).

Realizado por: Los Autores.

En la figura 51, se presenta los resultados de potencia activa con un valor de 1.7 MW aproximadamente, el signo (-) en la señal significa que está suministrando a la red como se muestra en la figura 11, mientras que la potencia reactiva es aproximadamente a 0, cumpliendo el código de red establecido en los Sistemas de Energía Eólica, al minimizar el valor de la potencia reactiva a 0, entregando a la red un factor de potencia es igual cercano a la unidad.

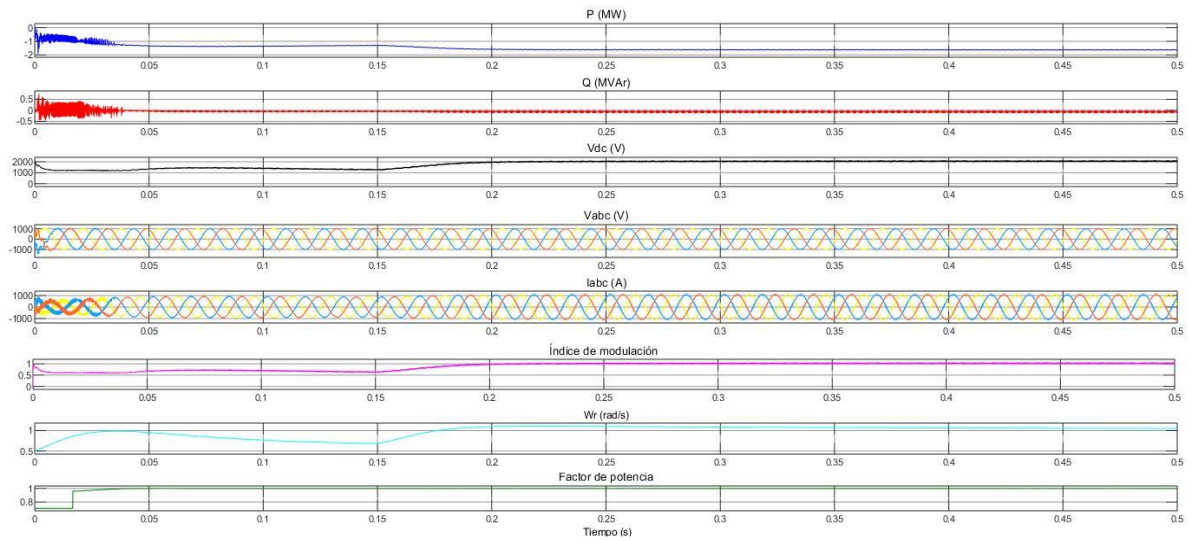


Figura 52. Señales obtenidas de la simulación propuesta.

Realizado por: Los Autores.

Armónicos

Al implementarse la etapa de la electrónica de potencia en la conversión de sistemas de energía eólica, se producen armónicos a la salida del inversor por la conmutación de los IGBT's, debido a que trabaja con un convertidor de fuente de voltaje y esta se ve afectado más en el voltaje que en la corriente como se puede visualizar en la figura 53 y 54.

La ventaja de utilizar la configuración tipo 4, es que elimina los armónicos de orden inferior, pero produce pérdidas de potencia en la salida del convertidor.

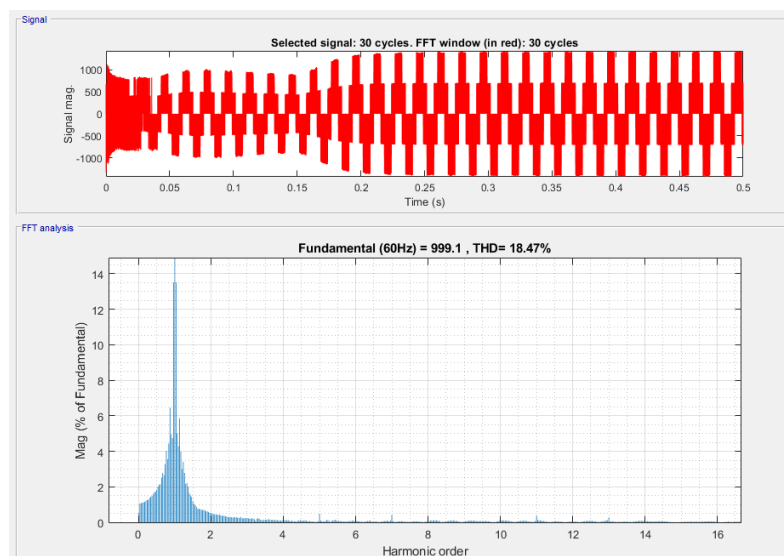
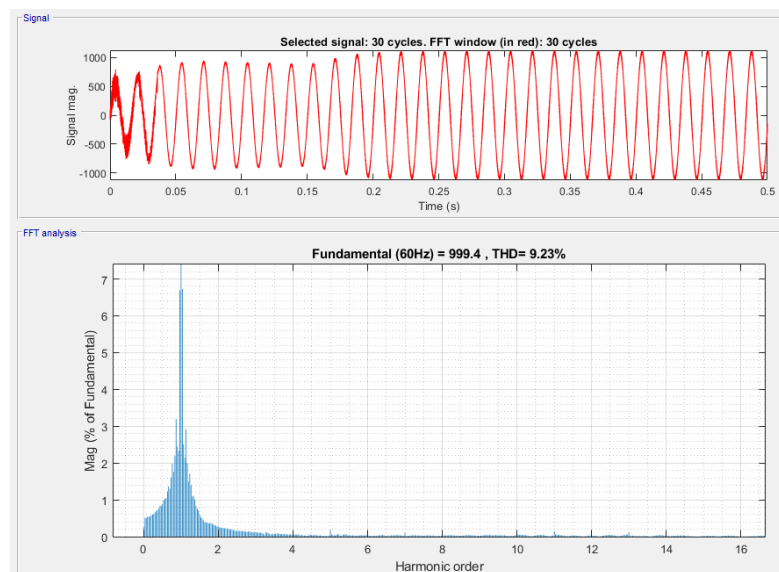


Figura 53. Porcentaje de armónicos del voltaje a la salida del inversor.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 53, se muestra mediante gráficas de barras los armónicos localizados en el voltaje a la salida del inversor, como se observa la distorsión armónica total es del 18.47 % y de acuerdo con la literatura científica los armónicos se encontrarían en el orden superior, también se observa que la onda de voltajes es cuadrada y que al momento de pasar por la línea de transmisión y el filtro capacitivo la distorsión armónica disminuye y por ende el voltaje es senoidal, para acoplarse a la barra infinita por medio de un transformador elevador, el cual elimina los armónicos restantes.

Figura 54. Porcentaje de armónicos de la corriente a la salida del inversor.



Realizado por: Los Autores.

En la figura 54, se muestra mediante gráficas de barras los armónicos localizados en la corriente a la salida del inversor, como se observa la distorsión armónica total es del 9.23 % y de acuerdo con la literatura científica los armónicos se encontrarían en el orden superior, además se considera que al pasar por la línea de transmisión y el transformador los armónicos se reducen, también se debe destacar que las corrientes no se ven afectadas por la conmutación de los IGBT's , debido a que los pulso son enviados por medio del voltaje.

Comportamiento de diferentes entradas

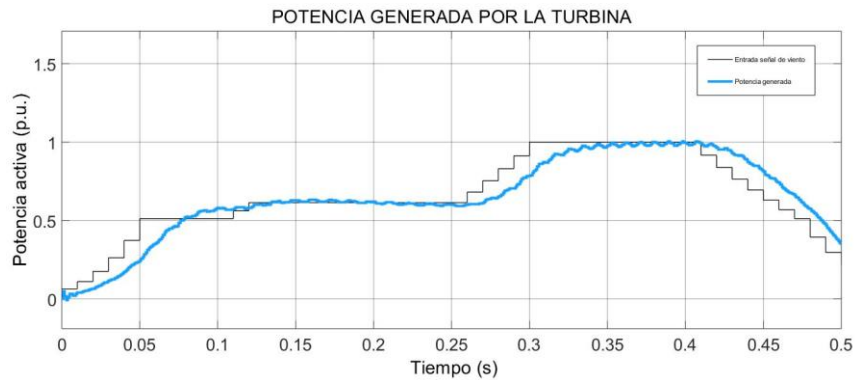


Figura 55. Entrada variable.

Realizado por: Los Autores.

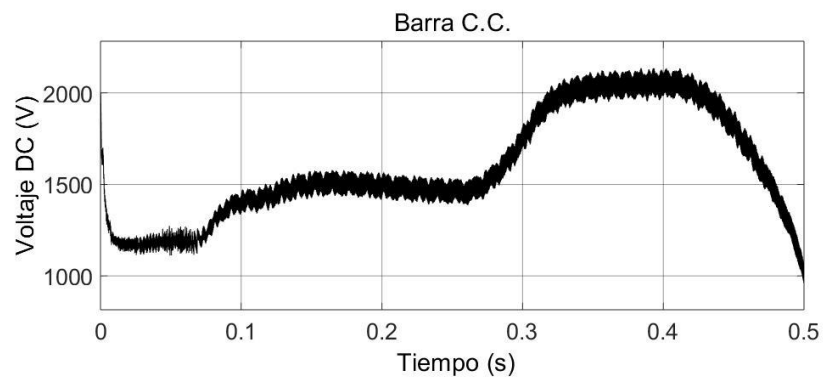


Figura 56. Comportamiento de la señal Vdc ante una entrada variable.

Realizado por: Los Autores.

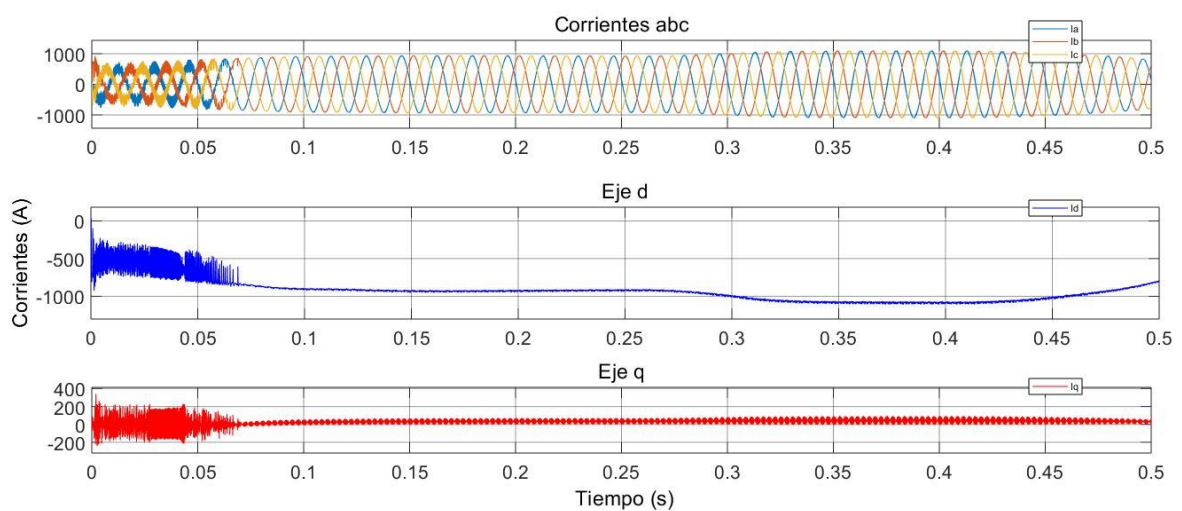


Figura 57. Comportamiento de las señales de corriente abc – dq ante la entrada variable.

Realizado por: Los Autores.

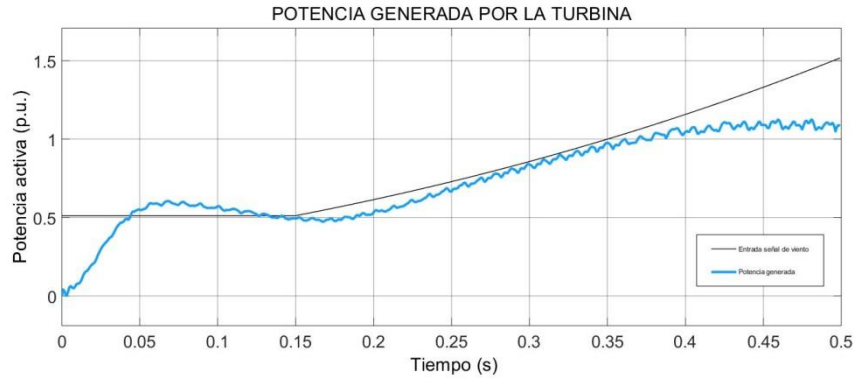


Figura 58. Entrada tipo rampa.

Realizado por: Los Autores.

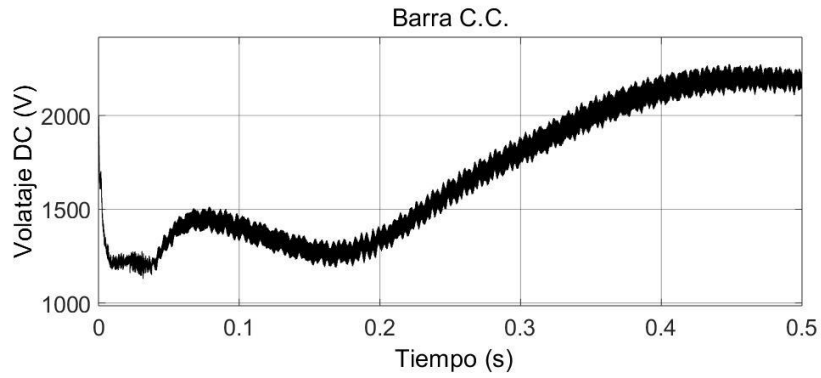


Figura 59. Comportamiento del Vdc ante una entrada rampa.

Realizado por: Los Autores.

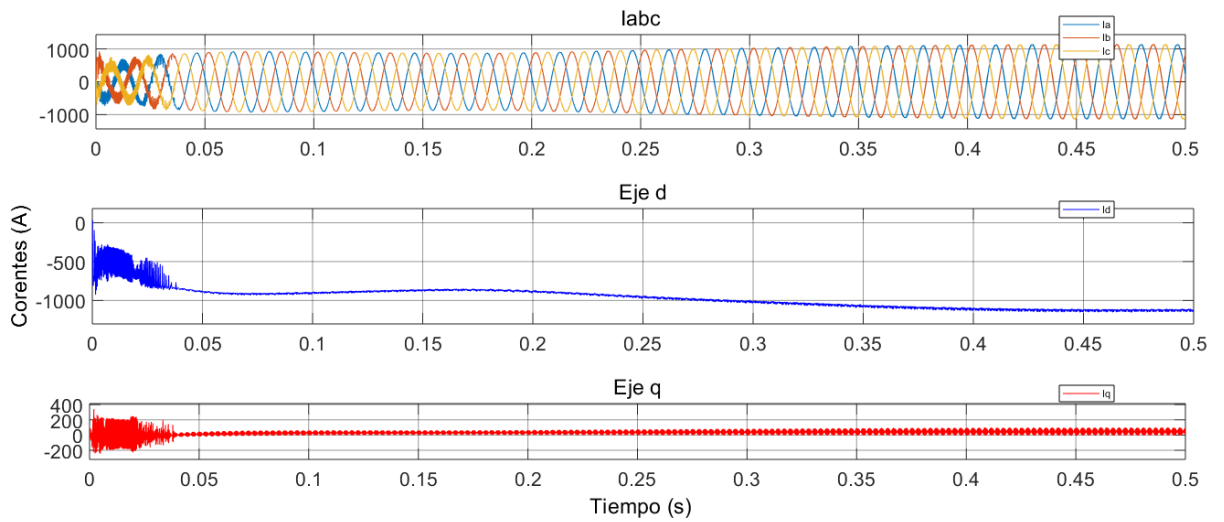


Figura 60. Comportamiento de las señales de corriente abc – dq ante la entrada rampa.

Realizado por: Los Autores.

Comparación entre la simulación realizada y el ejemplo propuesto en Matlab

A continuación, se presenta los valores obtenidos por la simulación realizada y contrastada con la simulación de ejemplo en Matlab “Power Wind Type 4”, la cual se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 21. Comparación de valores entre la simulación realizada y “Power Wind Type 4”.

	Esquema de Matlab Tipo 4	Esquema Propuesto	% error
P. Activa (MW)	1.866	1.678	11.20
P. Reactiva (MVA _r)	0.036	0.04	0.00
V _{dc} (V)	2000	2000	0.00
Factor de potencia	0.9	0.9	0.00

Realizado por: Los Autores.

Los valores dados por la tabla 21, expresa la potencia activa y reactiva contrastada entre la simulación realizada y la propuesta en 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 IGBT's, mientras que en el ejemplo de Matlab presenta un rectificador por medio de diodos e IGBT's.

Además, 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.

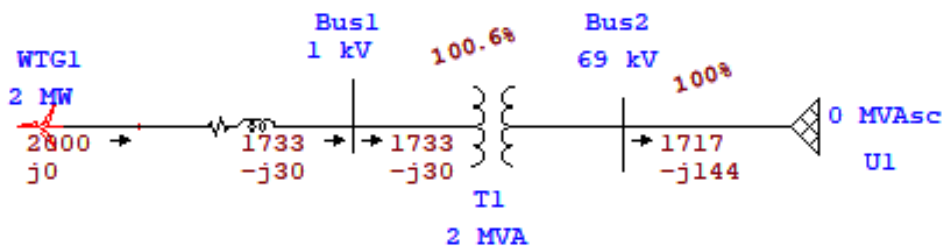


Figura 61. Flujo de potencia del aerogenerador.

Realizado por: Los Autores.

En la figura 61, 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% en potencia activa, mientras que en potencia reactiva es del 25%, 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.

IMPACTOS

Impactos Técnicos: Las energías alternativas exploradas en los últimos años han permitido un gran estudio en los recursos de la naturaleza y en conjunto con las formas o métodos de producción y generación de energía eléctrica a nivel mundial.

Por ello se ha considerado el aprovechamiento de la fuerza del viento que hacen girar las turbinas eólicas para la generación de electricidad, en la implementación de aerogeneradores existe ciertas configuraciones que se han sido aplicadas, una de ellas ha ido tomando gran fuerza la aplicación de generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG), por motivo de la gran conversión de energía eléctrica a velocidad variable, gracias a la etapa de la electrónica de potencia constituido por un back to back y métodos de control.

Impactos Ambientales: La implementación de turbinas eólicas para la generación de energía eléctrica ha ido tomando fuerza, esto ha permitido que las centrales convencionales no sean la mayor fuente de generación de electricidad y por ende se ha reducido el consumo de derivados del petróleo para dicha producción, además de minimizar el gran impacto ambiental.

Al canalizar la fuerza de viento que es inagotable, se está aportando al medio ambiente de forma directa, ya que se genera energía limpia.

Impactos Sociales: Al generar energía limpia a partir de la velocidad del viento, la sociedad se incentiva en cuidar el medio ambiente, cambiar el estilo de consumo y por ende concientizar en la aplicación de las energías alternativas.

12. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se presenta el estado de arte de la generación eólica, donde la máxima potencia mecánica generada se establece mediante el límite máximo de C_p y λ óptimo que puede entregar una turbina, además de la implementación de generadores síncronos y asíncronos para proveer de potencia activa por medio de diferentes topologías de control, para lo cual se estableció cuatro configuraciones las cuales cuentan con ventajas y desventajas para su implementación.

- Los modelos y configuraciones utilizados por el sistema de conversión de energía eólica (WECS), se optó por el tipo 4, debido a sus ventajas como flujo bidireccional entre un sistema de control back to back que controla la potencia activa y reactiva, mejora la calidad de energía suministrada y el cumplimiento de código de red.
- La configuración elegida se simuló mediante el software Simulink/Matlab y se realizó un control PLL, donde sincronizamos el ángulo de fase dado por la velocidad angular para mantener un voltaje y frecuencia cercano al nominal, además de ello implementamos un control INNER LOOP, capaz de modificar las corrientes de potencia activa y reactiva $dq0$ del sistema, conjuntamente con un control OUTER LOOP que aporta con señales de referencia V_{dq} , obtenida de la barra de corriente continua, de esta manera entregar a la salida del inversor la máxima cantidad de potencia entregada por aerogenerador cumpliendo el código de red.
- Los resultados arrojados por la simulación son similares a la literatura investigada, al controlar la potencia activa y reactiva, suministrando a la red la máxima cantidad de potencia generada y una potencia reactiva cercana a cero, además corroborando resultados a diferentes tipos de entrada, un ejemplo comparativo y el flujo de potencia en ETAP, como resultado un error de 11% y 3% en potencia activa, para la potencia reactiva un margen de error cercano al 0%.

RECOMENDACIONES

- Implementar otro tipo de configuración de la turbina eólica acorde al estudio que se vaya a realizar y de la misma forma un control, debido a que en esta investigación se tomó el bloque por defecto de Simulink, para la inclinación de la pala se consideró un ángulo de cero grados constante por lo tanto se recomienda realizar un control de pitch angle debido a que el viento no es constante.
- Utilizar otro tipo de configuración presentado en los sistemas de conversión de energía eólica (WECS) e implementar el mismo control y verificar los resultados si permanecen en valores iguales o diferentes a los simulados.
- Para estudios posteriores se recomienda utilizar otra plataforma de simulación virtual donde se pueda realizar el control de la potencia activa y reactiva del aerogenerador, además de implementar nuevos controladores más robustos encontrados por la literatura científica tanto en el lado del generador como en el lado de red.

- Al considerarse que, en la etapa de la electrónica de potencia implementada, la parte de corriente continua o Vdc se implementa convertidores por fuente de voltaje VSC, también se puede realizar con CSC llamados convertidores de fuente de corriente, además de implementar otros tipos de convertidores accionados por MOSFET's o BJT's.

13. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. C. & Mike H. Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, *Wind Energy Generation Modelling and Control*. 2009.
- [2] MEER, “Atlas Eólico,” 2013.
- [3] V. Narasimha and R. Yaramasu, “Control predictivo de los convertidores multinivel para MEGAWATT ENERGÍA EÓLICA,” 2014.
- [4] T. Industriales, “Modelado y control dinámico de un Aerogenerador,” UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, 2015.
- [5] R. a Bastianon, “Cálculo Y Diseño Para Turbinas Eólicas,” p. 48, 2008.
- [6] D. M. y V. R. MartinezvJesús, “Modelado y control de un aerogenerador en Matlab y Simulink,” Universidad Carlos III de Madrid, 2019.
- [7] Y. H. Han, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, vol. 21, no. 3–4. 2000.
- [8] The MathWorks, “Implement model of variable pitch wind turbine - Simulink.” 2016.
- [9] G. Terzano, “Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica,” 2010.
- [10] Z. N. & K. S. Wu Bin, Lang Yongqiang, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. Canada: Willey, 2011.
- [11] S. Sumathi, *Solar PV and Wind Energy Conversion Systems. Green Energy and Technology*. London: Springer, 2015.
- [12] W. M. Zubiaga, G. Abad, J. A. Barrena, S. Aurtenetxea, A. Cárcar, and O. Com, *Energy Transmission and Grid Integration of AC Offshore Wind Farms*. Croacia: IntTech, 2012.

- [13] M. Singh *et al.*, “Simulation for Wind Turbine Generators — With FAST and MATLAB-Simulink Modules Simulation for Wind Turbine Generators — With FAST and MATLAB-Simulink Modules,” no. April, 2014.
- [14] C. H. García-Sanz, Mario_ Houpis, *Wind energy systems _ control engineering design*. New York: Taylor & Francis Group, 2012.
- [15] A. H. Kasem Alaboudy, A. A. Daoud, S. S. Desouky, and A. A. Salem, “Converter controls and flicker study of PMSG-based grid connected wind turbines,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 75–91, 2013.
- [16] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. England: Willey.
- [17] C. J. Stephen, *Maquinas_electricas_tercera_edicion.pdf*. Graw Hill, 2000.
- [18] E. Volker, “Inversor Trifásico con IGT’S Aplicando Técnica PWM,” Universidad Politécnica Nacional, 2010.
- [19] C. Bajracharya, “Control of VSC-HVDC for wind power,” *Dep. Electr. Power Eng.*, vol. MSs Thesis, no. June, p. 75, 2008.
- [20] S. L. Sanjuan, “Voltage Oriented Control of Three - Phase Boost PWM Converters Voltage Oriented Control of Three - Phase Boost PWM Converters,” CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- [21] V. Gasca, “By : STABILITY ANALYSIS FOR SINGLE PHASE IN MICROGRIDS APPLICATIONS,” Universidad Tecnológica de Pereira, 2018.
- [22] C. P. & H. M. Anaya-Lara Olimpo, Jeckins Nicks, Ekanayake Janaka, *Offshore Wind Energy Generation*. Willey, 2014.
- [23] E. Mahersi, A. Khedher, and M. F. Mimouni, “The wind energy conversion system using pmsg controlled by vector control and smc strategies,” *Int. J. Renew. Energy Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 41–50, 2013.
- [24] R. P. M. Ángel, “Determinación de parámetros eléctricos en máquinas síncronas de polos salientes mediante método de elemento finito,” Instituto Politécnico Nacional, 2012.

14. ANEXOS

Anexo I: Ley de Betz

$$E_c = \frac{1}{2} * m * v^2$$

El flujo de volumen y de masa:

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) = \frac{1}{2} v^2 \frac{dm}{dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho A v$$

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

$$P = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3$$

$$A v = A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

La velocidad promedio del viento a través del área del rotor es el promedio de la velocidad del viento v_1 sin perturbar y la velocidad del viento v_2 después de su paso $(v_1 + v_2)/2$ se obtiene:

$$P = P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho A v \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) (v_1^2 - v_2^2)$$

La potencia del viento incidente sobre el rotor, a la que se denomina P_o :

$$P_o = \frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3$$

Se comparan los dos valores, se obtiene un C_p (Coeficiente de potencia):

$$\frac{P}{P_o} = C_p = \frac{1}{2} * \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) * \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v_2}{v_1} \right)$$

A este límite de potencia se lo conoce como C_p (coeficiente de potencia):

$$\frac{P}{P_o} = C_p < 0,59$$

Anexo II: Transformada de Clarke y Park

La transformación de las tensiones y corrientes medidas en el convertidor para su implementación en la estrategia de control está basada en las transformadas de Clarke en ejes estáticos “ $\alpha\beta\gamma$ ” y de Park en ejes dinámicos “dq0”.

Las ecuaciones presentan la Transformada de Clarke directa e inversa en coordenadas “ $\alpha\beta\gamma$ ”.

$$[T_{\alpha\beta\gamma}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

$$[T_{\alpha\beta\gamma}]^{-1} = [T_{\alpha\beta\gamma}]^T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

La transformada de Park, está basada en la proyección de los valores de tensión y corriente de referencia en los ejes $\alpha\beta\gamma$ y transformándolos en un eje dinámico cuyo ángulo de referencia corresponde al ángulo de fase de las tensiones y corrientes de la red.

$$[T_{dq0}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[T_{\theta}] = [T_{dq0}][T_{\alpha\beta\gamma}]$$

Teniendo así que la matriz de transformación de Clarke estará dada por:

$$[T_{\theta}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Las ecuaciones expresan las corrientes y tensiones en el sistema de coordenadas dq0.

$$[\bar{V}_{dq0}] = [T_\theta][\bar{V}_{abc}]$$

$$[\bar{I}_{dq0}] = [T_\theta][\bar{I}_{abc}]$$

Se expresan las corrientes y tensiones, para un sistema trifásico, obtenidas a partir de las corrientes y tensiones en el sistema de coordenadas dq0.

$$[\bar{V}_{abc}] = [T_\theta]^T [\bar{V}_{dq0}]$$

$$[\bar{I}_{abc}] = [T_\theta][\bar{I}_{dq0}]$$

Estas dos ecuaciones nos permiten calcular la potencia activa y reactiva instantánea.

$$P = V_d * i_d + V_q * i_q$$

$$Q = V_q * i_d - V_d * i_q$$

Durante el funcionamiento en estado estable balanceado, la tensión en “dq0” (Vd y Vq) se puede considerar constante, por lo cual se asume Vq igual a cero y Vd igual a la tensión de referencia. Esto permitirá reescribir las ecuaciones de la siguiente manera.

$$P = V_d * i_d$$

$$Q = -V_d * i_q$$

Por lo que es posible controlar de manera independiente la potencia activa y reactiva o la potencia reactiva y la tensión en el DC-link.

Para el control de los sistemas de energía eólica, el sistema de referencia síncrono es a menudo usado. En este caso, la velocidad de rotación del marco de referencia arbitrario ω se ajusta a la velocidad sincrónica. velocidad (os de un generador de inducción o síncrono, dado por

$$\omega_s = 2\pi f_s$$

Donde

F es la frecuencia del estator en Hertz.

El ángulo θ se puede encontrar en:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_s(t) dt + \theta_0$$

Donde

θ_0 : es la posición angular inicial.

Anexo III: Modelado de la Máquina Síncrona de Imanes Permanentes

Ecuaciones de voltaje

$$V_q = R_s I_q + \omega_r \lambda_d + \rho \lambda_q$$

$$V_d = R_s I_d - \omega_r \lambda_q + \rho \lambda_d$$

Enlaces de flujo

$$\lambda_d = L_q i_q$$

$$\lambda_q = L_d i_d + \lambda_f$$

Sustituyendo las ecuaciones del flujo en las ecuaciones del voltaje

$$V_q = R_s I_q + \omega_r (L_d i_d + \lambda_f) + \rho L_q i_q$$

$$V_d = R_s I_d - \omega_r L_q i_q + \rho (L_d i_d + \lambda_f)$$

En forma de matriz

$$\begin{pmatrix} V_q \\ V_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + \rho L_q & \omega_r L_q \\ -\omega_r L_q & R_s + \rho L_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q \\ i_d \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \omega_r \lambda_f \\ \rho \lambda_f \end{pmatrix}$$

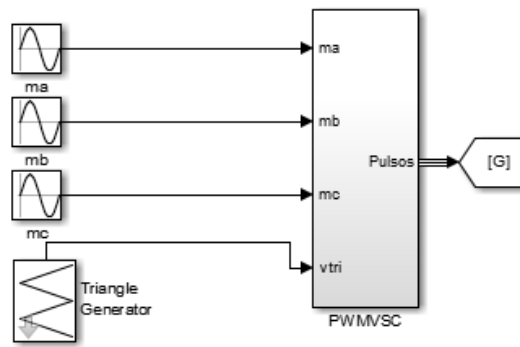
Torque de la máquina

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d)$$

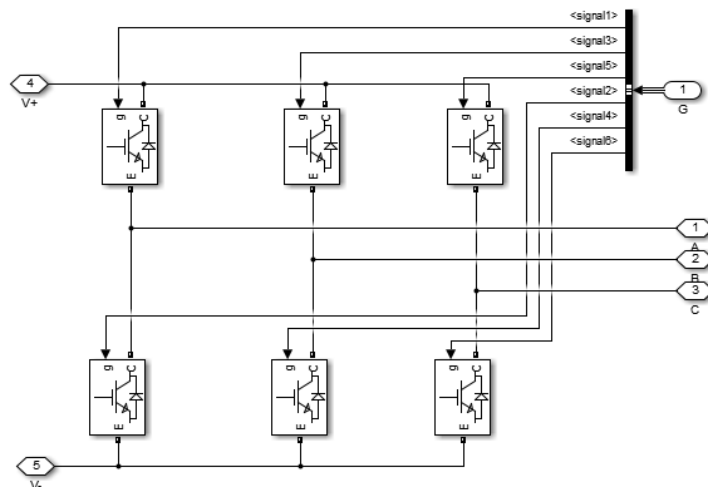
Velocidad mecánica

$$\omega_m = \omega_r \left(\frac{2}{P} \right)$$

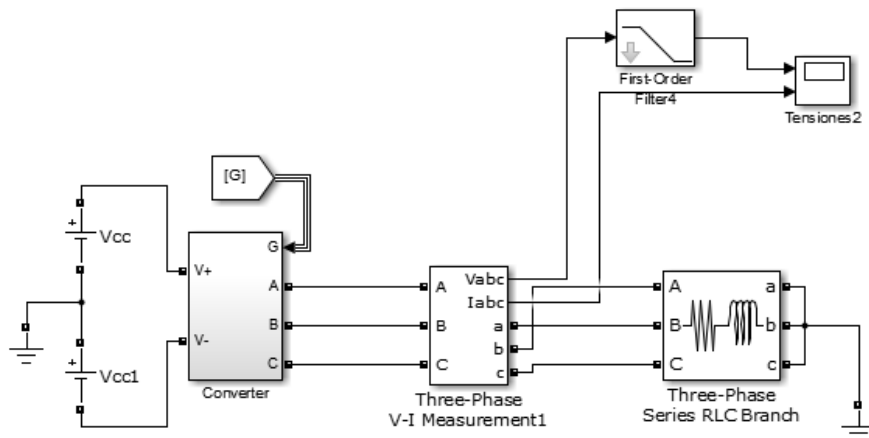
Anexo IV: Generador de pulsos



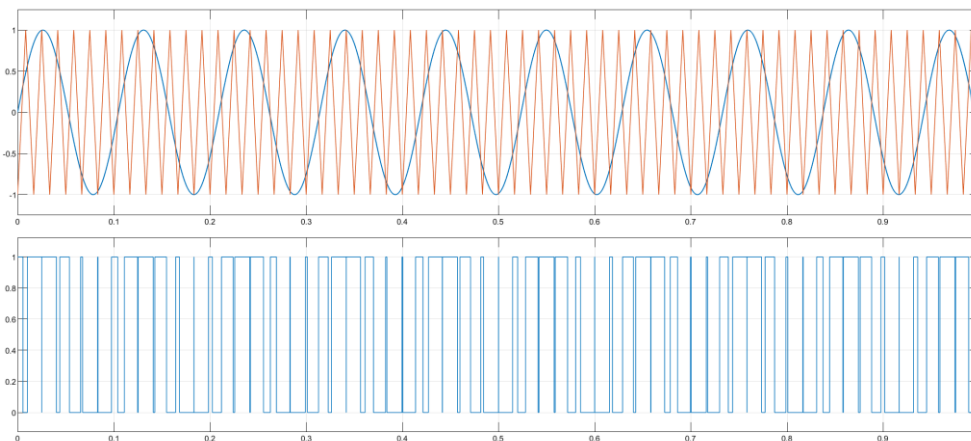
Anexo V: Modelo de conmutación de los IGBT's.



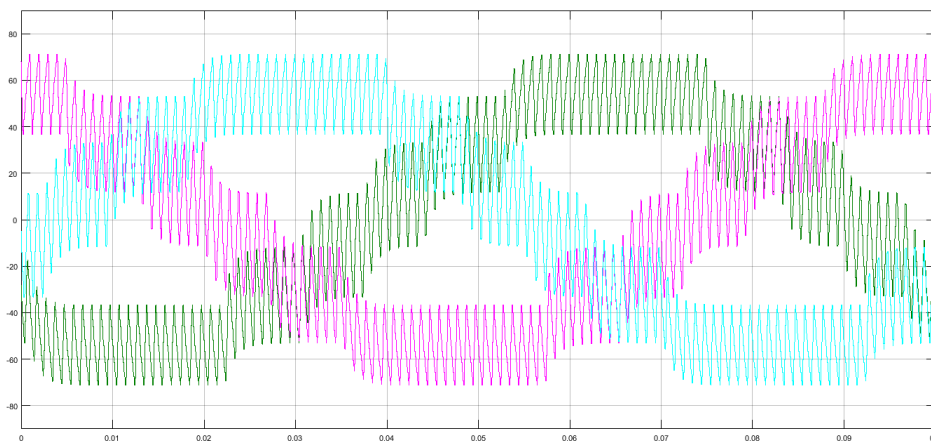
Anexo VI: Convertidor en el lado de red.



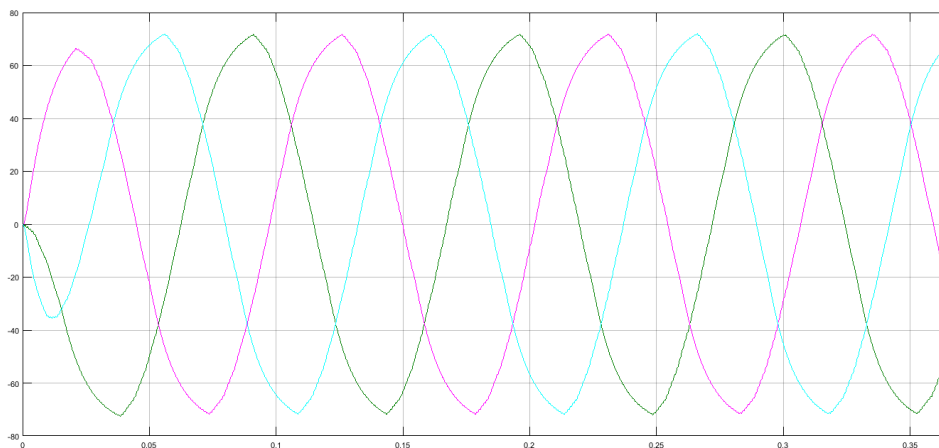
Anexo VII: Señal moduladora, portadora y pulso.



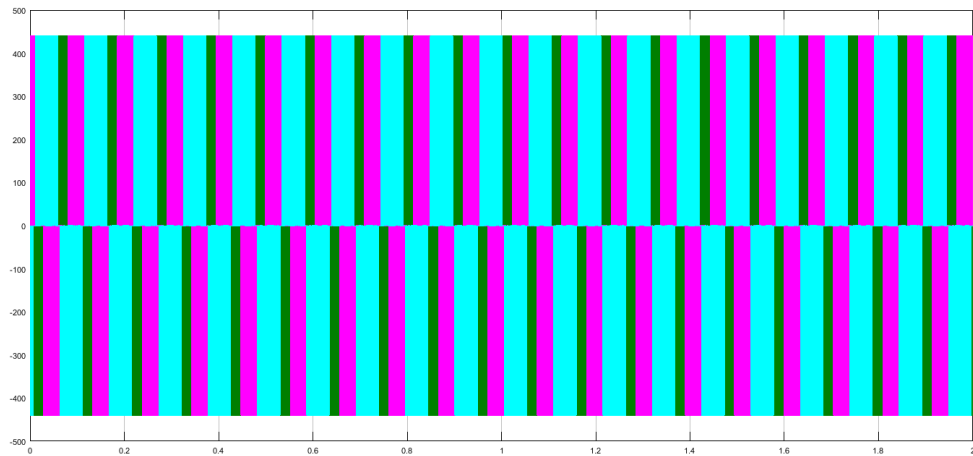
Anexo VIII: Corriente línea a línea sin filtro.



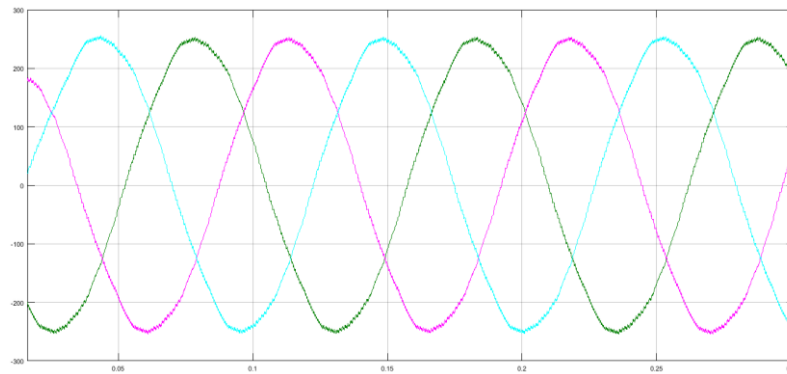
Anexo IX: Corriente línea a línea con filtro.



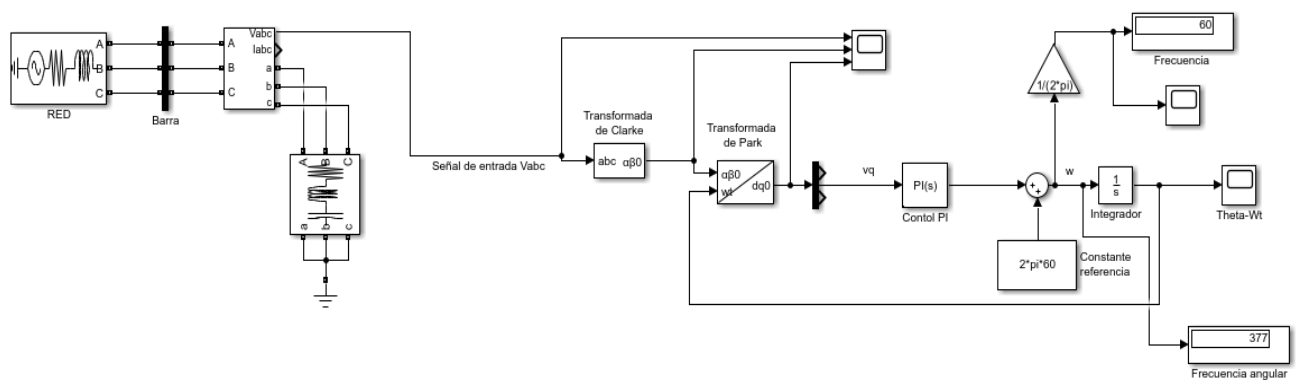
Anexo X: Voltajes línea a línea sin filtro



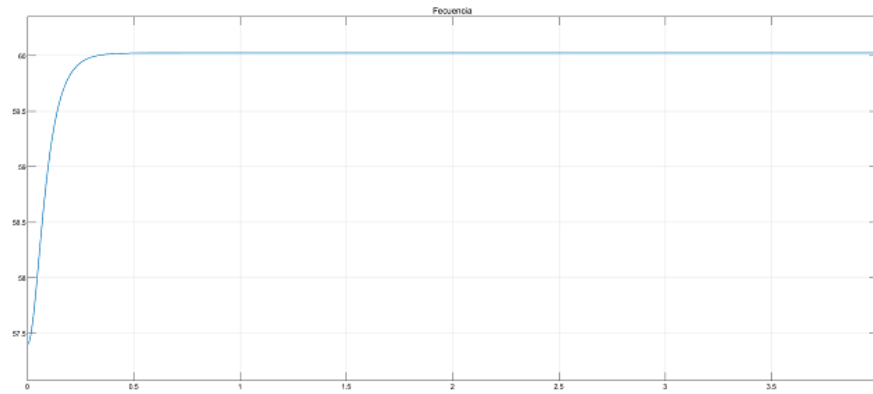
Anexo XI: Voltajes línea a línea con filtro.



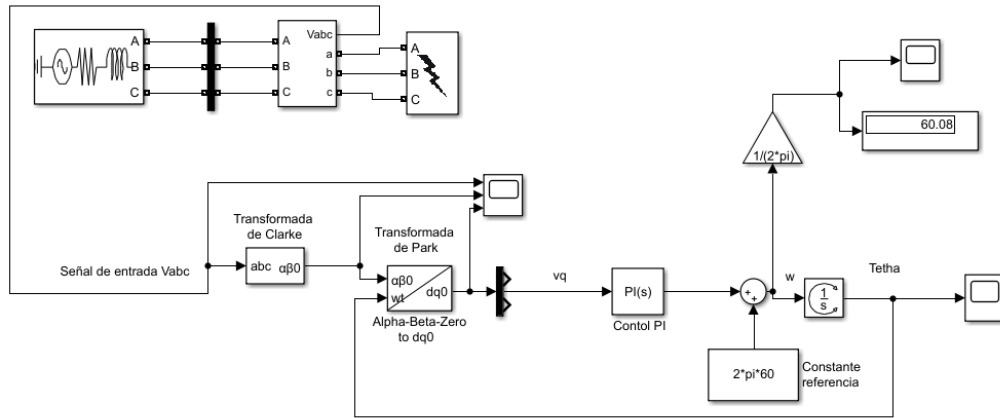
Anexo XII: Simulación del control PLL sincronizado con la red.



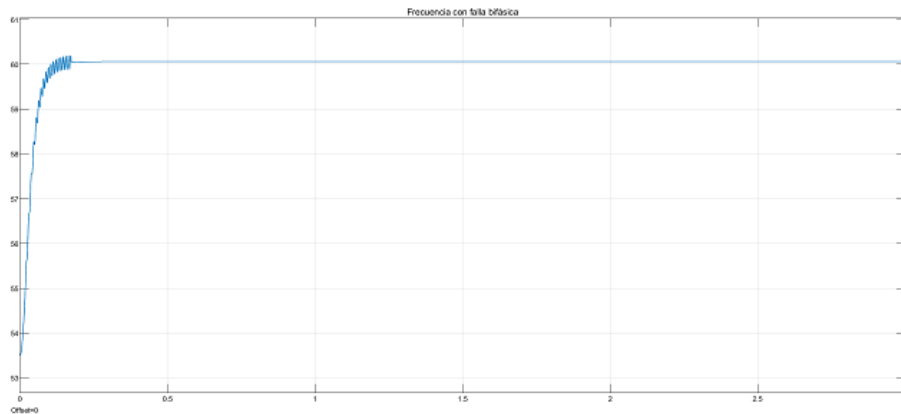
Anexo XIII: Frecuencia estable a valor de 60 Hz.



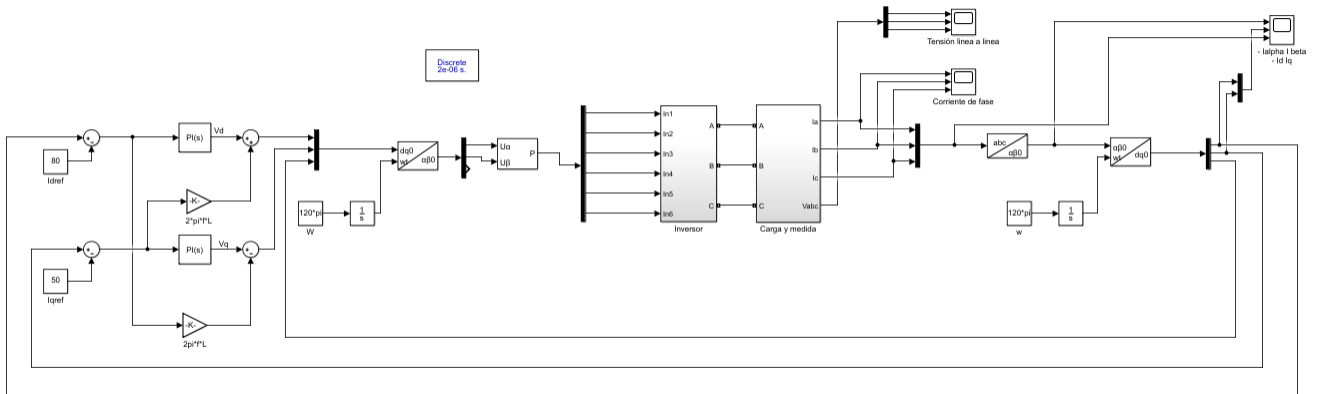
Anexo XIV: Control PLL frente a una falla del sistema.



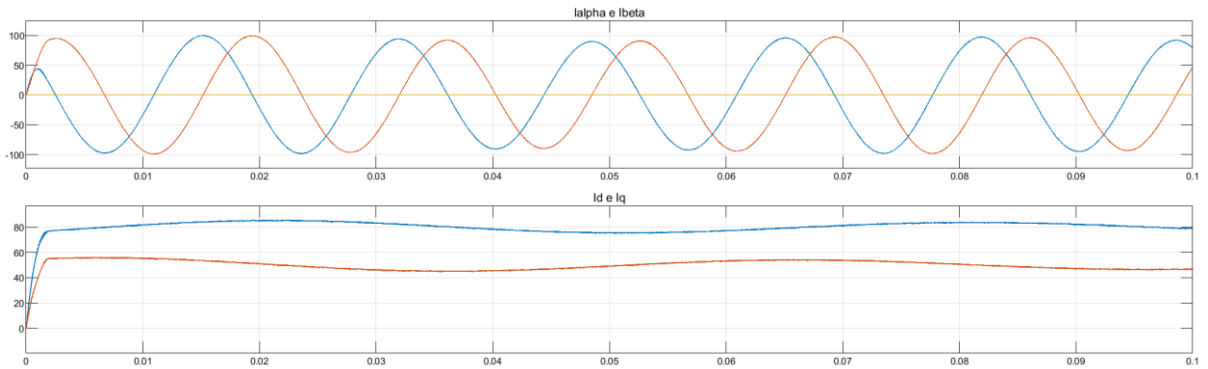
Anexo XV: Frecuencia con perturbaciones al margen de 60 Hz.



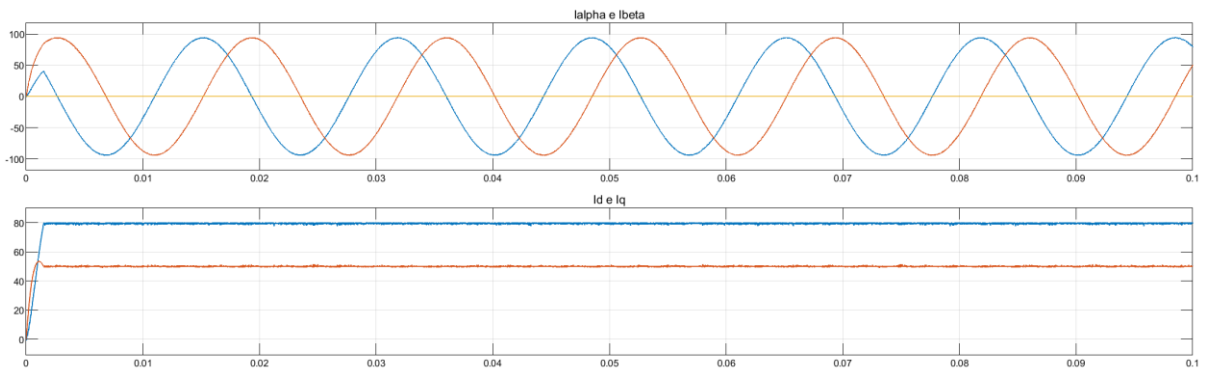
Anexo XVI: Esquema de simulación del control inner loop.



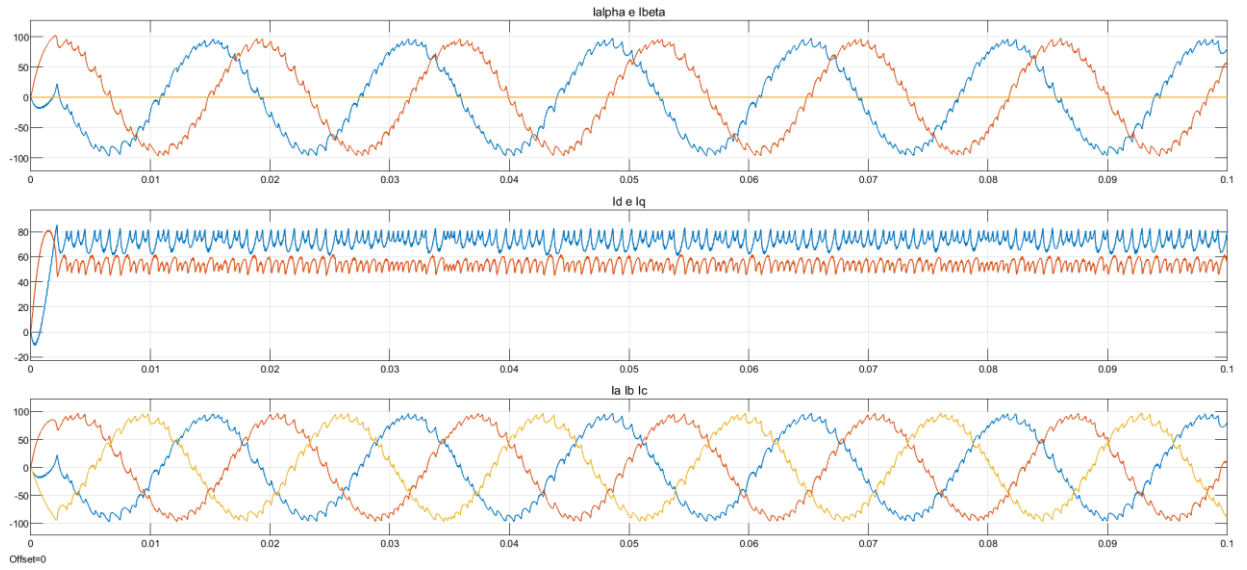
Anexo XVII: Corrientes I_{α} I_{β} e I_0 (superior), corrientes en $0dq$ (inferior). Comportamiento del sistema para valores de $K_p=0.1$ y $K_i=200$



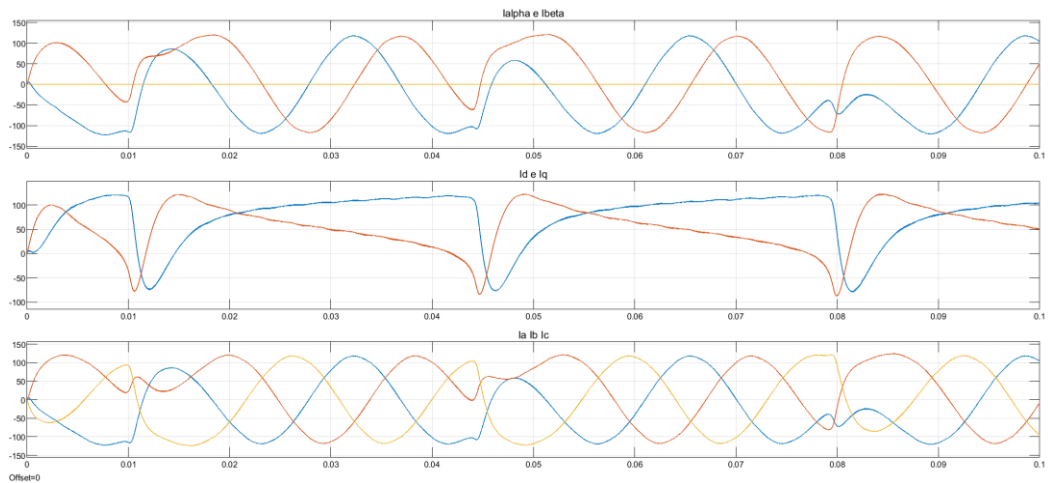
Anexo XVIII: Comportamiento del sistema para valores de $K_p=2$ y $K_i=2$.



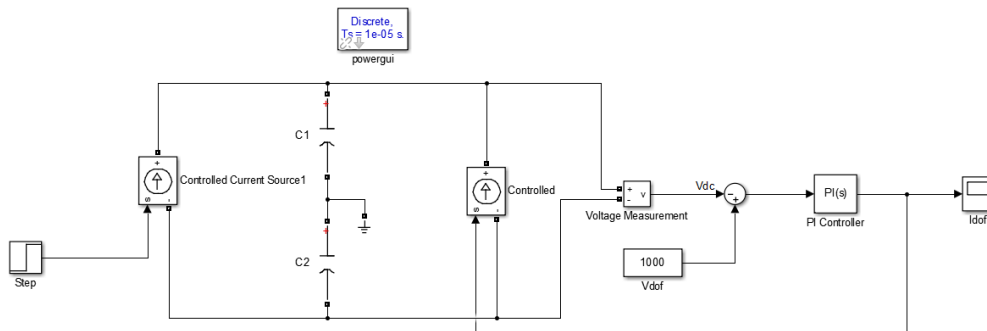
Anexo XIX: Comportamiento del sistema para valores de $K_p=200$ y $K_i=2$.



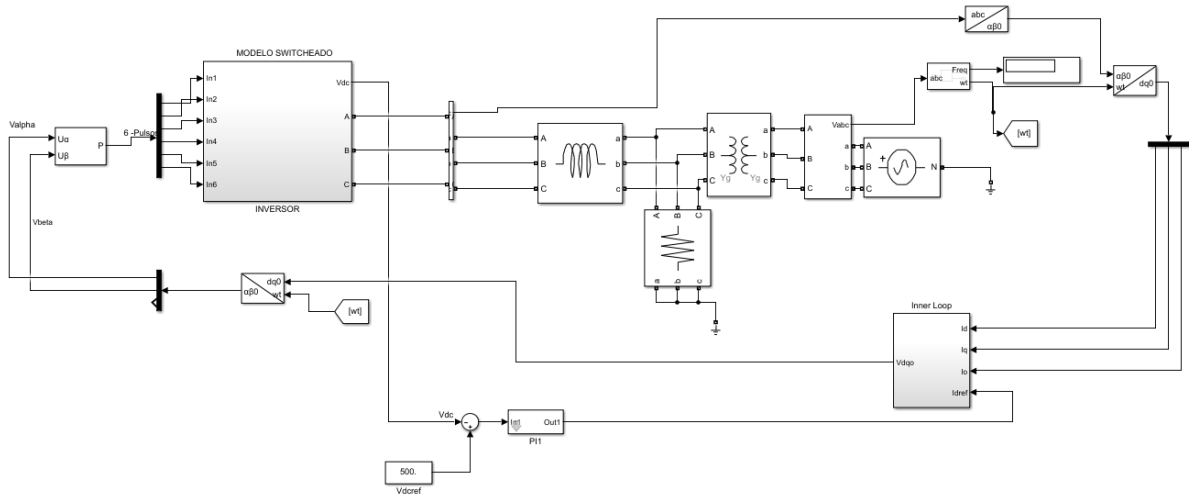
Anexo XX: Comportamiento del sistema para valores de $K=0.0002$ y $K_i=20000$



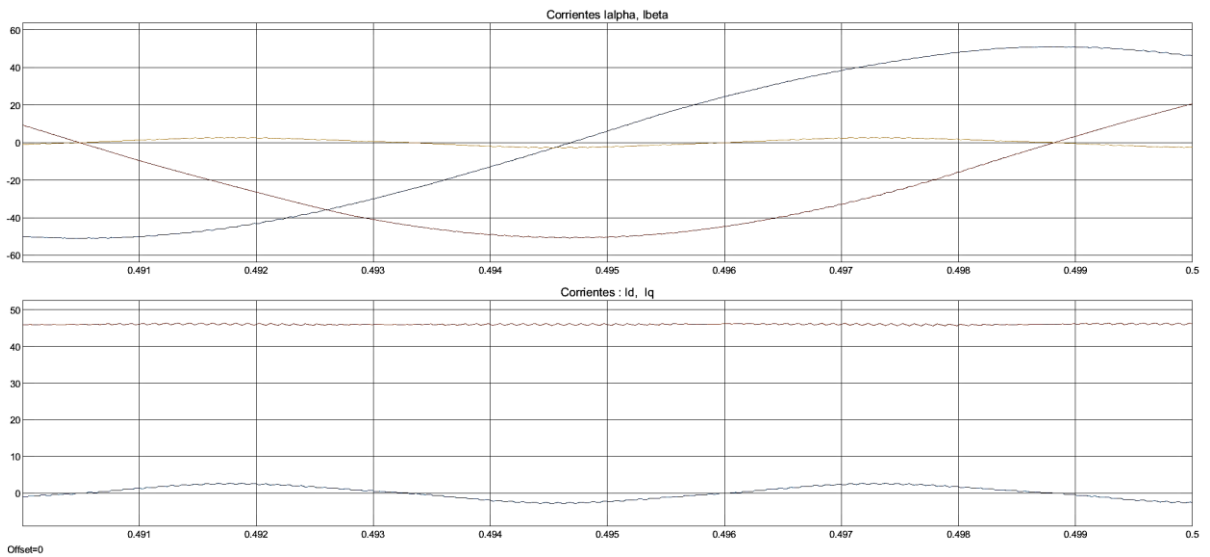
Anexo XXI: Esquema de control outer loop.



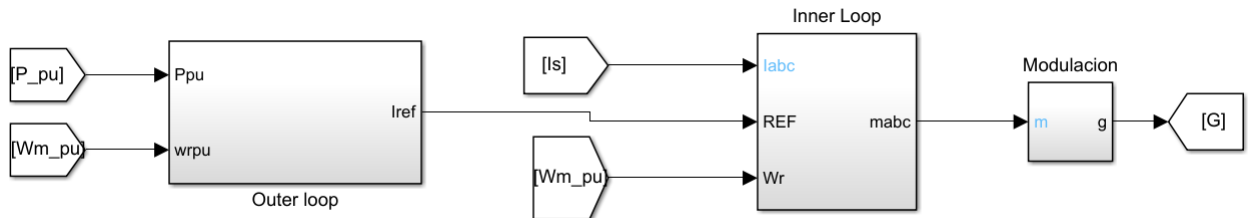
Anexo XXII: Esquema de control outer loop acoplado al convertidor e inner loop.



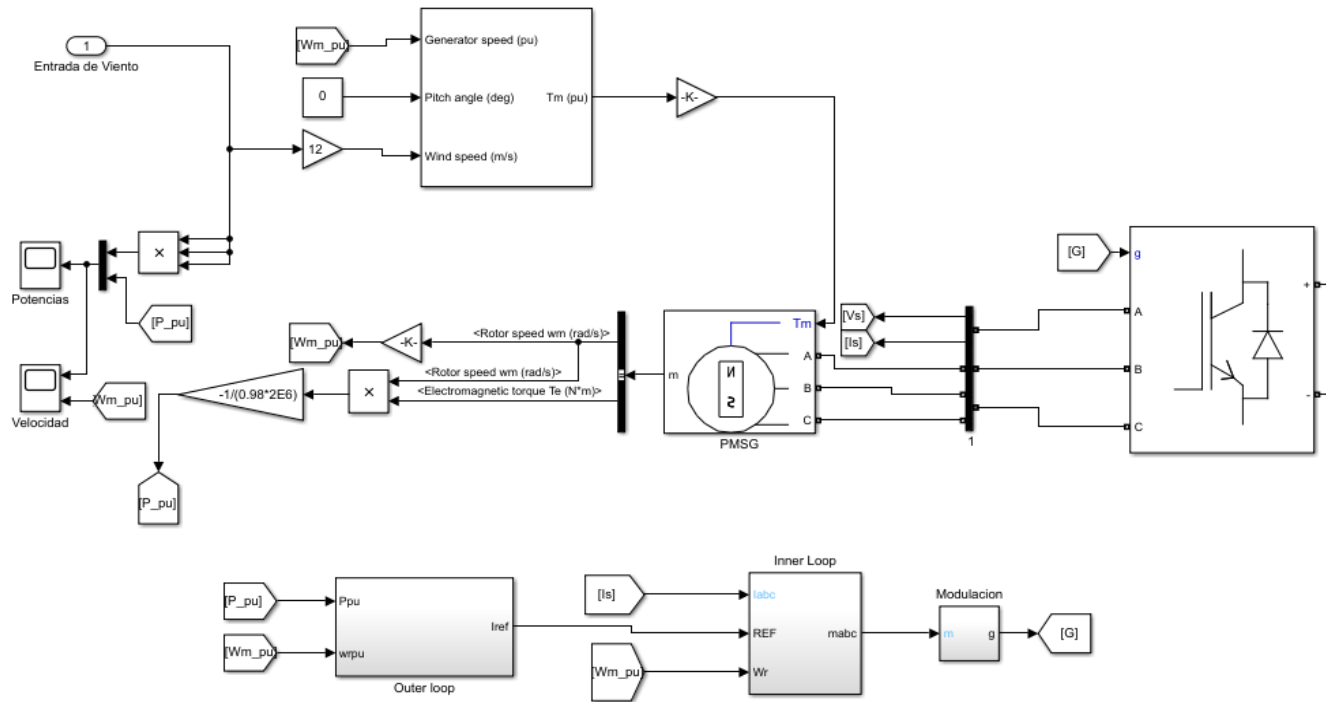
Anexo XXIII: Respuesta Corrientes Ialpha Ibeta e I0, corrientes en dq con Outer Loop.



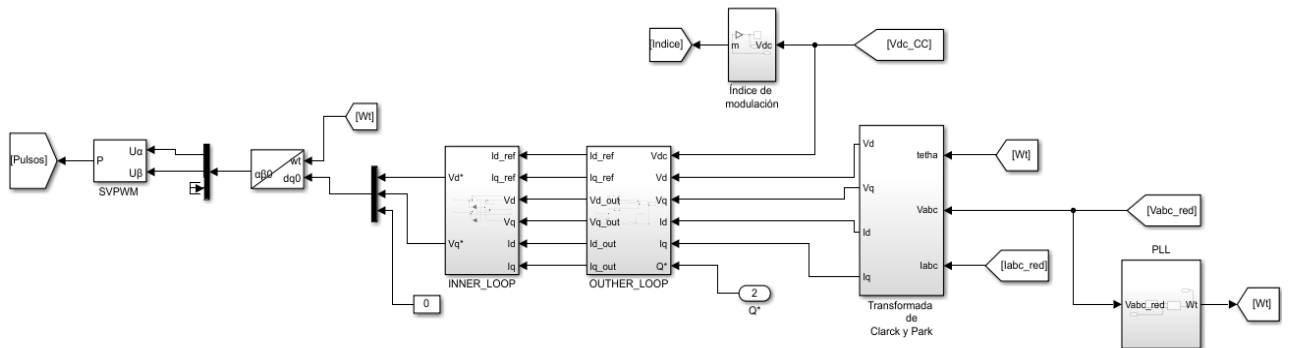
Anexo XXIV: Esquema de simulacion Inner y Outer loop lado de generacion.



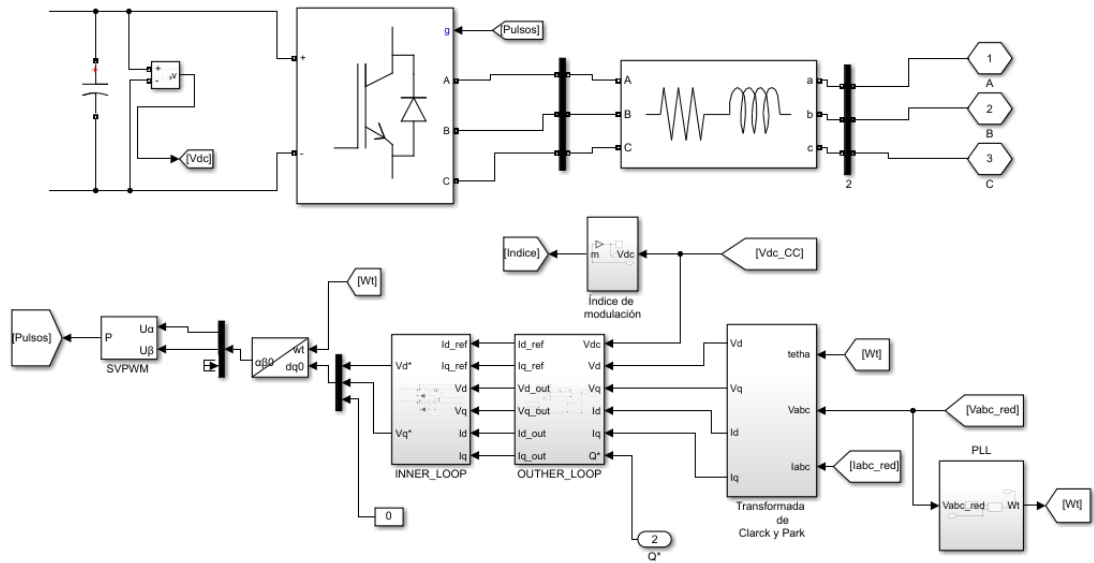
Anexo XXV: Esquema de generación acoplado los controles.



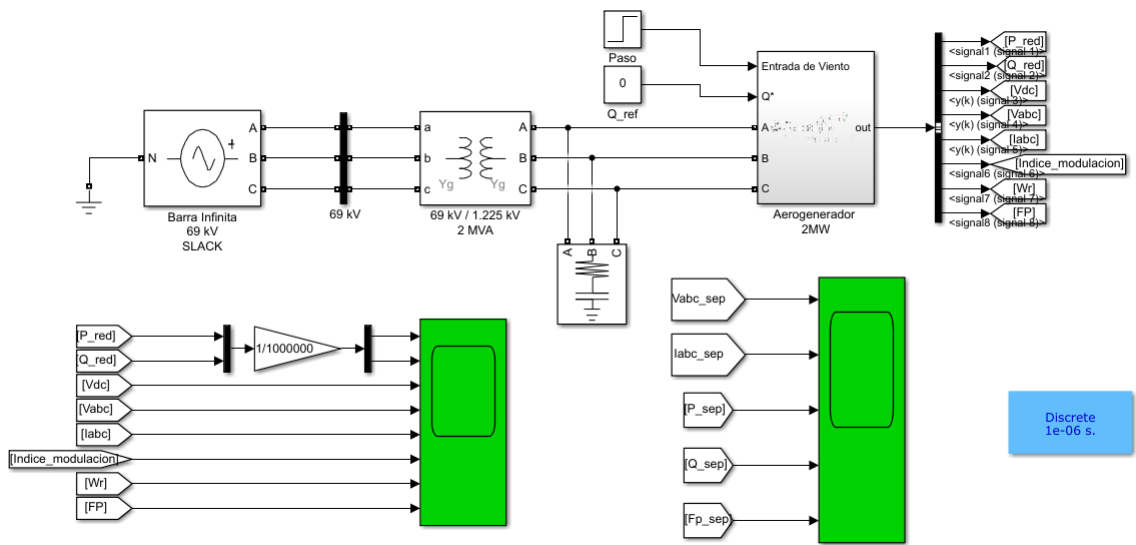
Anexo XXVI: Esquema de simulación Inner, Outer y PLL en el lado de red.



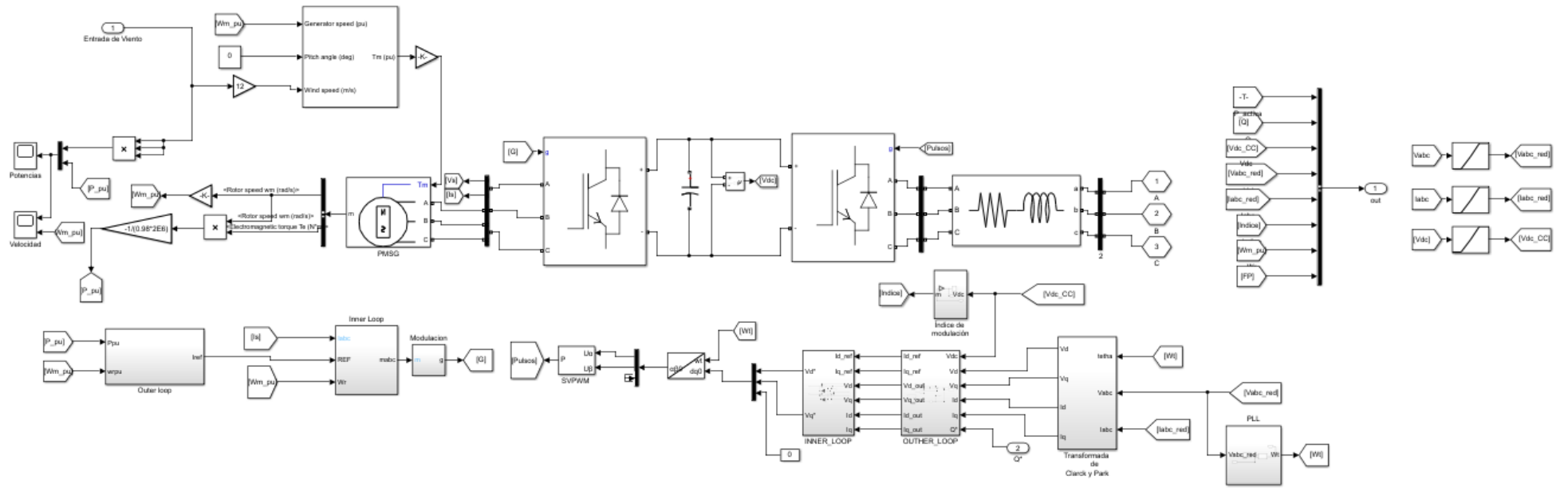
Anexo XXVII: Esquema de la red acoplado los controles.



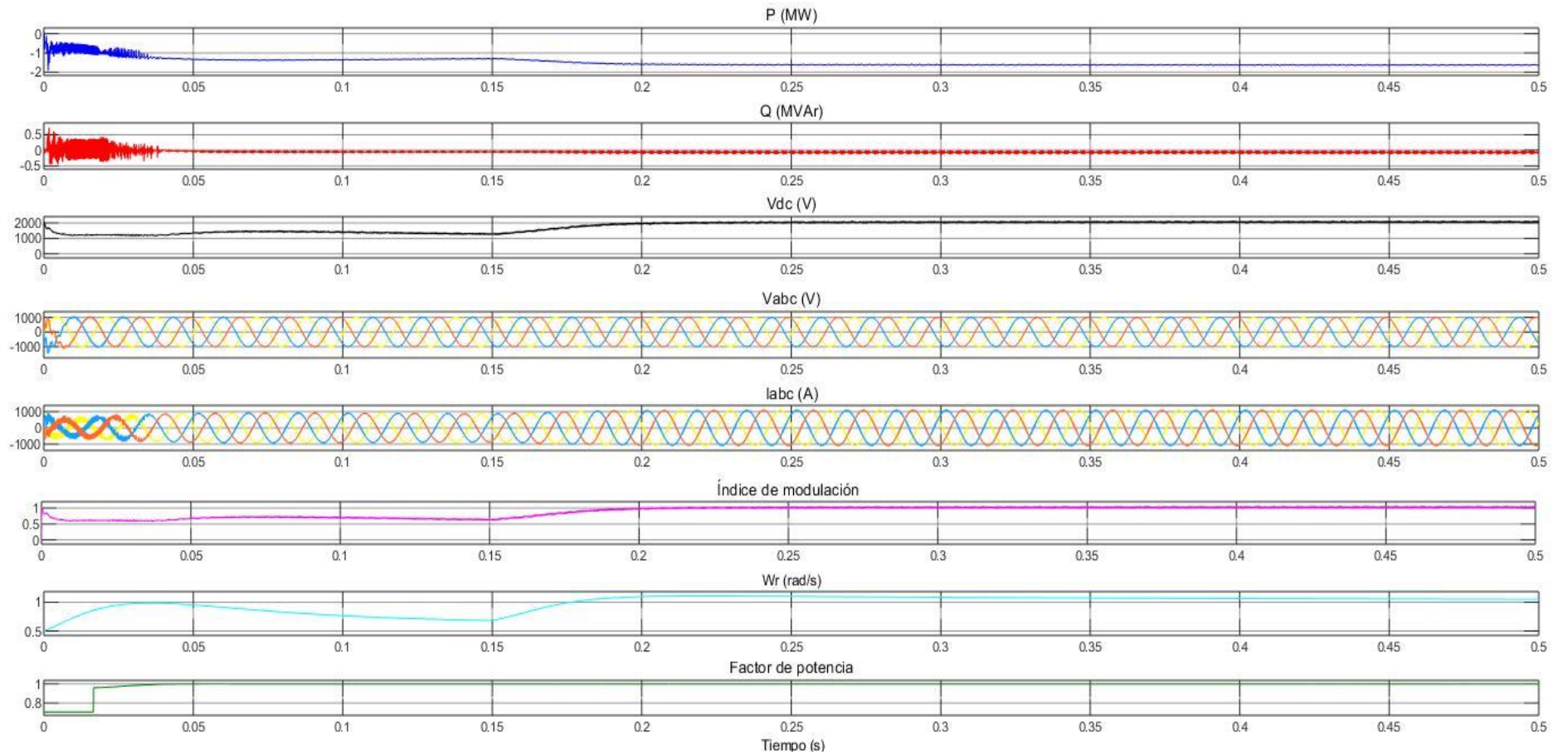
Anexo XXVIII: Esquema integrado el lado de generación y de red vista externa.



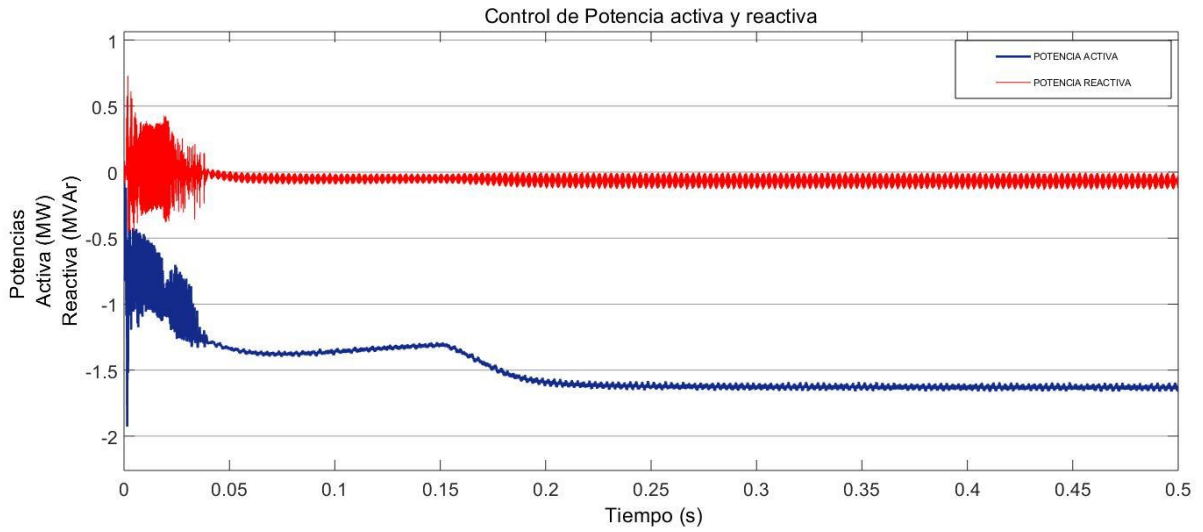
Anexo IXX: Esquema integrado el lado de generación y de red vista interna.



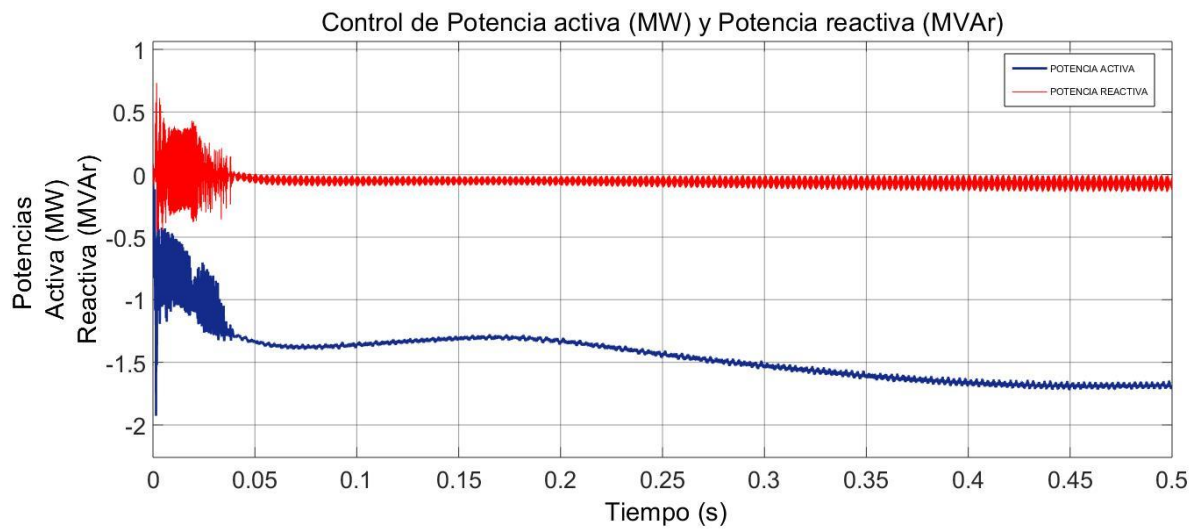
Anexo XXX: Resultados obtenidos por la simulación propuesta.



Anexo XXXI: Comportamiento de la potencia activa y reactiva ante una entrada escalón.



Anexo XXXII: Comportamiento de la potencia activa y reactiva ante una entrada rampa.



Anexo XXXIII: Comportamiento de la potencia activa y reactiva ante una entrada variable.

