

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE ESQUEMAS NO LINEALES DE CONTROL PARA EL SUMINISTRO DE POTENCIA Y ESTABILIZACIÓN DE VOLTAJE DC EN UN AEROGENERADOR OPERANDO EN UNA MICRORED

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
MAGISTER EN ELECTRICIDAD MENCIÓN REDES INTELIGENTES**

PABLO ANDRÉS PROAÑO CHAMORRO

pablo.proano@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. ING. PAÚL MARCELO POZO PALMA

marcelo.pozo@epn.edu.ec

CODIRECTOR: DR. ING. CARLOS FABIÁN GALLARDO QUINGATUÑA

carlos.gallardo@epn.edu.ec

Quito, agosto 2020

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Pablo Andrés Proaño Chamorro, bajo nuestra supervisión.



Dr.-Ing. Paul Marcelo Pozo Palma
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

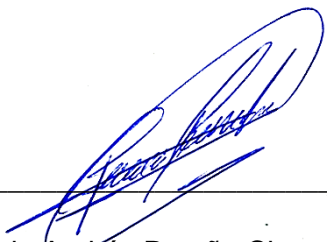


Dr.-Ing. Carlos Fabián Gallardo Quingatuña
CODIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Pablo Andrés Proaño Chamorro, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación -COESC, soy titular de la obra en mención y otorgo una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional. Entregaré toda la información técnica pertinente. En el caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



Pablo Andrés Proaño Chamorro

AGRADECIMIENTO

A mi familia, a mis maestros, a mis grandes amigos y a mi chiquita.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a los profesionales ávidos de conocimiento que encuentren en este proyecto un soporte para su formación y espero así contribuir al desarrollo científico y energético de la sociedad ecuatoriana.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
AGRADECIMIENTO.....	III
DEDICATORIA.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Alcance.....	2
1.3 Marco Teórico.....	3
1.3.1 Aerogeneradores.....	3
1.3.2 Control Proporcional Integral Derivativo.....	10
1.3.3 Control por Modos Deslizantes.....	12
1.3.4 librería Simscape Electrical™ - Matlab®.....	16
2 METODOLGÍA.....	17
2.1 Descripción de la metodología usada	17
2.2 Sistema de Pruebas	19
2.2.1 Configuración del Sistema Eléctrico de Potencia.....	19
2.2.2 Configuración del convertor AC-AC implementado	23
2.2.3 Descripción de la simulación	24
2.3 Estructura del Controlador	25
2.3.1 Estructuras de control para la Fase 1:	25
2.3.2 Estructuras de control para la Fase 2:	27
2.4 Ecuaciones de control propuestas	29
2.4.1 Controlador con estructura SMC.....	29

2.4.2	Controlador con estructura PID	35
2.5	Método de sintonización de los controladores	37
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1	Respuesta de Potencia (FASE 1)	43
3.2	Control de la corriente del Inversor (FASE 1).....	44
3.2.1	Resultados del algoritmo de optimización.....	45
3.2.2	Respuesta de los controladores de Corriente	45
3.3	Control de voltaje de enlace DC (FASE 1).....	49
3.3.1	Resultados del algoritmo de optimización.....	49
3.3.2	Respuesta del controlador de Voltaje DC	49
3.4	Control de Corriente del enlace DC (FASE 2).....	51
3.4.1	Respuesta del Controlador de Corriente DC.....	53
3.5	Control de potencia Activa (FASE 2).....	55
3.5.1	Resultados del algoritmo de optimización.....	55
3.5.2	Respuesta de los controladores.....	55
4	PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
4.1	Pruebas Comparativas con controladores lineales	60
4.1.1	Comparación del controlador de corriente	60
4.1.2	Comparación del controlador de voltaje DC.....	63
4.1.3	Desempeño del control de voltaje ante perturbaciones.....	64
4.2	Pruebas para diferentes perfiles de viento.....	66
4.2.1	Caso 1: Velocidad de Viento Suficiente para Suplir la demanda.....	67
4.2.2	Caso 2: Velocidad de Viento no Suficiente para el suministro de Potencia.....	68
4.2.3	Caso 3: Velocidad de Viento fuera de los limites de funcionamiento	72
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	76
5.1	Conclusiones	76
5.2	Recomendaciones.....	78
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
	ANEXOS:	83

ANEXO A: Sistema Eléctrico de Potencia:	A
ANEXO B: Esquema de Actuadores y Electrónica de Potencia	B
ANEXO C: Esquema de Control de potencia, corriente en eje Directo y de Cuadratura:	C
ANEXO D: Esquema de Control de Corriente y voltaje DC:	D
ANEXO E: Prueba completa para presentación Práctica:	E

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Generador de Inducción Jaula de Ardilla (SCIG) con caja de engranajes conectado directamente a la Red, [20].....	7
Figura 1.2 Generador de Inducción de Rotor Devanado (WRIG) con resistencias de rotor variables, [20]	7
Figura 1.3 Generador de Inducción doblemente alimentado (DFIG) con convertor de frecuencia a escala completa, [20].....	8
Figura 1.4 Generador de velocidad variable con convertor de frecuencia a escala completa. a) Propuesta con un Generador de Inducción (SCIG) o un Sincrónico (SG) con caja de engranajes. b) Propuesta con un Generador Sincrónico si caja de engranajes.[20]	9
Figura 1.5 Acción proporcional, [23].....	11
Figura 1.6 Acción Integral, [23]	11
Figura 1.7 Acción Diferencial, [23].....	12
Figura 1.8 Representación gráfica de un SMC, [23].....	13
Figura 1.9 Función signo, [23].....	14
Figura 1.10 Función sigmoide para diferentes valores de δ , [23].....	15
Figura 2.1 Metodología Usada en el Trabajo de Titulación.....	18
Figura 2.2 Sistema Eléctrico de Potencia.....	19
Figura 2.3 Convertor Electrónico de Potencia (AC-DC-DC-AC).....	23
Figura 2.4 Resultados del Modelo Detallado en contra del Promedio. En Rojo el modelo detallado y en Azul el modelo promedio. [30].....	25
Figura 2.5 Estructura de Control del Convertor DC-AC para la Fase 1	26
Figura 2.6 Estructura de Control del Convertor DC-DC para la Fase 1	27
Figura 2.7 Estructura de Control del Convertor DC/AC para la Fase 2.....	27
Figura 2.8 Estructura de Control del Convertor DC/DC para la Fase 2.....	28
Figura 2.9 PMSM equipado con un convertor con filtro LC trifásico, [34].....	34
Figura 2.10 Diagrama de Flujo para la Sintonización de los Controladores.....	38
Figura 2.11 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Optimización	41
Figura 3.1 Perfil de Viento usado para la Prueba	43
Figura 3.2 Potencias del Sistema para un Perfil de Viento	44
Figura 3.3 Respuesta de corriente en eje Directo	46
Figura 3.4 Salida del controlador SMS en eje Directo	46
Figura 3.5 Valor de la ganancia no lineal en eje Directo.....	47
Figura 3.6 Respuesta de corriente en eje de Cuadratura	47
Figura 3.7 Salida del controlador SMS en eje de Cuadratura.....	48

Figura 3.8 Valor de la ganancia no lineal en eje de Cuadratura	48
Figura 3.9 Respuesta del voltaje DC de acople.....	50
Figura 3.10 Salida del controlador PI no lineal	50
Figura 3.11 Valor de la ganancia no lineal	51
Figura 3.12 Respuesta de Corriente DC	53
Figura 3.13 Salida del controlador PI con ganancia no lineal para corriente DC	54
Figura 3.14 Valor de la ganancia no lineal para corriente DC.....	54
Figura 3.15 Respuesta de Potencia Activa Suministrada por la planta Eólica	56
Figura 3.16 Salida del controlador PI con ganancia no lineal	56
Figura 3.17 Valor de la ganancia no lineal para el control de Potencia Activa.....	57
Figura 3.18 Respuesta de Potencia Reactiva con un Sistema de Control VAR/VOLT Basado en el Reporte: “Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators, [38]”	58
Figura 3.19 Respuesta de corriente en eje de cuadratura (izquierda) y eje directo (derecha) ante cambios bruscos de potencia activa y reactiva	58
Figura 3.20 Respuesta de Voltaje DC ante Entrada y Salida Brusca de Carga.....	59
Figura 3.21 Respuesta de la Corriente DC ante Entrada y Salida Brusca de Carga	59
Figura 4.1 Respuesta de corriente en eje directo ante un pulso en la entrada	61
Figura 4.2 Respuesta de corriente en eje de cuadratura ante un pulso en la entrada	62
Figura 4.3 Respuesta del Voltaje DC ante una entrada de tipo escalón	63
Figura 4.4 Caída de voltaje en el sistema medida en la barra B5.....	65
Figura 4.5 Respuesta del sistema ante una perturbación.....	65
Figura 4.6 Acercamiento a la respuesta del sistema ante una perturbación.....	66
Figura 4.7 Potencias del Sistema para un Perfil de Viento Suficiente	67
Figura 4.8 Cálculo de la Referencia de Potencia.....	69
Figura 4.9 Cálculo del Ángulo de las Aspas	69
Figura 4.10 Potencias del Sistema para un Perfil de Viento No Suficiente	70
Figura 4.11 Velocidad del Rotor de la Turbina Eólica.....	70
Figura 4.12 Ángulo del Aspa de la Turbina Eólica.....	71
Figura 4.13 Control de Potencia con Cálculo Dinámico de Referencia.....	72
Figura 4.14 Perfil de Viento con valores fuera del límite de operación - 4 (m/s) para el mínimo y 32 (m/s) para el máximo	73
Figura 4.15 Potencias del Sistema ante niveles de viento fuera de los límites de operación	73
Figura 4.16 Velocidad del Rotor de la Turbina Eólica.....	74
Figura 4.17 Ángulo del Aspa del Aerogenerador.....	75

Figura 4.18 Seguimiento de Potencia ante una Referencia Dinámica	75
---	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Voltaje de Barra	20
Tabla 2.2. Valores Base del Sistema.....	20
Tabla 2.3. Parámetros de las Turbinas Eólicas.....	20
Tabla 2.4. Parámetros del filtro de acople a la Red	20
Tabla 2.5. Parámetros del Transformador T2	21
Tabla 2.6. Parámetros de la Línea de Transmisión	21
Tabla 2.7. Parámetros del Transformador T1	21
Tabla 2.8. Parámetros del Transformador de Puesta a Tierra TT	22
Tabla 2.9. Valores característicos del Perfil de Carga	22
Tabla 2.10. Valores de los elementos del Conversor Reductor Elevador.....	23
Tabla 3.1. Parámetros de los Controladores de Corriente	45
Tabla 3.2 Ganancias para el control de Voltaje DC	49
Tabla 3.3. Parámetros del control de corriente DC	52
Tabla 3.4 Ganancias para el control de Voltaje DC para fase uno y dos	53
Tabla 3.5. Parámetros del controlador de Potencia	55
Tabla 4.1. Desempeño de la propuesta SMC y del controlador PID de la corriente en eje directo.....	61
Tabla 4.2. Desempeño de la propuesta SMC y del controlador PID de corriente en eje de cuadratura	62
Tabla 4.3. Desempeño del controlador PID no lineal y lineal	64
Tabla 4.4. Desempeño del controlador no lineal en comparación al lineal.....	66

RESUMEN

En el presente trabajo se han desarrollado dos propuestas de control no lineal para la corriente, voltaje, y potencia de un aerogenerador. El principal aporte de los controladores propuestos es su simplicidad de implementación y su robustez ante errores de modelado y perturbaciones externas.

Para evaluar el desempeño de los controladores se implementó un sistema de pruebas donde se evaluó la capacidad de un aerogenerador en un sistema eléctrico para seguir referencias de potencia y reestablecerse después de una perturbación severa.

En el capítulo uno se presenta la introducción, el alcance, los objetivos y el marco teórico donde se han resumido los conceptos necesarios para el desarrollo y la evaluación del rendimiento de los controladores.

En el capítulo dos se describen la configuración y las características del sistema eléctrico y los convertidores usados en el sistema de prueba, además, se presenta el desarrollo y la estructura de las ecuaciones de control.

El capítulo tres se dividió en dos fases, en la primera el aerogenerador trabaja en modo de máxima transferencia de potencia y en la segunda se modifica la estructura de control para que este pueda suministrar referencias de potencia.

De igual manera el capítulo cuatro se dividió en dos partes, en la primera se comparan a los controladores propuestos con PID's lineales y en la segunda se somete al aerogenerador a condiciones severas de trabajo para evaluar el desempeño de los controladores no lineales.

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones más relevantes relacionadas con el proyecto.

PALABRAS CLAVE: Aerogenerador, Control No Lineal, Modos Deslizantes, PID's y Algoritmos de optimización Genéticos.

ABSTRACT

In this work, two non-linear control proposals for the current, voltage, and power of a wind turbine have been developed. The main contribution of the proposed controllers is the simplicity of implementation and the robustness in the face of modeling errors and external disturbances.

To evaluate the performance of the controllers, a test system was implemented where the capacity of a wind turbine in a power system was evaluated to track references and reestablish itself after a severe disturbance.

Chapter one describes the introduction, scope, objectives and theoretical framework where the concepts necessary for the development and performance evaluation of controllers have been summarized.

Chapter two describes the configuration and characteristics of the electrical system and the converters used in the test system and presents the development and structure of the control equations.

Chapter three was divided into two phases, in the first the wind turbine works in maximum power transfer mode and in the second the control structure is modified so that it can supply power references.

Similarly, chapter four was divided into two parts, in the first part the proposed controllers are compared with linear PIDs and in the second part the wind turbine is subjected to severe working conditions to evaluate the performance of the non-linear controllers.

Finally, chapter five presents the most relevant conclusions and recommendations related to the project.

KEYWORDS: Wind Turbine, Non-Linear Control, Sliding Modes, PIDs and Genetic optimization Algorithms.

1 INTRODUCCIÓN

El principal enfoque de este trabajo es proponer y comparar nuevas estrategias de control no lineal para la regulación de corriente, voltaje y potencia de los convertidores estáticos de un aerogenerador conectado a una red eléctrica compuesta de líneas de transmisión, transformadores, cargas y un generador convencional.

Los controladores fueron probados en una planta de generación eólica que se encuentra implementada en un sistema eléctrico de potencia compuesto por un generador convencional que representa una barra infinita, transformadores elevadores y reductores, líneas de transmisión, interruptores de potencia y cargas con un perfil altamente dinámico.

La planta de generación se encuentra formada por una turbina eólica, un generador sincrónico y un convertidor completo de frecuencia, el cual está compuesto de una etapa de conversión de alterna a continua (rectificador), un elevador reductor de voltaje DC (enlace corriente directa o enlace DC), un convertidor de continua a alterna (inversor) y un filtro de acople a la red.

Para los controladores de corriente que se encuentran implementados en el inversor se eligió un control por modos deslizantes (SMC) debido a que la corriente necesita tener técnicas de control rápidas, en el cual se propone implementar una ganancia no lineal que sea función del error del sistema.

Para los controladores de voltaje y corriente del convertidor DC, se eligió un control proporcional integral derivativo (PID) en el que se implementó una ganancia no lineal que al igual que en el control de corriente del inversor se calcula en función del error del sistema.

Finalmente, para poder regular la potencia suministrada al sistema eléctrico se propone crear dos estructuras de control en cascada. Una en la que el lazo externo de control sea la potencia y el interno sea la corriente del inversor y una segunda en la que el lazo externo de control sea el voltaje DC y la interna la corriente DC del convertidor reductor elevador.

La sintonización de los controladores se la realizó mediante algoritmos de optimización genéticos, los cuales han demostrado ser un método válido y eficiente para la sintonización de controladores en los que no existe aún ecuaciones generales de sintonización. [1]

Para evaluar el desempeño de los controladores propuestos se usó el índice de error absoluto integral (IAE), debido que este usualmente se usa para evaluar el comportamiento de los controladores hasta alcanzar el estado estable. [2]

La implementación y comparación de los controladores se hará por medio de la librería Simscape Electrical Computacional de Simulink en Matlab®, debido a que este paquete se ha convertido en una de las herramientas más usadas para la simulación de sistemas altamente dinámicos, como son los sistemas eólicos. [3]

1.1 OBJETIVOS

El Objetivo principal del presente trabajo de titulación es diseñar e implementar esquemas no lineales de control para el suministro de potencia y estabilización de voltaje DC de un aerogenerador operando en una Microred.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Realizar un estudio bibliográfico del funcionamiento de aerogeneradores, de la electrónica de potencia utilizada en el mismo, así como de su control lineal y no lineal
- Diseñar e implementar controladores no lineales para regular el voltaje y la corriente por el sistema de conversión usando algoritmos de optimización.
- Modificar la configuración del control para que el sistema pueda regular potencia de acuerdo con una referencia establecida.
- Realizar pruebas comparativas de los controladores propuestos respecto a los algoritmos lineales implementados en el sistema de prueba.

1.2 ALCANCE

El alcance del presente proyecto de titulación es el siguiente:

- Realizar una revisión bibliográfica del funcionamiento de aerogeneradores y de las diferentes configuraciones de estos.
- Realizar una revisión bibliográfica de la electrónica de potencia utilizada en la conversión estática en generación eólica, las diferentes topologías y las estructuras de controladores lineales y no lineales.
- Diseñar e implementar un sistema de generación eólica en el paquete Simulink de Matlab®.
- Diseñar e implementar controladores lineales para regular el voltaje y la corriente para luego tener una referencia y comparar las nuevas estrategias de control propuestas. Además, en esta primera etapa del proyecto, se agregaron cargas al

sistema de pruebas para evaluar el desempeño de los controladores ante perturbaciones en forma de entrada y salida brusca de carga.

- Diseñar e implementar controladores no lineales para regular el voltaje y la corriente del sistema de conversión estático usando algoritmos de optimización. Se propone desarrollar dos tipos de controladores no lineales, unos con PID's que tengan ganancias no lineales y otros por Modos Deslizantes con ganancias no lineales en su componente discontinua. Estos controladores serán sintonizados usando algoritmos de optimización, usando como función objetivo el error de seguimiento de referencia, donde para comprobar los resultados se harán comparativas haciendo uso del cálculo de errores absolutos y la representación gráfica del comportamiento dinámico del sistema.
- Modificar la configuración del control para que el sistema pueda regular potencia de acuerdo con una referencia establecida. El sistema original de pruebas no puede regular la potencia suministrada, si no que entrega toda la energía que tiene al sistema.
- Realizar pruebas comparativas de los controladores no lineales propuestos respecto a los algoritmos lineales implementados en el sistema de prueba.
- Someter al sistema a entradas y salidas altamente dinámicas de carga para evaluar el desempeño de las nuevas estructuras de control desarrolladas.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 AEROGENERADORES

Un aerogenerador es una máquina rotativa que convierte la energía eólica en energía eléctrica.

Se define como energía eólica a la energía cinética de las masas de aire en movimiento, la misma es una de las energías más populares para la generación de electricidad limpia a nivel mundial. [4]

1.3.1.1 Situación de la Energía Eólica en el Mundo

En la realidad eléctrica actual, la generación a partir de fuentes de energía renovable se encuentra cada vez ocupando un lugar más relevante entre las fuentes de generación para sistemas eléctricos de potencia, donde la energía eólica y la solar se han situado como las más extendidas a nivel mundial. [4]

Para el año 2018, la energía eólica a nivel mundial se encuentra aproximadamente con una capacidad instalada de 587 (GW) [5], países que suplen grandes demandas de energía eléctrica como China se encuentran realizando grandes esfuerzos por ampliar su matriz energética, dando prioridad a la energía renovable.

Países como Dinamarca, actual líder en generación eólica, basan su matriz energética casi en su totalidad en generación eólica, tanto, que actualmente incluso exportan energía proveniente de fuentes eólica a países vecinos.

Así mismo, en América Latina, desde 2010 Brasil, Chile, Argentina y México han agregado más de 3.7 (GW) de generación a partir de fuentes eólicas, según un estudio del IHS Emerging Energy Research (EER) Brasil genera el 70 por ciento de energía eólica en América Latina, sin embargo, el IHS expone que solo se ha aprovechado una fracción de su potencial energético renovable. [6]

En México, los incentivos al sector privado se encuentran impulsando el potencial eólico desde hace poco más de diez años, además la reforma energética de 2013 permitió la privatización en el sector de generación y la introducción de subastas competitivas catapultaron la generación de energía eólica en el país, por otra parte Uruguay se ha convertido en el primer país de Sudamérica en suplir su demanda en casi su totalidad a partir de energía renovable, así mismo, en lo que respecta a Chile en la última década se ha instalado generación de energía renovable cercana a 1.5 (GW), con otros 375 (MW) en construcción y con proyectos aprobados que podrían aportar más de 7 (GW), por otro lado, Argentina se ha planteado suministrar más del 20 por ciento de la demanda del país con energía renovable para el año 2025, donde al igual que en sus contrapartes en Latinoamérica la implementación de subastas para la construcción de energía renovable en 2016 y 2017 resultaron en la contratación de más de 2.4 (GW) de energía eólica, además de los proyectos privados que agregaron 500 (MW) de capacidad instalada, creando una infraestructura de generación sólida de alrededor de 3 (GW). [6]

Ecuador posee en su mayoría generación de energía a partir de fuentes renovables, donde la energía hídrica se ha convertido en el pilar de la generación para suplir la demanda de los hogares ecuatorianos. Para el año 2019 Ecuador suple alrededor del 1.45 por ciento de su demanda con energía no convencional, de esta el 20 por ciento es energía eólica y el 8 por ciento corresponde a energía solar. Respecto a la generación eólica, en el cerro Villonaco (Provincia de Loja) se tienen una potencia eólica instalada de 16.5 (MW) y en la Isla San Cristóbal (Provincia de Galápagos) una capacidad instalada de 2.4 (MW) y 2.25 (MW) en construcción en la Isla Baltra (Galápagos). [7]

1.3.1.2 Control de Aerogeneradores

Para que una turbina eólica entregue energía a un sistema eléctrico con frecuencia y voltaje constante son necesarias etapas intermedias entre el generador y el sistema de potencia. Estas etapas incluyen un rectificador de voltaje, un enlace de Corriente Directa (DC) y un inversor trifásico de potencia.[3]

El control más común para sistemas eólicos es de tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) [8], estos controladores se encuentran implementados en el 95 por ciento de los procesos de control, sin embargo, estos tienen desventajas comparados con otras técnicas de control, una de ellas se relaciona con la sintonización de los parámetros de regulación, que cuando no se calculan adecuadamente provocarán sobreimpulsos en la respuesta u oscilaciones en estado estable [9]. Otra desventaja de estos controladores es que se limitan a sistemas o plantas lineales, esto es un problema debido a que una gran parte de procesos, sensores, transductores y elementos finales de control tienen características no lineales o son propensos a perder sus características lineales debido a factores externos como el envejecimiento, temperatura, saturación magnética, entre otros. [10] En el caso particular de este proyecto de titulación, el problema al implementar controladores PID se da debido a que una turbina eólica se puede modelar de manera lineal, pero en ciertos puntos de operación puede cambiar su linealidad, provocando que los controladores sean incapaces de regular de forma adecuada la corriente y el voltaje del sistema.

Acciones de regulación con ganancias muy altas o lentas implementadas en controladores que se encuentran en sistemas eólicos potencialmente pueden provocar desestabilización tanto en la turbina como en el sistema eléctrico, esto debido a la rápida respuesta característica de un sistema eléctrico de potencia. [10]

Para superar las limitaciones expuestas de los controladores PID, varios autores en la última década han propuesto una variedad de estructuras de control no lineal. Algunas propuestas se han orientado a plantear estructuras con métodos de auto sintonización, ganancias variables o no lineales que permiten a los controladores tener adaptabilidad y robustez. [4]

Algunas propuestas para ganancias no lineales en controladores PID se orientan a conmutar el comportamiento del controlador, estableciendo un rango permisible de error donde el control se comporta como un PID lineal y rangos donde el error es muy grande y el controlador se comporta como una acción ON-OFF, esto hace que el sistema presente mejoras de rendimiento y robustez cuando el sistema es sometido a perturbaciones. [11]

Otras propuestas se orientan a calcular las ganancias de los controladores PID mediante algoritmos basados en funciones no lineales de Ham, en donde la ganancia del controlador se calcula usando funciones lineales y no lineales, mediante esta técnica se reducen notablemente los sobreimpulsos del sistema. [12]

Por otro lado, otro tipo de controladores muy usado en sistemas lineales y no lineales son las técnicas de control por modos deslizantes (SMC), de los cuales varios autores comparan el desempeño de estos y llegan a la conclusión que los controladores SMC son más rápidos y robustos ante perturbaciones y errores de modelado que los PID clásicos. [13], [14], [15], [16] y [17]

Las técnicas de control deslizante se encuentran cada vez más implementadas en turbinas eólicas de baja velocidad. [18] Así mismo, varios autores han propuesto implementar SMC para el control de corriente en sistemas de energía no convencional, debido a que esta tiene una naturaleza rápida y requiere técnicas de control más veloces que los controladores PID lineales. [19]

1.3.1.3 Configuraciones de Conexión de Aerogeneradores

Durante las últimas décadas se han desarrollado varias configuraciones y diseños de turbinas eólicas, las cuales se diferencian entre sí por tener diferentes rangos de velocidad (velocidades fijas o variables) y como regulan la potencia suministrada a la red. [20], [21].

A continuación, se describen brevemente las configuraciones y características más usadas para aerogeneradores:

Tipo A: Aerogenerador de Velocidad Fija (Concepto Danés)

En la configuración mostrada en la Figura 1.1 el generador se conecta directamente a la red y la compensación de potencia reactiva se hace mediante un banco de capacitores, además, se adiciona un arrancador suave para un mejor acoplamiento a la red en el arranque del generador.

Debido a que el generador se conecta de forma directa a la red, este solo puede operar a velocidades fijas con pequeñas variaciones de velocidad y torque que son permitidas gracias al deslizamiento de la máquina.

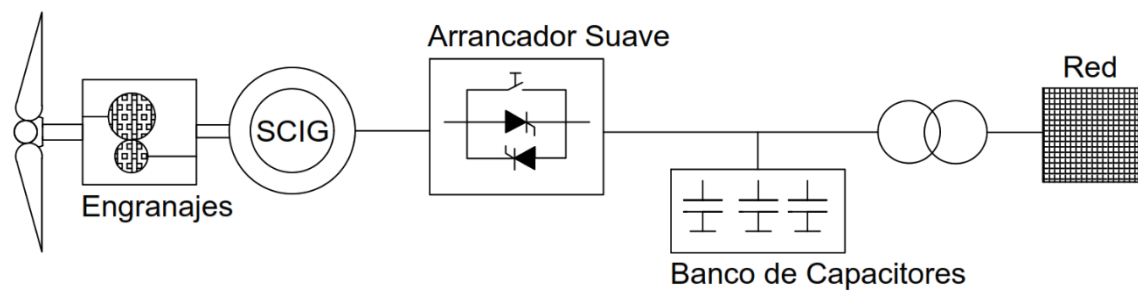


Figura 1.1 Generador de Inducción Jaula de Ardilla (SCIG) con caja de engranajes conectado directamente a la Red, [20]

El generador SCIG usualmente suele venir con dos configuraciones conmutables de polos (4 y 6 por ejemplo) para poder operar a dos velocidades acorde a dos niveles de viento diferentes.

Esta configuración se diferencia de las demás en su simplicidad, pobre capacidad de control y relativo bajo costo de implementación.

Tipo B: Aerogenerador de velocidad variable con resistencia de rotor variable

La configuración mostrada en la Figura 1.2 es muy similar a la mostrada en la Figura 1.1, sin embargo, en esta se usa un generador de rotor bobinado con resistencias rotóricas externas que permiten que el generador trabaje con velocidades variables de hasta un $\pm 10\%$ de la velocidad sincrónica.

Las resistencias Rotóricas por un lado imponen un mayor deslizamiento que permite trabajar a velocidades variables y por otro reducen el rendimiento por la pérdida de energía en forma de calor.

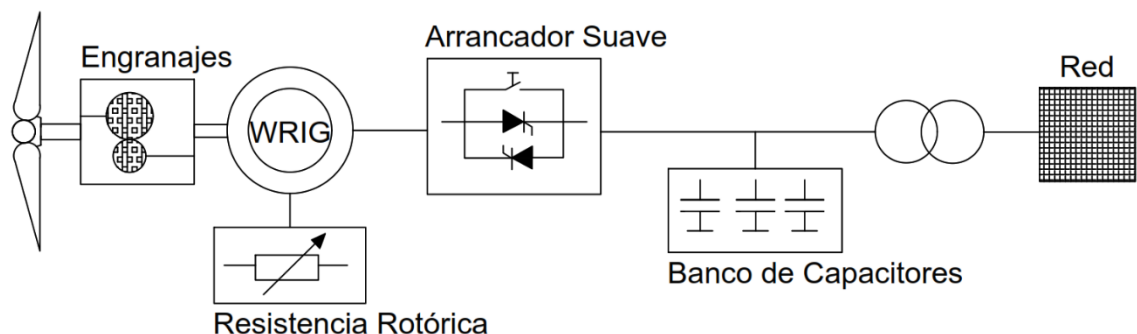


Figura 1.2 Generador de Inducción de Rotor Devanado (WRIG) con resistencias de rotor variables, [20]

En esta configuración se recomienda usar el control de inclinación de las aspas en lugar de control de pérdida aerodinámica para la limitación de la potencia cuando se trabaja por encima de la velocidad de viento nominal.

Tipo C: Generador de Inducción con devanado doblemente alimentado (DFIG)

En la configuración que se muestra en la Figura 1.3 se usa una caja de engranajes para conectar la turbina al generador.

El generador doblemente alimentado puede operar con velocidades variables de $\pm 30\%$ de la velocidad sincrónica gracias a un convertor de frecuencia conectado al circuito del rotor mediante anillos colectores.

El convertor de frecuencia permite además la compensación de potencia reactiva y provee una conexión a la red sin problemas, además, el convertor solo alimenta al rotor, por lo que se diseña solo para un 25 o 30 por ciento de la potencia nominal del aerogenerador, lo que lo hace atractivo desde el punto de vista económico comparado con la configuración tipo D.

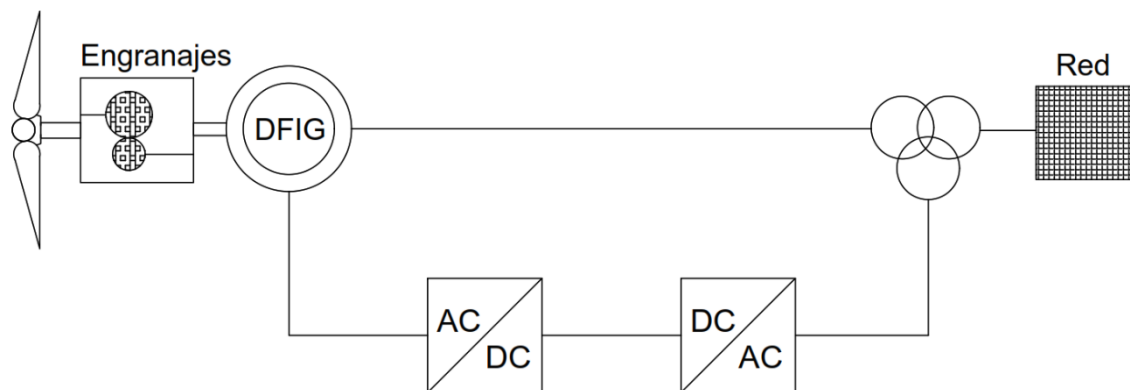


Figura 1.3 Generador de Inducción doblemente alimentado (DFIG) con convertidor de frecuencia a escala completa, [20].

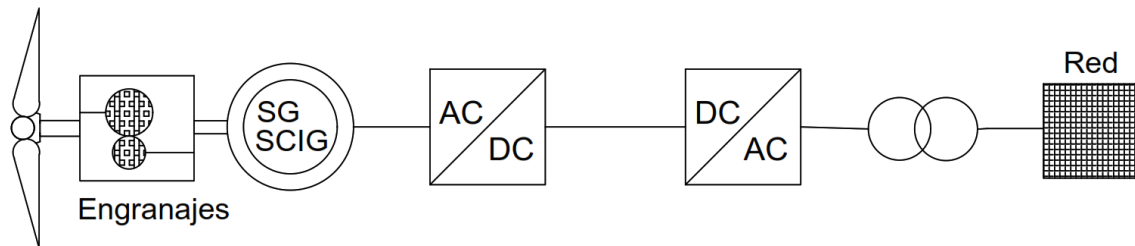
Esta configuración fue una de las más populares para la producción de energía eléctrica por aerogeneradores.

Tipo D: Aerogenerador de velocidad variable con convertor completo de frecuencia

En las configuraciones mostradas en Figura 1.4 los aerogeneradores pueden trabajar en todo el rango de velocidades del generador, puesto que son los convertidores AC/DC y DC/AC los que se encargan de garantizar frecuencia y voltaje constante del lado de la red, al mismo tiempo, el convertidor garantiza compensación de potencia reactiva y un acople suave a la red.

La configuración Tipo D puede realizarse con un generador de inducción o un sincrónico (Figura 1.4 - a), sin embargo, si se usa un generador sincrónico multipolar se puede construir la máquina para que esta trabaje a bajas velocidades y prescindir de la caja de engranajes (Figura 1.4 - b), en lo que respecta a la excitación de la máquina puede hacerse con imanes permanentes o con un sistema de corriente continua.

a)



b)

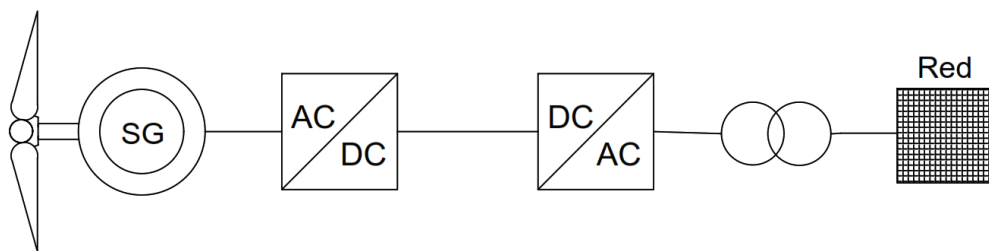


Figura 1.4 Generador de velocidad variable con convertor de frecuencia a escala completa. a) Propuesta con un Generador de Inducción (SCIG) o un Sincrónico (SG) con caja de engranajes. b) Propuesta con un Generador Sincrónico si caja de engranajes.[20]

1.3.1.4 Configuración Elegida

En el presente trabajo se eligió implementar las nuevas propuestas de control en un sistema con una configuración tipo D, con un generador sincrónico con alimentación de campo por corriente continua.

Se eligió esta configuración porque la misma presenta las siguientes ventajas:

- La Configuración tipo D (también conocida como tipo 4) permite extraer energía del viento a velocidades variables del generador (incluso para velocidades bajas).
- Esta configuración minimiza las tensiones mecánicas en la turbina incluso en presencia de ráfagas de viento debido a que el control de potencia lo realiza el convertor.
- El convertor garantiza una buena conexión a la red en lo que respecta a frecuencia y voltaje.

- El convertidor permite el suministro de Potencia Reactiva de forma dinámica, que hace que el generador pueda aportar en la regulación de voltaje.
- El generador y la red están desacoplados gracias al convertidor, haciendo que cuando se producen fallas en la red, estas afecten en menor medida al generador.
- La caja de engranajes puede ser omitida si se usa una máquina de múltiples polos.
- Esta configuración tiene un rango de control de potencia activa y reactiva más amplio que un DFIG.

No se usó una máquina de imanes permanentes (PMSG) debido al rango de potencias con los que se va a trabajar, además al no tener control de flujo magnético en el entrehierro se dificulta el control de voltaje y reactivos de la máquina.

1.3.2 CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

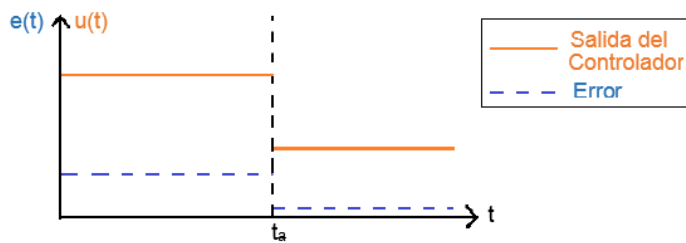
El control Proporcional Integral Derivativo (PID) es una técnica de control en lazo cerrado que combina tres acciones de regulación: una acción proporcional, una integral y una derivativa que tienen como objetivo hacer que las variables de un sistema alcancen una referencia establecida. El modelo de estos sistemas debe ser lineal y puede ser conocido o no [22]. Cada acción de control cumple con una función diferente en la dinámica de control, en donde las mismas se combinan para formar acciones de control P, PI, PD o PID, las cuales se calculan en función del error del sistema (diferencia entre la referencia y la salida de la planta).

A continuación, se describe brevemente las características de las acciones proporcional, integral y derivativa.

1.3.2.1 Acción Proporcional

El principio de la acción proporcional es tomar el error del sistema y calcular la acción de control multiplicando el error por una constante que se denomina ganancia.

En la Figura 1.5 se muestra el funcionamiento de la acción proporcional, en donde se evidencia que la salida del controlador es función del error y la ganancia.



t_a : Instante en que el error del sistema cambia súbitamente

Figura 1.5 Acción proporcional, [23]

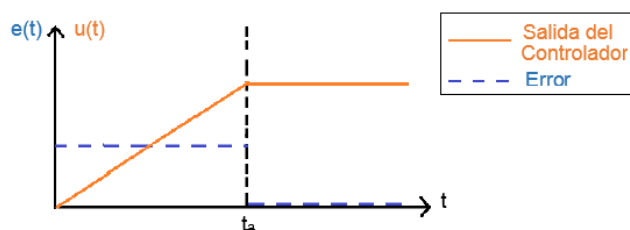
Esta acción de control es relativamente fácil de implementar ya sea de forma analógica o digital, sin embargo, debido a que la acción se calcula como una amplificación del error, resulta imposible eliminar completamente el error en sistemas que no tienen un integrador en la salida.

1.3.2.2 Acción Integral

La acción de control integral se utiliza cuando se desea eliminar el error en estado estable del sistema, debido a que la misma se calcula integrando el error y multiplicando el resultado por una ganancia.

Si el error en estado estable del sistema es nulo la salida del controlador se mantiene en el último valor calculado, caso contrario la acción de control integra el error en el tiempo hasta alcanzar la referencia, en donde la ganancia permite regular la intensidad de la acción de control.

En la Figura 1.6 se muestra el efecto de una acción integral, en donde se representa el crecimiento de la acción integral cuando el error es constante y como se mantienen en el último valor cuando el error es cero.



t_a : Instante en que el error del sistema se hace cero súbitamente

Figura 1.6 Acción Integral, [23]

En la práctica no es conveniente implementar solamente un control Integral, debido a que el sistema podría tornarse inestable (debido a que agrega un polo en el origen del plano de frecuencias) por lo que se combina la acción integral con una proporcional para formar una

acción "PI", en donde la parte integral se encarga de eliminar el error y la acción proporcional se encarga de regular la velocidad del sistema.

1.3.2.3 Acción Diferencial

Un control con acción diferencial se suele aplicar cuando el sistema es lento frente a los cambios en la referencia.

En la Figura 1.7 se muestra el principio de la acción diferencial, en donde se ve que cuando existe un cambio brusco en el error el sistema presenta un impulso que empuja al sistema hacia la referencia.

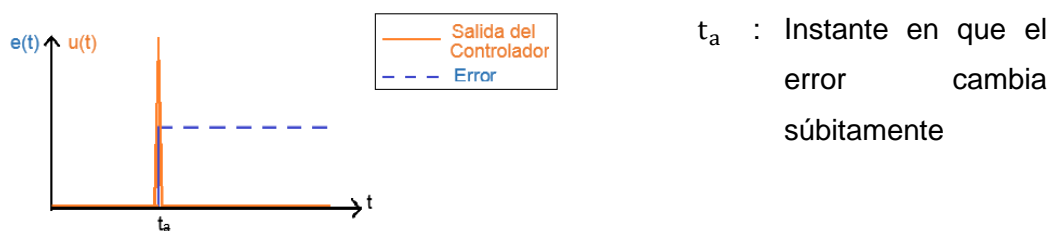


Figura 1.7 Acción Diferencial, [23]

De igual manera que en el control integral, no es conveniente implementar únicamente un control "D", debido a que el sistema podría tornarse inestable (debido a que agrega un cero en el origen del plano de frecuencias) por lo que se combina la acción derivativa con la proporcional para formar una acción "PD", en donde la parte derivativa se encarga de empujar rápidamente al sistema a la referencia cuando existe un cambio brusco en el error y la acción proporcional se encarga de suavizar la intensidad de este empuje.

Existen sistemas que para regular sus variables necesitan las tres componentes antes descritas, a este tipo se denomina proporcional, integral derivativo (PID).

1.3.3 CONTROL POR MODOS DESLIZANTES

La característica más importante del SMC (Sliding Mode Control) es que es un método de control robusto, que compensa errores en sistemas que pueden tener no linealidades, errores en el modelado y cambio en sus parámetros por envejecimiento. [24]

Este control usa un método de Estructura Variable (VSC) [25], el cual tiene un comportamiento no lineal que altera la dinámica del sistema mediante la aplicación de acciones de control que hacen que el sistema se desplace hacia una región deseada siguiendo una trayectoria conformada por las variables del proceso, el objetivo de esta

estructura es hacer que el sistema alcance la referencia “deslizándose” a través de la frontera de la trayectoria. [26]

La localización geométrica de las fronteras de la trayectoria se llama superficie de deslizamiento y el movimiento del sistema cuando se desliza a lo largo de estas fronteras es lo que se denomina modo deslizante. [14]

La ley de control de un SMC se compone de dos acciones diferentes: una función continua (U_C) o equivalente y una función discontinua (U_D) o switching. En la ecuación (1.1.1) se muestra como la acción de control SMC se calcula sumando las dos componentes.

$$U(t) = U_C(t) + U_D(t) \quad (1.1.1)$$

Donde:

- $U(t)$: salida del controlador por modo deslizante
- $U_C(t)$: acción continua o equivalente
- $U_D(t)$: acción discontinua o switching

Función Continua (Equivalente)

El diseño del controlador empieza con la definición de la superficie de deslizamiento $S(t)$, a lo largo de la cual el sistema se deslizará hasta el valor final deseado, que como se indica en la Figura 1.8, se da cuando el error y su derivada son cero.

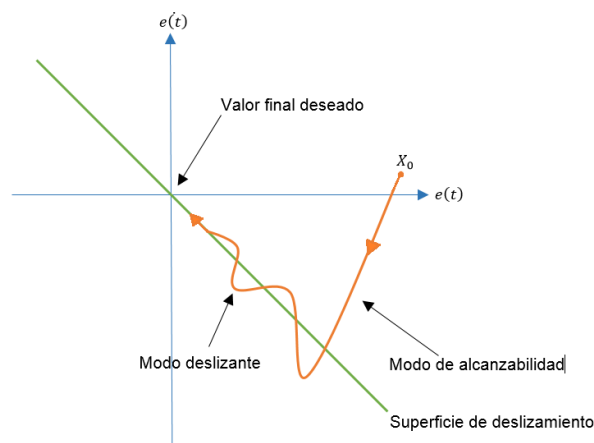


Figura 1.8 Representación gráfica de un SMC, [23]

Cuando el sistema es llevado a la superficie de deslizamiento, este define la manera en que se comporta la dinámica del sistema en lazo cerrado.

La acción continua del controlador hace que el sistema siga la dinámica definida por la ecuación que describe a la superficie deslizante. Para obtener esta ecuación se utiliza el modelo del proceso y la superficie de deslizamiento. Esta ecuación debe cumplir una condición de deslizabilidad, la cual se logra haciendo que $\dot{S}(t) = 0$, de este modo se asegura que la trayectoria sea tangente a la superficie de deslizamiento.

Función discontinua (switching)

La acción discontinua del controlador tiene un modo de alcanzabilidad, el cual hace que el sistema se mueva rápidamente hacia la superficie de deslizamiento (Figura 1.8). Generalmente, esta parte del control se calcula mediante acciones de regulación ON-OFF que hacen que el sistema alcance la superficie de deslizamiento con gran velocidad, por lo que su acción es transitoria.

En (1.1.2) se presenta la ecuación de la componente discontinua del controlador deslizante:

$$U_D(t) = K_D \text{sign}(S(t)) \quad (1.1.2)$$

Donde K_D es un parámetro de ajuste que regula la velocidad con la que se alcanza la superficie de deslizamiento y $\text{sign}(S(t))$ es una función signo (Figura 1.9) que se calcula en función de la superficie de deslizamiento $S(t)$.

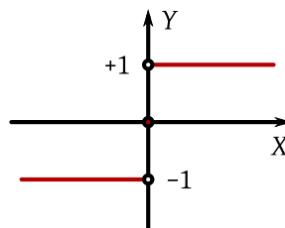


Figura 1.9 Función signo, [23]

La acción discontinua debe cumplir una condición de alcanzabilidad, la cual se logra haciendo que la acción sea lo suficientemente rápida para lograr llegar a la superficie de deslizamiento. Para ello debe cumplir que $S(t) \cdot \dot{S}(t) = 0$ [25].

Problemas

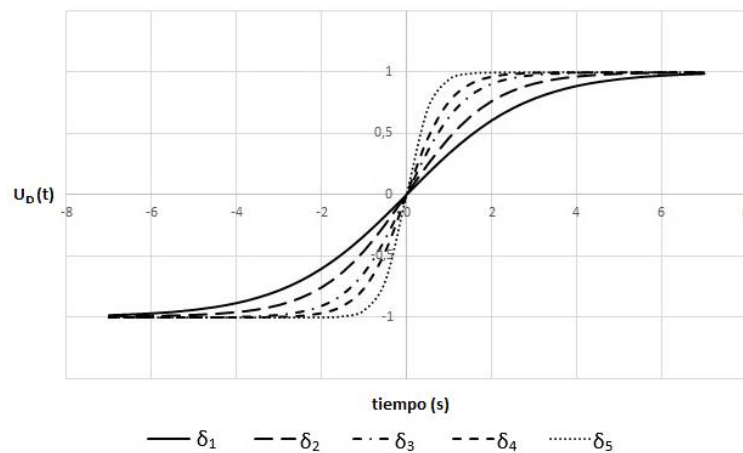
- Cuando el sistema se encuentra en las cercanías de la superficie deslizante, la acción de control discontinua cambia a frecuencias muy elevadas, esto debido que dicha componente se calcula mediante una función signo. No obstante, debido a que ningún actuador podría reproducir esta señal de control se crea el fenómeno denominado “chattering”, el cual provoca oscilaciones de

alta frecuencia que los actuadores difícilmente toleran. Para evitar el chattering varios autores proponen diferentes alternativas a la función signo, en [14] se propone usar funciones de suavizado de tipo sigmoide (como la que se ve en la ecuación (1.1.3) representada por la Figura 1.10) que permite aplicar el principio de la acción de control reduciendo en gran medida el chattering, sin embargo, la suavización disminuye el desempeño de la respuesta por lo que se considera que se ha alcanzado un modo cuasi deslizante o pseudo deslizante.

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (1.1.3)$$

Donde:

- $U_D(t)$: acción discontinua o switching
- $S(t)$: superficie deslizante
- Δ : parámetro de ajuste de la sigmoide
- K_D : parámetro de ajuste responsable por la velocidad con la que se alcanza la velocidad de deslizamiento



$$\delta_1 < \delta_2 < \delta_3 < \delta_4 < \delta_5$$

Figura 1.10 Función sigmoide para diferentes valores de δ , [23]

- La sintonización de los parámetros del controlador se realiza en base a prueba y error o en base a ecuaciones aproximadas definidas por investigadores obtenidas de la simulación de cientos de sistemas.
- Cuando el sistema presenta tiempo muerto, el mismo se debe aproximar mediante series de Taylor, debido a que no se tiene un procedimiento para el cálculo de la acción continua con este tipo de comportamiento. [27]

- La acción continua se calcula en función del modelo, lo que puede provocar complicaciones sino se conoce este, sin embargo, en [14] se propone aproximar los modelos a un FOPTD (Modelo de Primer Orden con Retardo). Esto provoca errores de modelado que son solventados gracias a la robustez de este tipo de control, obteniendo controladores simples con un buen desempeño.

1.3.4 LIBRERÍA SIMSCAPE ELECTRICAL™ - MATLAB®

Esta librería es el resultado de la unión de las librerías SimPowerSystems™ y SimElectronics®. [28]

La librería permite trabajar con modelos mecatrónicos, eléctricos y electrónicos, con especial énfasis en el trabajo de máquinas eléctricas, procesos electromecánicos, redes inteligentes, semiconductores y energías renovables.

Los modelos se usan para evaluar arquitecturas de circuitos analógicos, sistemas mecatrónicos con actuadores eléctricos y analizar la generación, conversión, transmisión y consumo de energía eléctrica.

Las librerías permiten también desarrollar y probar el rendimiento de sistemas de control usando todas las herramientas con las que cuenta Simulink, además, existe la posibilidad de crear código propietario en C, Python y en el propio editor de Matlab®.

2 METODOLGÍA

En el presente capítulo se expondrán la metodología usada, los diferentes componentes del sistema de pruebas usado en el proyecto y se detallarán las ecuaciones usadas en los controladores y la propuesta para la ganancia no lineal.

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA USADA

En el presente trabajo se usó una metodología cuantitativa, debido a que los resultados se obtienen a partir de datos que vienen de experimentos controlados y repetibles.[29]

El tipo de investigación usada fue de tipo experimental, dado que se manipulan variables a la entrada del sistema para medir y cuantificar los efectos en la salida de este. [29]

El procedimiento utilizado para la implementación, sintonización y evaluación de los controladores fue el siguiente:

1. Se realizó una búsqueda en la librería Simscape Electrical™
2. de Simulink - Matlab® de un modelo donde se haya implementado un aerogenerador en configuración tipo D y tomándolo como base se implementó sobre él un sistema de pruebas con los componentes y estructura que se muestran en la sección 2.2.
3. Se definieron dos fases de implementación:
 - 3.1. En la primera se configuró las estructuras de control para que el aerogenerador trabaje en el punto de máxima transferencia de potencia.
 - 3.2. En la segunda se configuró las estructuras de control para que el aerogenerador sea capaz de suministrar referencias de potencia.
4. En la Primera fase se implementaron los controladores no lineales propuestos. En el inversor se implementaron controladores deslizantes y en el convertidor reductor elevador DC se implementaron PIs.
5. Después se sintonizaron los controladores usando algoritmos de optimización por algoritmos genéticos. La metodología de sintonización se describe en 2.5.
6. Para finalizar la primera fase, se realizaron pruebas comparativas entre los controladores propuestos con ganancias no lineales y controladores de tipo PI, esto para evaluar el grado de mejora que se obtiene en las nuevas propuestas.
7. Para la segunda fase se cambiaron las estructuras de control para que el sistema sea capaz de suministrar referencias de potencia. Para esto se tuvo que agregar un control de corriente DC en el convertidor reductor elevador, cambiar las entradas de los lazos de control y volver a sintonizar los controladores del sistema.

8. Luego se sometió al sistema a perfiles con alta dinámica de entrada y salida carga y viento para evaluar el desempeño de los controladores ante condiciones críticas.
9. Finalmente se analizaron los datos y se plantearon las conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros.

En la Figura 2.1 se muestra un diagrama de flujo donde se presenta la metodología andes descrita de forma gráfica.

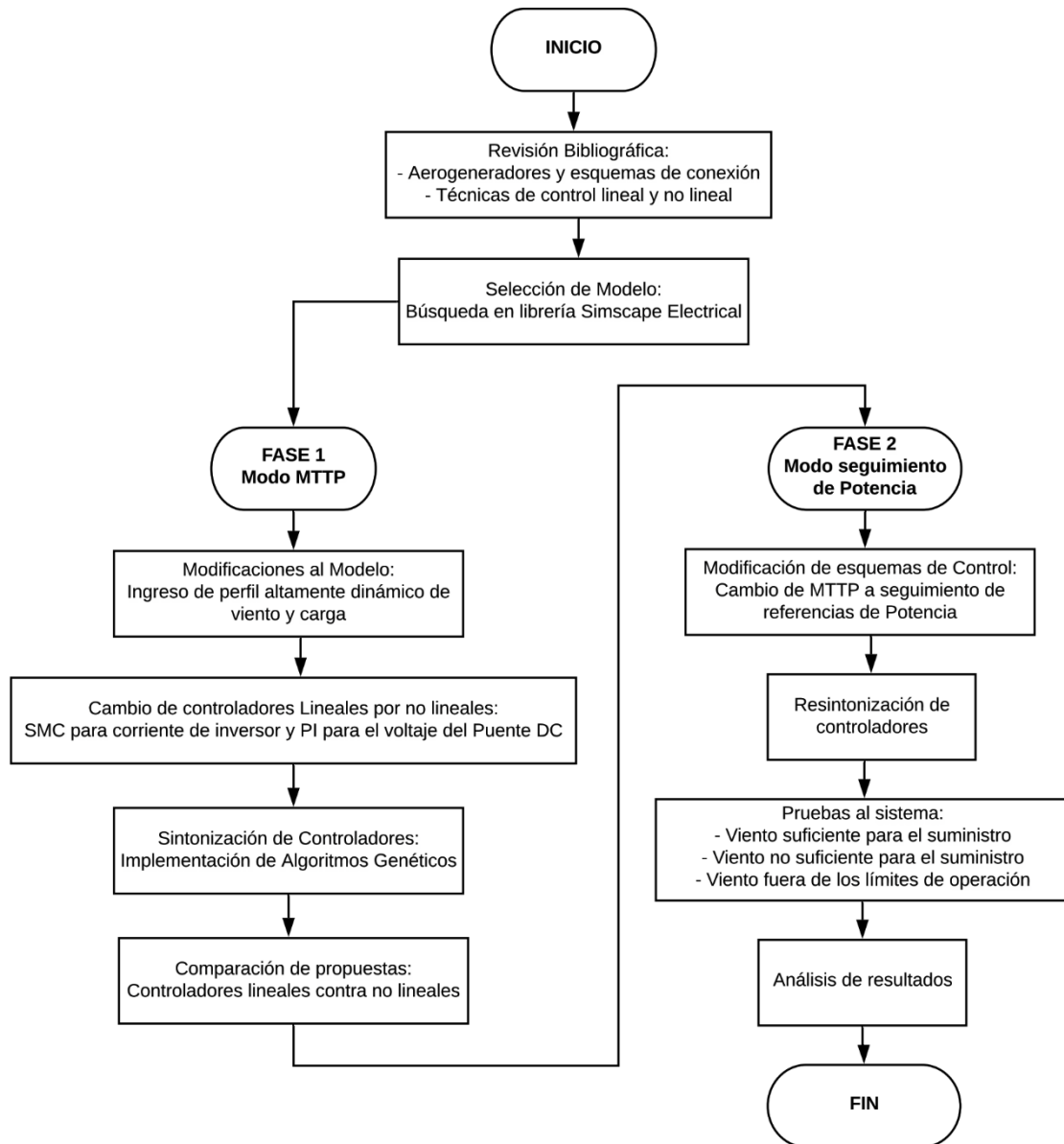


Figura 2.1 Metodología Usada en el Trabajo de Titulación

2.2 SISTEMA DE PRUEBAS

Se implementó una planta de generación eólica en un sistema eléctrico de potencia compuesto por los elementos que muestran en la Figura 2.2

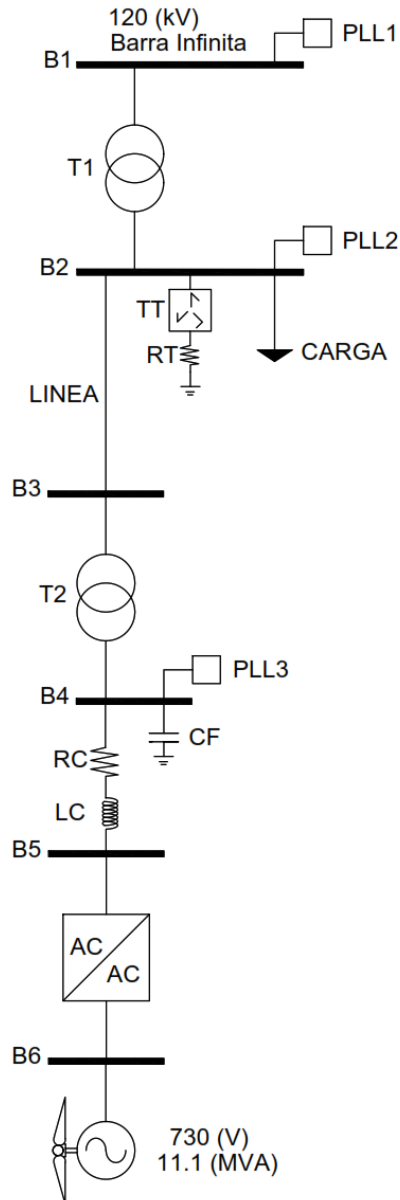


Figura 2.2 Sistema Eléctrico de Potencia

2.2.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

El sistema de potencia usado en el proyecto está formado por los siguientes componentes:

1. 6 barras cuyos voltajes se muestran en la Tabla 2.1. (El sistema se encuentran en la base mostrada en la Tabla 2.2.)

Tabla 2.1. Voltaje de Barra

Barra	Voltaje (kV)
B1	120
B2	25
B3	25
B4	0.575
B5	0.575
B6	730

Tabla 2.2. Valores Base del Sistema

Parámetros	Valor
S_B	2.5 (MVA)
V_B	120 (kV)
f	60 (Hz)

2. Una planta de generación eólica: Compuesta por una turbina eólica, un generador sincrónico (Tabla 2.3), un conversor completo de frecuencia AC-AC y un filtro de acople a la red (Compuesto por una bobina de ahogo y un filtro capacitivo - Tabla 2.4).

Tabla 2.3. Parámetros de las Turbinas Eólicas

Parámetros	Valor
S_N	11.1 (MVA)
V_N	730 (V)
R_s	0.06 (pu)
X_d	1.305 (pu)
X_d'	0.296 (pu)
X_d''	0.252 (pu)
X_q	0.474 (pu)
X_q''	0.243 (pu)
X_l	0.18 (pu)
T_{d0}'	4.49 (s)
T_{d0}''	0.0681 (s)
T_q''	0.0513 (s)
H	0.62 (s)
p (par)	1 (pu)
Factor de fricción	0.001 (pu)

Tabla 2.4. Parámetros del filtro de acople a la Red

Bobina de Ahogo (Choke)	
Parámetros	Valor
L_C	0.15 (pu)
R_C	0.03 (pu)
Filtro Capacitivo	
Parámetros	Valor
C_F	150 (kVAR)

3. Un transformador trifásico elevador cuyas características se muestran en la Tabla 2.5

Tabla 2.5. Parámetros del Transformador T2

Parámetros	Valor
V_N	25 / 0.575 (kV)
Configuración	D / Y
S_N	12.5 (MVA)
R_1	0.00083 (pu)
L_1	0.0025 (pu)
R_2	0.00083 (pu)
L_2	0.0025 (pu)
R_M	500 (pu)
L_M	∞

4. Una Línea de Transmisión

Tabla 2.6. Parámetros de la Línea de Transmisión

Parámetros	Valor
l	30 (km)
R_1	0.1153 (Ω /km)
L_1	1.05 (mH/km)
C_1	11.33 (nF/km)
R_0	0.413 (Ω /km)
L_0	3.32 (mH/km)
C_0	5.01 (nF/km)

5. Un transformador reductor cuyas características se muestran en la Tabla 2.7

Tabla 2.7. Parámetros del Transformador T1

Parámetros	Valor
V_N	120 / 25 (kV)

Configuración	Y / D
S_N	47 (MVA)
R_1	0.0026 (pu)
L_1	0.08 (pu)
R_2	0.0026 (pu)
L_2	0.08 (pu)
R_M	500 (pu)
L_M	500 (pu)

6. Un Transformador de Puesta a Tierra

Tabla 2.8. Parámetros del Transformador de Puesta a Tierra TT

Parámetros	Valor
S_N	100 (MVA)
V_N	25 (kV)
R_0	0.025 (pu)
X_0	0.75 (pu)
R_M	500 (pu)
X_M	500 (pu)

7. Una carga con un perfil altamente dinámico que varía en función de la activación y desactivación de interruptores de potencia.

Tabla 2.9. Valores característicos del Perfil de Carga

Parámetros	Valor
V_N	25 (kV)
P_{max}	6 (MW)
Q_{max}	1 (MVAR)

8. Tres sistemas de Lazo de seguimiento de fase (PLL Phase-locked-loop) de los cuales se extraen datos de ángulo de potencia, voltaje, corriente, potencia activa y reactiva.

9. Una barra infinita que representa una red eléctrica externa que en la simulación se implementó mediante un generador convencional de gran potencia.

En el Anexo A se presenta el sistema de Pruebas implementado en Simulink.

2.2.2 CONFIGURACIÓN DEL CONVERTOR AC-AC IMPLEMENTADO

Como se mencionó en la sección 1.3.1.4, para el presente proyecto se escogió una configuración para el aerogenerador tipo D, también conocida como tipo 4.

En esta configuración el aerogenerador puede trabajar en todo el rango de velocidades de la máquina síncrona debido a que tiene un convertor completo de frecuencia (AC-AC) que se encarga estabilizar el voltaje y la frecuencia.

El convertor AC-AC usado se muestra en la Figura 2.3 el cual está compuesto de tres etapas:

1. Un convertor AC-DC no controlado: Un rectificador tipo puente de tres ramas.
2. Un convertor DC-DC: Un convertor elevador reductor de voltaje DC
3. Un convertor DC-AC: Un inversor trifásico compuesto de 6 IGBTs con sus respectivas redes de protección.

Adicionalmente en la simulación se han implementado redes Snubber de protección para los semiconductores de potencia.

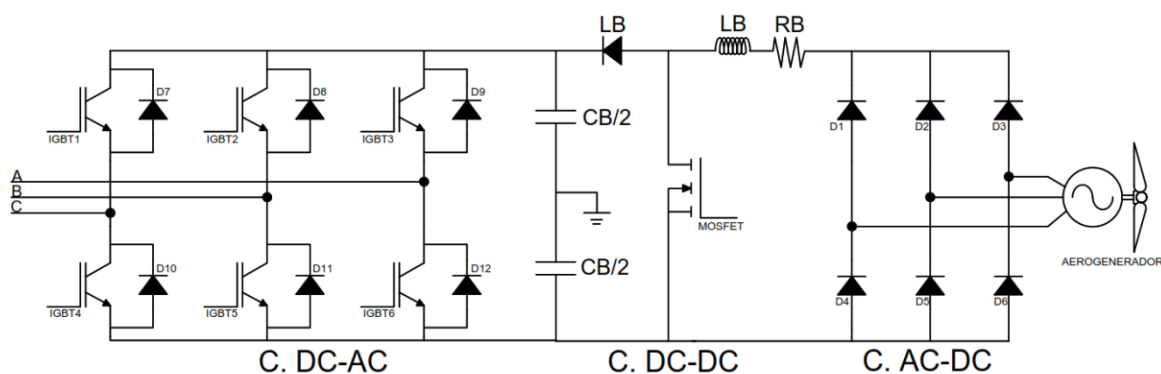


Figura 2.3 Convertor Electrónico de Potencia (AC-DC-DC-AC)

En la Tabla 2.10 se muestran los valores de los elementos usados en el convertor AC-AC

Tabla 2.10. Valores de los elementos del Convertor Reductor Elevador

Componente	Valor
C_B	90 (mF)
R_B	1.2 (m Ω)
L_B	5 (mH)

En el Anexo B se encuentra la simulación del conversor eléctrico de Potencia usado en el presente trabajo.

2.2.3 DESCRIPCIÓN DE LA SIMULACIÓN

La simulación usada como base para el desarrollo del proyecto se encuentra dentro del paquete de ejemplos en la documentación de Matlab® y tiene como nombre de “Modelo Promedio de un Planta de Eólica con Generador Sincrónico y Convertidor a Escala Completa (Tipo 4)”.

Dentro del paquete de proyectos se encontró un modelo promedio y un modelo detallado. Se escogió el modelo promedio por las siguientes razones:

- El modelo promedio permite usar tiempos de muestreo más largos que el detallado (50 microsegundos para este proyecto), lo que permite realizar simulaciones de varios segundos.
- El tiempo que se demora el programa en simular 100 segundos del fenómeno en el modelo promedio es de 10 minutos y en el modelo detallado es 70 minutos aproximadamente (varía con la computadora con la que se realice la simulación). En el proceso de sintonización resultaría no viable usar el modelo detallado, debido a que se usan algoritmos genéticos que realizan cientos de simulaciones y el tiempo de cálculo sería muy extenso.
- En ambos sistemas se calcula el rizado provocado por los conversores de potencia, por lo que en ese apartado no existe diferencia entre ambos modelos. En el modelo aproximado se calcula en cada ciclo de frecuencia de conmutación de los tiristores los valores de voltaje y corriente de los conversores DC-AC y DC-DC de forma aproximada y se simulan como fuentes de voltaje
- La principal diferencia entre un modelo y el otro es que en el detallado se puede hacer un análisis armónico de las variables eléctricas. Dado que en el presente proyecto no se hace este análisis resulta infructuoso usar el modelo detallado que tiene tiempos de simulación muy extensos. [30]
- En la Figura 2.4 se presenta una simulación comparativa entre el modelo detallado y el promedio, donde la diferencia entre el uno y el otro en promedio es de 4.11 por ciento, en cambio el tiempo de simulación del modelado detallado es 7 veces mayor al del promedio.

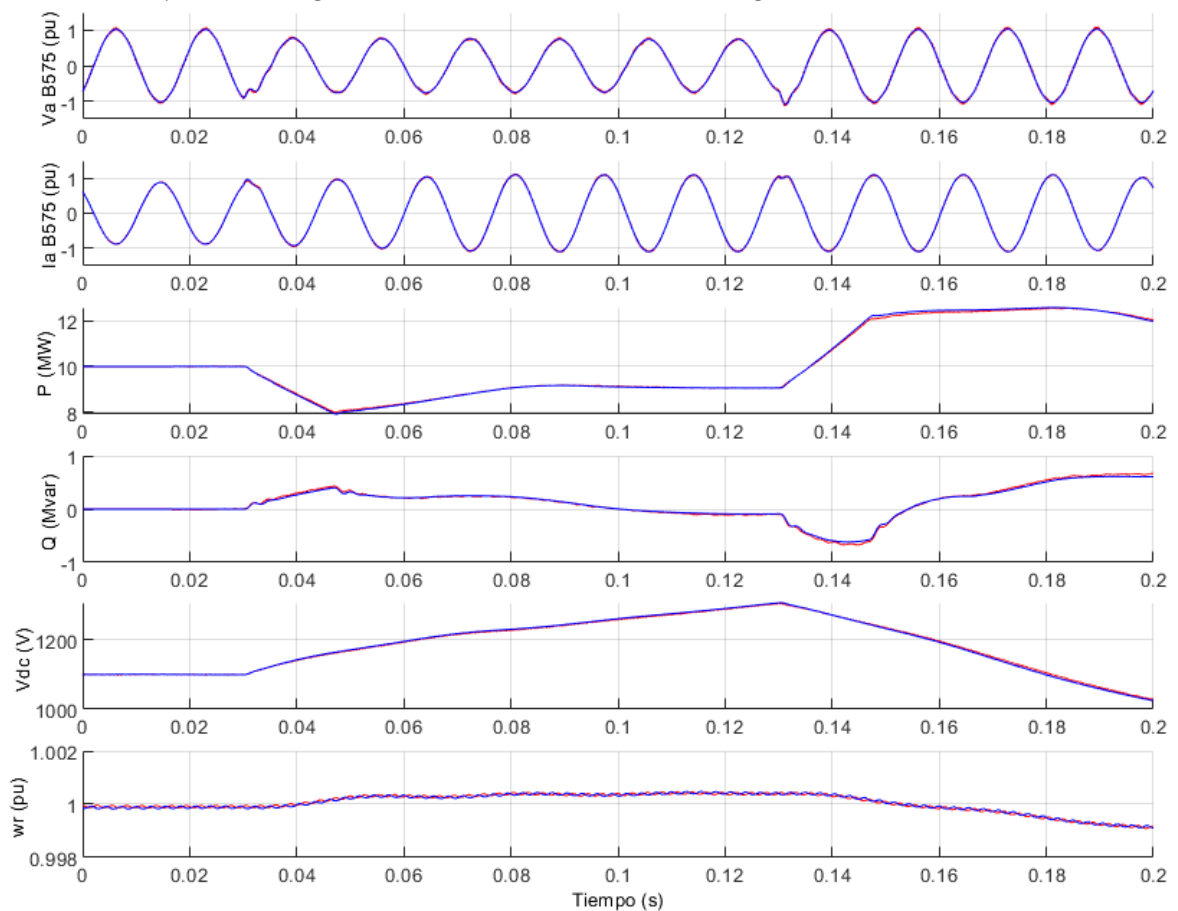


Figura 2.4 Resultados del Modelo Detallado en contra del Promedio. En Rojo el modelo detallado y en Azul el modelo promedio. [30]

2.3 ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR

A continuación, se presentan las estructuras de control usadas en el proyecto de titulación:

2.3.1 ESTRUCTURAS DE CONTROL PARA LA FASE 1:

En la fase uno de implementación del proyecto se configuró los esquemas de control del aerogenerador para que trabaje en el punto de máxima transferencia de potencia.

Para esto se implementaron dos estructuras de control, una para el inversor de voltaje (**Figura 2.5**) y otra para el conversor reductor elevador (**Figura 2.6**). Ambas estructuras de control tienen lazos internos y externos.

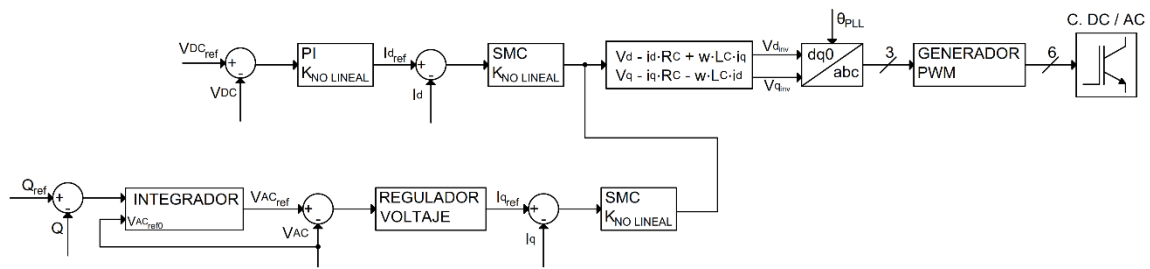


Figura 2.5 Estructura de Control del Conversor DC-AC para la Fase 1

El esquema de control del inversor (Conversor DC-AC) se detalla a continuación:

- El sistema tiene dos lazos de control, uno superior y otro inferior que luego se combinan para crear las señales PWM de los IGBTs del inversor.
- En el lazo superior se tiene el control de corriente en eje directo del inversor en cascada con el control de voltaje del conversor DC-DC.
- En el lazo inferior se tiene el control de corriente en eje de cuadratura del inversor en cascada con el control de potencia reactiva y voltaje (llamado control VAR/VOLT).

Cabe aclarar que este control ya se encontraba implementado en el sistema de pruebas y fue desarrollado por Richard Gagnon y Jacques Brochu de la empresa Hydro-Quebec en Canadá.

- En los controles de corriente de eje directo y cuadratura se implementaron controladores deslizantes en los que se agregó la propuesta de ganancia no lineal. Las salidas de los controladores de corriente ingresan a un bloque que transforma las señales de corriente a señales de voltaje, luego se cambian de sistema a las señales de eje directo y de cuadratura al sistema trifásico ABC y finalmente con un bloque de generador de ondas PWM se calculan las señales de control para los IGBTs del inversor de voltaje (Conversor DC-AC).
- En el control de voltaje DC se implementó un controlador PI con la propuesta de ganancia no lineal. La salida de este controlador entra a un bloque de saturación y se inyecta al control de corriente en eje directo.
- El controlador VAR/VOLT es un integrador trapezoidal con límites externos, reinicios y retenciones controladas.

La salida de este controlador entra a un bloque de saturación y se inyecta al control de corriente en eje de cuadratura.

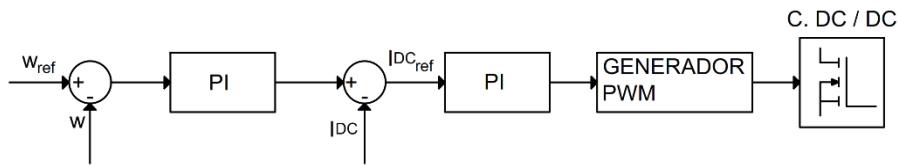


Figura 2.6 Estructura de Control del Conversor DC-DC para la Fase 1

El esquema de control del reductor elevador de voltaje DC (Conversor DC-DC) se detalla a continuación:

- Se tiene un solo lazo de control. El control de corriente DC del conversor reductor elevador en cascada con el control de velocidad rotórica del aerogenerador.
- Para el control de corriente del conversor DC-DC se escogió un control de tipo PI. La salida del controlador se envía a un bloque que calcula una señal de PWM para controlar el IGBT del conversor.
- Para el control de velocidad se implementó un control PI. La salida del conversor se inyecta al control de corriente DC del conversor reductor elevador. Cabe aclarar que la velocidad de referencia viene de un bloque externo que la calcula de tal manera que el aerogenerador entregue toda la potencia que el viento le permita.

2.3.2 ESTRUCTURAS DE CONTROL PARA LA FASE 2:

En la fase 2 se cambiaron las estructuras de control para que el sistema sea capaz de suministrar referencias de potencia.

Para esto se modificaron las estructuras de control del inversor de voltaje (**Figura 2.7**) y del reductor elevador de voltaje DC (**Figura 2.8**).

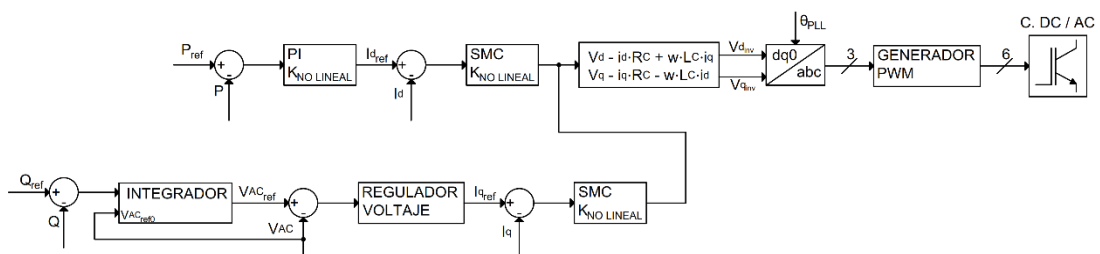


Figura 2.7 Estructura de Control del Conversor DC/AC para la Fase 2

El nuevo esquema de control del inversor (Conversor DC-AC) se detalla a continuación:

- El control de corriente en eje de cuadratura, eje directo y VAR/VOLT son iguales a los de la fase 1.
- Se ha reemplazado el control de voltaje del puente DC por el control de potencia activa del inversor.
- Para el control de Potencia se ha implementado un controlador PI en el cual se ha implementado la propuesta de ganancia no lineal.
- La salida del controlador de Potencia entra a un bloque de saturación y se inyecta al control de eje directo del inversor.

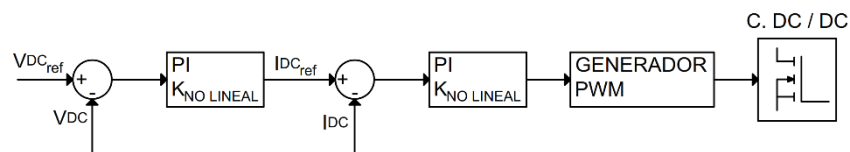


Figura 2.8 Estructura de Control del Convertor DC/DC para la Fase 2

El nuevo esquema de control del reductor elevador de voltaje DC (Convertor DC-DC) se detalla a continuación:

- El control de corriente del convertidor DC-DC se encuentra en cascada con el control de voltaje del mismo convertidor.
- Para el control de corriente se implementó un control tipo PI donde se implementó la propuesta de ganancia no lineal.
La salida del controlador se envía a un bloque que calcula una señal PWM para controlar el MOSFET del convertidor.
- Para el control de voltaje DC también se implementó un control PI con características similares al de corriente.

A continuación, se presentan las ventajas de que el sistema opere con la configuración de la Fase 1:

- El sistema aprovecha al máximo el recurso eólico disponible, de tal manera que cuando está alimentando a una carga y le sobra potencia, el sobrante puede ser inyectado a un sistema eléctrico externo.
- El bloque de cálculo de la referencia de velocidad rotórica hace que la máquina opere en valores muy cercanos al nominal, por lo que el voltaje a la salida del inversor es más estable y se reduce la carga en el controlador del Convertor DC-DC.

En cambio, las ventajas de que el sistema opera con la configuración de la Fase 2 son las siguientes:

- El sistema es capaz de trabajar en modo isla, siempre y cuando exista el recurso eólico necesario y el sistema contase con un sistema de almacenamiento de energía.
- De acuerdo con la modalidad contractual que exista con el regulador del sistema, el aerogenerador puede suministrar diferentes niveles de potencia que se ajusten a las necesidades de la demanda. En la fase 1 no se tiene control de cuanto potencia se inyecta al sistema.
- Debido a que el sistema tiene un convertor completo de frecuencia que se encarga de estabilizar la onda de salida que se inyecta a la red, la máquina puede trabajar en todo el rango de velocidades para la que está diseñada, pudiendo trabajar con un rango de velocidades de viento más alto que en la Fase1.
- En los lazos de control de la Fase 1 se tiene mezcladas las señales en los controladores, por ejemplo, en el control del inversor se tiene señales de corriente del inversor y de voltaje del convertor DC-DC, en cambio en la Fase 2, las señales del controlador del inversor y del convertor DC-DC no se mezclan, lo que permite realizar el proceso de sintonización de una forma más sencilla, debido a las interacciones de un convertor no influyen de forma significativa en el otro.

En los Anexos C y D se encuentran los esquemas de control implementados en Simulink.

2.4 ECUACIONES DE CONTROL PROPUESTAS

2.4.1 CONTROLADOR CON ESTRUCTURA SMC

Para los controladores de corriente en eje de cuadratura y eje directo del inversor se implementaron controladores deslizantes, debido a que como se mencionó en la sección 1.3.3 estos son rápidos y robustos, lo que los hace ideales para ser implementados en sistemas de alta dinámica.

En esta sección primero se presentará un tipo de controlador deslizante y luego se expondrá la nueva propuesta de ganancia no lineal, la cual se calcula de forma dinámica en función del error del sistema.

Existen varias propuestas de controladores deslizantes, en el presente trabajo se implementará la estructura propuesta en [14]. La misma es aplicable a sistemas lineales y no lineales donde no es necesario conocer el modelo exacto del sistema. En cambio,

diferentes autores proponen aproximar el sistema a uno de primer orden con retardo "FOPTD" y sobre él implementar un SMC con una superficie deslizante tipo PID. Gracias a la robustez del controlador se encontró un muy buen desempeño en el seguimiento de referencias y recuperación de perturbaciones.

Así mismo, en [23] los autores comparan la estructura propuesta en [14] con controladores tipo PID y llegan a la conclusión de que los primeros presentan mejores resultados ante cambios bruscos de referencia y perturbaciones.

A continuación, se describe brevemente el desarrollo del controlador deslizante usado en el presente proyecto:

Primero, se escogió una superficie deslizante tipo PID (2.1), debido a que esta cumple con los criterios de convergencia necesarios expuestos en 1.3.3 y es relativamente sencilla de implementar

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) \quad (2.1)$$

Donde:

- $S(t)$: Superficie de deslizamiento
- $e(t)$: Error del sistema
- λ_1 : Constante de la acción proporcional
- λ_0 : Constante de la acción integral

Para encontrar la parte continua del controlador deslizante fue necesario cumplir con la condición de deslizabilidad, la cual se logró haciendo que la derivada de la superficie deslizante sea cero, así:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \frac{d^2(e(t))}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de(t)}{dt} + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.2)$$

El error del sistema se calculó restando la referencia $r(t)$ y la realimentación del sistema $x(t)$, así:

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (2.3)$$

Con el objetivo de simplificar la ecuación del controlador, en [14] se propone eliminar las derivadas de la referencia de (2.2), dado que se demostró que las mismas no influyen en el rendimiento del controlador. Se reemplaza (2.3) en (2.2) y se obtiene (2.4), así:

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{d^2(x(t))}{dt^2} - \lambda_1 \frac{d(x(t))}{dt} + \lambda_0(r(t) - x(t)) = 0 \quad (2.4)$$

Al igual que en [14] se optó por aproximar al sistema un FOPTD, cuya ecuación se describe en (2.5), sin embargo, dado que los controladores deslizantes no pueden abordar el tiempo muerto, el mismo se aproxima usando series de Taylor a un polo, quedando el modelo del sistema a usarse tal como se ve en (2.6).

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (2.5)$$

$$\frac{x(s)}{u(s)} = \frac{k}{(\tau s + 1)(t_0 s + 1)} \quad (2.6)$$

Donde:

- $x(s)$: salida del sistema a realimentarse
- $u(s)$: entrada al sistema que viene desde el controlador
- k : ganancia en estado estable del sistema
- t_0 : tiempo muerto o retardo del sistema
- τ : constante de tiempo del sistema

El modelo del sistema en el dominio del tiempo se presenta en (2.7)

$$u(t) = \frac{1}{k} \left(t_0 \tau \frac{d^2(x(t))}{dt^2} + (\tau + t_0) \frac{d(x(t))}{dt} + x(t) \right) \quad (2.7)$$

Finalmente para encontrar la parte continua del controlador se reemplaza la derivada más alta de la referencia de la ecuación descrita en (2.4) en (2.7), quedando así:

$$U_c(t) = \frac{t_0 \tau}{k} \left(\left(-\lambda_1 + \frac{\tau + t_0}{t_0 \tau} \right) \frac{d(x(t))}{dt} + \lambda_0 e(t) + \frac{x(t)}{t_0 \tau} \right) \quad (2.8)$$

Los parámetros λ_1 y λ_2 definen el comportamiento de la superficie y por ende la forma en que el sistema se desliza hacia la referencia. En [14] se hace la elección de λ_1 mostrada

en (2.9), con el objetivo de que el controlador tenga un comportamiento más estable. Adicionalmente para asegurar que la superficie de deslizamiento se comporte como un sistema críticamente amortiguado o sobre amortiguado se estable la condición mostrada en (2.10).

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0}{t_0\tau} \quad (2.9)$$

$$\lambda_0 \leq \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (2.10)$$

Se reemplazan (2.9) y (2.10) en (2.8) para obtener la expresión final de la parte continua del controlador:

$$U_C(t) = \frac{t_0\tau}{k} \left(\lambda_0(r(t) - x(t)) + \frac{x(t)}{t_0\tau} \right) \quad (2.11)$$

La parte discontinua del controlador se encarga de llevar rápidamente al sistema hacia la superficie deslizante, para ello se debe cumplir la condición de alcanzabilidad descrita en 1.3.3.

La parte discontinua del controlador se calcula usando una función sigmoide, la cual en [14] se presenta como una alternativa para reducir el ruido del alta frecuencia (chattering) que podría destruir los actuadores del sistema. Quedando la ecuación descrita en (2.12):

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.12)$$

Donde:

- $S(t)$: Superficie deslizante
- K_D : Constante de la acción discontinua
- δ : Constante que modula la acción discontinua

La ecuación final del controlador es la suma de la parte continua (2.11) y la parte discontinua (2.12), la cual se muestra en (2.13).

$$U(t) = \frac{x(t)}{k} + \frac{t_0\tau}{k} \lambda_0(r(t) - x(t)) + K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.13)$$

La ecuación descrita en (2.13) se usó para los controles de corriente del inversor, sin embargo, en [23], [31] y [32] se presentan varias complicaciones relacionadas con la parte discontinua del controlador, las cuales se pueden resumir a continuación:

- Si el valor de δ es pequeño, la acción de la parte discontinua del controlador se aproxima a una función signo, lo que provoca que el “chattering” aumente en el sistema.
- Si el valor de δ es grande, la acción de la parte discontinua del controlador se vuelve lenta, lo que provoca que el tiempo de estabilización se incremente hasta valores no deseados.
- El valor de K_D hace que la acción discontinua se torne más o menos fuerte en la dinámica del controlador.

Por las razones antes expuestas el presente trabajo propone reemplazar K_D por una ganancia variable G_{NL} , puesto que la acción discreta del controlador es útil cuando el sistema se encuentra alejado de la referencia, en cambio, provoca problemas (chattering) cuando el sistema se encuentra cercano a la misma, para esto, se propone hacer que el valor de K_D sea elevado cuando el error es grande y viceversa.

En la ecuación (2.14) se muestra la propuesta para el cálculo de la ganancia G_{NL} , en donde si el error es cero, el valor de G_{NL} se vuelve constante.

$$G_{NL} = K_D |1 + e(t)| \quad (2.14)$$

En (2.15) se presenta la ecuación final del controlador deslizante usando en los controles de corriente del inversor, la cual se obtiene reemplazando (2.14) en (2.13).

$$U(t) = \frac{x(t)}{k} + \frac{t_0 \tau}{k} \lambda_0 (r(t) - X(t)) + G_{NL} \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (2.15)$$

2.4.1.1 Consideraciones de usar un FOPTD

Una de las desventajas de los controladores deslizantes es que dependiendo del modelo que se escoja para representar el sistema, las ecuaciones del controlador pueden tornarse muy largas o de difícil implementación.

En el presente trabajo se pretende implementar los controladores deslizantes en el inversor de voltaje (convertor DC-AC), el cual tiene a la salida un filtro Inductivo Capacitivo (LC) de acople a la red.

En [33] y [34] se estudian inversores con diferentes tipos de filtro de salida y se determinó mediante la obtención de las matrices de estado, que el modelo de un inversor con filtro LC es de tercer orden. En la Figura 2.9 se muestra el sistema usado en [33] para la obtención de las ecuaciones de estado que se muestran de (2.16) a (2.19)

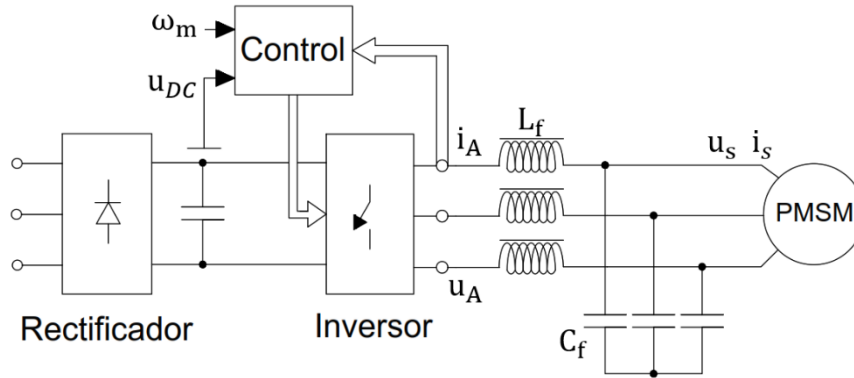


Figura 2.9 PMSM equipado con un conversor con filtro LC trifásico, [34]

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-R_f I}{L_f} - \omega_m J & \frac{-I}{L_f} & 0 \\ \frac{I}{C_f} & -\omega_m J & \frac{-1}{C_f L_s} \\ 0 & I & \frac{-R_s}{L_s} - \omega_m J \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{-I}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_f L_s} \\ 0 & \frac{R_s}{L_s} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$C = [I \quad 0 \quad 0] \quad (2.18)$$

$$x = [i_A \quad u_s \quad \varphi_s]^T \quad (2.19)$$

$$u = [u_A \quad \hat{\varphi}_{pm}]^T \quad (2.20)$$

Donde:

i_A : Corriente de salida inversor

u_s : Voltaje del Estator

φ_s : Flujo de Acoplamiento

- u_A : Voltaje de salida inversor
- $\hat{\varphi}_{pm}$: Flujo de Imanes Permanentes
- R_f : Resistencia del devanado del filtro LC
- L_f : Inductancia del Filtro
- C_f : Capacitancia del Filtro
- R_s : Resistencia de Estator
- L_s : Inductancia de Estator
- ω_m : Velocidad Angular Eléctrica
- I : Matriz identidad
- J : Matriz de tipo $\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$

En el presente trabajo se usa un sistema similar al planteado en [33] y [34], con la diferencia de que el inversor con filtro LC no alimenta una maquina sincrónica de imanes permanentes, si no que suministra energía directo a un sistema eléctrico de potencia.

Normalmente el desarrollo de la parte continua del controlador deslizante debió haberse calculado haciendo uso del modelo de tercer orden antes descrito, sin embargo, en [14] se demostró que el control por modos deslizantes es lo suficientemente robusto para aproximar sistemas de orden elevado a un Modelo FOPTD, el cual es uno de los modelos más sencillos con los que se puede aproximar una planta o un sistema.

La ventaja más relevante de usar el FOPTD en lugar del modelo de tercer orden es que las ecuaciones de control se simplifican haciendo que el controlador sea más fácil de implementar, obteniéndose un buen desempeño incluso ante la presencia de perturbaciones externas. [23]

2.4.2 CONTROLADOR CON ESTRUCTURA PID

Para los controladores de potencia activa, voltaje y corriente DC, los cuales no necesitan ser tan rápidos como los de corriente de inversor, se propuso implementar controladores PID, debido a que los mismos son ampliamente usados en este tipo de sistemas y tienen una estructura relativamente sencilla de implementar.

La propuesta es agregar una ganancia no lineal que se calcula de forma similar a la de la sección anterior, la cual haga que la acción del controlador sea muy fuerte cuando el error es grande y pequeña cuando el sistema se encuentre en las cercanías a la referencia.

La ecuación base del PID usado se presenta en (2.21), la cual se transforma al dominio del tiempo en (2.22)

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d s \quad (2.21)$$

$$U_{PID}(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.22)$$

Donde:

- k_p : Constante proporcional del controlador
- k_i : Constante integral del controlador
- k_d : Constante derivativa del controlador
- e : Error del sistema
- U_{PID} : Salida del controlador

Se realizaron varios experimentos para determinar cuál de las tres ganancias del controlador debe calcularse de forma no lineal, y se llegó a los siguientes resultados:

- No puede ser k_d debido a que del proceso de sintonización (se explica en la siguiente sección) se determinó que el mejor funcionamiento se encuentra cuando esta constante es cero, es decir, la mejor opción es implementar un PI, no un PID.
- Los resultados al implementar la ganancia no lineal en k_p o en k_i son muy similares, por lo que es indiferente donde se implemente la ganancia no lineal, por lo que se decidió hacer que la ganancia afecte a todo el controlador.

Para obtener la ecuación final del controlador se agrega (2.14) en (2.22), así:

$$U_{PID}(t) = K_D |1 + e(t)| \left(k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.23)$$

Sin embargo, como se mencionó con anterioridad, la parte derivativa del controlador no se usa en los diferentes controles, esto debido a que en todos los procesos de sintonización realizados en este trabajo se obtuvo como resultado $k_d = 0$.

2.5 MÉTODO DE SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES

La sintonización de los controladores es uno de los retos más grandes en el proceso de implementación de sistemas de control.

Para la sintonización de los controladores, la cual consiste en hallar las constantes de las ecuaciones de control, se tienen varios métodos, donde el más reconocido es usar ecuaciones generales para el cálculo de las constantes en función de los parámetros característicos del sistema como la constante de tiempo, tiempo muerto, sobreimpulso, etc., sin embargo, en muchos casos para obtener dichas ecuaciones es necesario implementar el controlador en cientos de plantas y usar métodos de regresión para la determinación de las ecuaciones de sintonización. [14]

Dado que en el presente trabajo se están proponiendo nuevas estructuras de control no se cuenta con las ecuaciones de sintonización antes mencionadas, por lo que se aplica otra técnica muy usada, la cual consiste en usar algoritmos de optimización.

Esta técnica consiste en usar algoritmos de optimización para minimizar el error del sistema en el seguimiento de una referencia mediante la variación de los valores de las constantes de las ecuaciones de control.

El proceso de sintonización descrito en la Figura 2.10 es el mismo para todos los controladores en el presente trabajo.

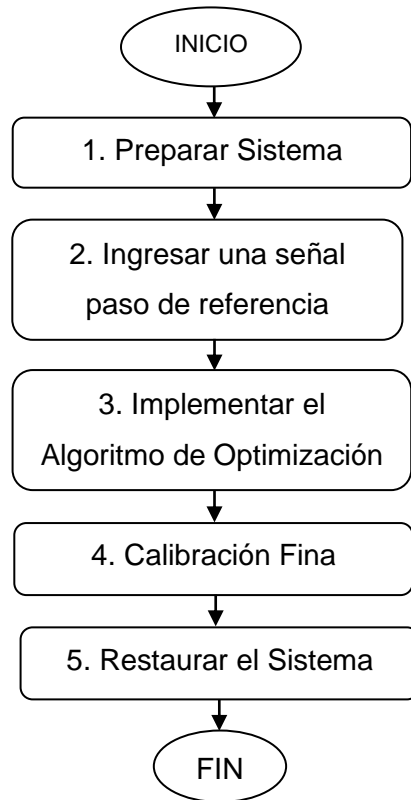


Figura 2.10 Diagrama de Flujo para la Sintonización de los Controladores

1. Preparar el Sistema: Algunas estructuras de control propuestas en el presente trabajo son de tipo cascada, por lo que es necesario primero sintonizar el controlador más interno. Para esto es necesario desconectar todas las señales del controlador más externo, debido a que el comportamiento de un controlador podría influir en la sintonización del otro. Una vez se sintonizó el controlador interno se procedió a sintonizar el externo con la misma metodología descrita en la Figura 2.10
2. Ingresar una señal paso como referencia: Se usó una señal paso como referencia para probar el rendimiento de los controladores, puesto que esta representa un cambio brusco en la entrada del controlador, la misma suele también ser definida por algunos autores como “la peor de las condiciones” a la que se le puede someter a un sistema. [35], [36]
3. Implementación del Algoritmo de Optimización: Para sintonizar los controladores se usaron algoritmos genéticos, los cuales se describen en la sección 2.3.3.1
4. Calibración Fina: Una vez obtenidas las constantes mediante el método de optimización es necesario realizar pequeñas variaciones a estas para corregir sobreimpulsos o tiempos de retardo elevados.
5. Restaurar Sistema: Una vez halladas las constantes definitivas del controlador es necesario volver a reconectar los controladores a sus referencias originales, las cuales fueron reemplazadas por la señal paso en el paso 2.

2.5.1.1 Planteamiento del proceso de Optimización

Los principales componentes del proceso de optimización se presentan a continuación:

Función Objetivo:

El objetivo del proceso de optimización (2.24) es minimizar el índice de error absoluto (IAE) del sistema al seguir una referencia.

$$F_{obj} = \min(\text{IAE}) \quad (2.24)$$

El IAE de un sistema se calcula como se muestra en (2.25)

$$\text{IAE} = \int_0^{t_{sim}} |e(t)| dt \quad (2.25)$$

Variables de Entrada:

Las variables de entrada del sistema son los parámetros de los diferentes elementos que componen el sistema, los cuales se listan en la sección 2.2

Variables de Decisión (Salidas):

Las variables de decisión del proceso de optimización son las constantes de los controladores.

Como el algoritmo a usarse es genético, las variables de decisión se descomponen en números binarios, así:

k_1			$\dots k_i \dots$			k_n		
↓			↓			↓		
b_{1k_1}	$\dots b_{jk_1} \dots$	b_{mk_1}	b_{1k_i}	$\dots b_{jk_i} \dots$	b_{mk_i}	b_{1k_m}	$\dots b_{jk_m} \dots$	b_{mk_m}

Donde:

Son las constantes del controlador.

k_i : Dependiendo del tipo de controlador n pueden ser 3 si es de tipo PID no lineal o 5 si es de tipo deslizante

Son los números binarios resultado de la transformación de las constantes de

b_j base diez a base dos.

El número de dígitos binarios m que el algoritmo de optimización utiliza es 52

Restricciones:

Dado que las variables de decisión son de tipo binario se tiene (2.26)

$$b_j \in \{0,1\} \quad (2.26)$$

Dentro de la simulación existen variables de salidas de controladores que solo pueden variar dentro de ciertos rangos, esas restricciones han sido solventadas dentro del propio modelo con elementos de saturación.

Diagrama de Flujo del Algoritmo Genético

Un algoritmo genético (GA) se basa en el proceso de selección natural para resolver problemas de optimización. Este algoritmo es cíclico y se repite hasta que se cumpla una condición de convergencia.

Este algoritmo se diferencia de otros en que el mismo busca mínimos o máximos globales y no locales, por lo mismo, su tiempo de cálculo puede extenderse en exceso si no se plantean de forma adecuada los límites para las variables de decisión.

En el presente proyecto se usó el paquete de Matlab® llamado "Global Optimization Toolbox", en el cual se ha implementado un algoritmo de optimización genético con búsqueda de mínimos globales. Se usó este paquete y no se implementó el algoritmo de forma manual, debido a que el aplicativo permite ejecutar en una sola simulación de Simulink varios individuos a la vez, en cambio al hacerlo de forma manual se tendría que ejecutar la simulación en Simulink un individuo a la vez.

En la Figura 2.11 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo genético usado en el presente proyecto.

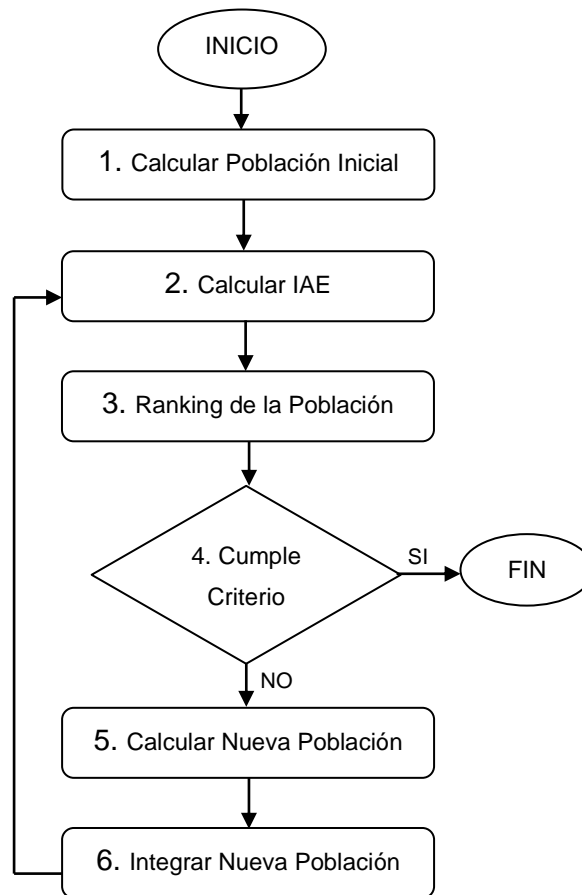


Figura 2.11 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Optimización

1. **Calcular Población Inicial:** Primero se calculó de forma aleatoria una población de individuos, donde cada individuo representa las variables de decisión (Constantes de los controladores en binario).
Se debe tener cuidado con el tamaño de la población, puesto que una muy grande puede desembocar en tiempos de cálculo muy elevados.
2. **Calcular IAE:** Para cada individuo de población se calcularon los índices de error absoluto.
Aquí se aprovechó la utilidad de Matlab que permite usar Simulink para simular en una sola corrida todos los individuos de la población.
3. **Ranking de la Población:** Se ordenó a la población de manera que los individuos que obtuvieron los mejores IAE queden en el top del ranking.
4. **Cumple Criterio:** Se analiza si los individuos de la población actual cumplen con el criterio de convergencia.
Con respecto al criterio de convergencia, se puede determinar de varias formas, en el proyecto actual el criterio se determina comparando el mejor valor de IAE de la generación actual con el mejor de la anterior. Si los valores son diferentes el criterio

no se ha cumplido aún, si son relativamente iguales entonces el criterio se ha cumplido.

5. Calcular Nueva Población: Si no se ha cumplido el criterio de convergencia, se calculan los nuevos individuos de la población mediante las llamadas operaciones genéticas, en las que se incluyen la reproducción, mutación, movimiento, cruce y creación de nuevos individuos de forma aleatoria.

El número de individuos de la población inicial, así como la cantidad y proporción de nuevos individuos que reemplazan a los que tengan los peores valores de IAE se eligen de forma automática por el aplicativo de Matlab®.

6. Integrar Nueva Población: Una vez se han calculado los nuevos individuos, estos reemplazan a los que en el paso dos obtuvieron los peores valores de IAE y el proceso se repite de forma iterativa.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se explicó en el capítulo 2 el proyecto de titulación está dividido en dos fases, primero se presentan los resultados para la fase uno (modo máxima transferencia de potencia) y luego para la fase dos (seguimiento de una referencia de potencia).

3.1 RESPUESTA DE POTENCIA (FASE 1)

En la fase 1 el aerogenerador se encuentra entregando toda la energía que el viento se lo permite.

Se conectó una carga variable en la barra B2 del sistema de pruebas que se presentó en la Figura 2.2 y se ingresó el perfil de viento que se muestra en Figura 3.1 en el aerogenerador.

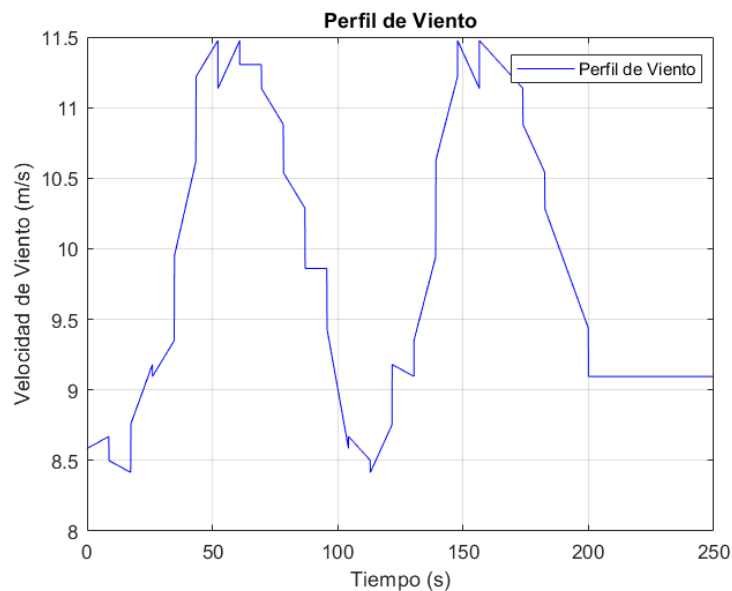


Figura 3.1 Perfil de Viento usado para la Prueba

El perfil de viento usado se tomó de una base de datos proporcionada por el INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) de donde se tenía datos de velocidad de viento para 186 días. Mediante agrupamientos se determinó varias curvas características y se escogió la que tenía un comportamiento más dinámico, esto para poner a prueba el desempeño de los controladores ante este tipo de comportamiento de viento.

En la Figura 3.2 se muestra el resultado de 200 segundos de simulación, se presenta en rojo la potencia generada por la turbina eólica, en azul la potencia que consume la carga (medida por el PLL2) y en negro la potencia que suministra y absorbe la barra infinita.

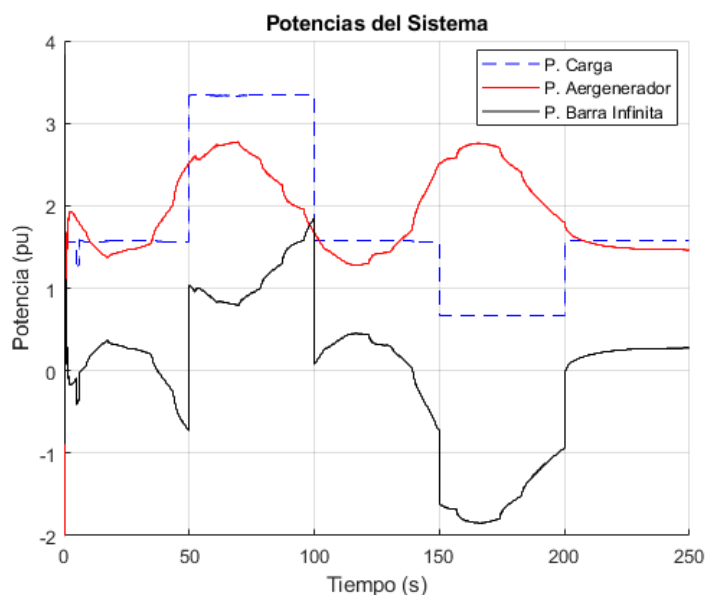


Figura 3.2 Potencias del Sistema para un Perfil de Viento

En este modo de trabajo se pueden presentar tres situaciones:

- La turbina eólica genera más energía de la que necesita la carga:
La turbina suministra toda la potencia que la carga necesita y el excedente se inyecta al sistema eléctrico por la barra infinita (se vende energía al sistema).
Por ejemplo, esto se puede ver en la Figura 3.2 de 150 a 200 segundos
- La turbina genera menos energía de la que necesita la carga:
La barra infinita suministra la diferencia de potencia que la turbina no puede generar para cubrir la demanda (se compra energía del sistema).
Por ejemplo, esto se puede ver en la Figura 3.2 de 50 a 100 segundos
- La turbina genera la misma potencia que la que necesita la carga:
En este caso la turbina suministra la potencia que la carga necesita y no se absorbe o se inyecta energía desde la barra infinita.
Esto sucede solamente en instantes de tiempo, debido a que en la realidad viento y demanda son variables en el tiempo.
Por ejemplo, en la Figura 3.2 se puede apreciar el cruce de generación y demanda a los 50 segundos de simulación.

3.2 CONTROL DE LA CORRIENTE DEL INVERSOR (FASE 1)

Se implementaron algoritmos deslizantes en el control de corriente en eje directo y de cuadratura del inversor. En los SMC se implementó la ganancia no lineal propuesta.

Se usó la estructura de control mostrada en la Figura 2.5 y las ecuaciones de control descritas en (2.14) y (2.15).

3.2.1 RESULTADOS DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Una vez implementados los controladores se procedió a sintonizar los dos controladores deslizantes.

Para esto se siguió la metodología descrita en la sección 2.5, donde el proceso de optimización tomo alrededor de 8 horas.

En la Tabla 3.1 se muestran los valores encontrados por el proceso de optimización genético, además posterior al algoritmo genético se aplicó calibración fina para ajustar más los parámetros de las ecuaciones de control.

Tabla 3.1. Parámetros de los Controladores de Corriente

Constante	Valores para eje directo	Valores para eje de cuadratura
K_D	2.4478	4.1678
δ	8.9542	15.8542
λ_0	2025 e+5	50 e+5
k_p	10.0241	10.0241
k_i	80.1	1250.1
t_0	5.00 e-6	5.00 e-6
τ	4.00 e-4	4.00 e-4
k	1.0636	1.0636

3.2.2 RESPUESTA DE LOS CONTROLADORES DE CORRIENTE

Para probar el desempeño de los controladores se les sometió a una entrada tipo pulso de 0.5 (pu) de magnitud y de 0.15 segundos de duración.

En la Figura 3.3 se presentan los resultados para la corriente en eje Directo, en esta se ve que el sistema es capaz de seguir la referencia ingresada con un sobre impulso de 10 por ciento y un tiempo de estabilización de 32.5 (ms).

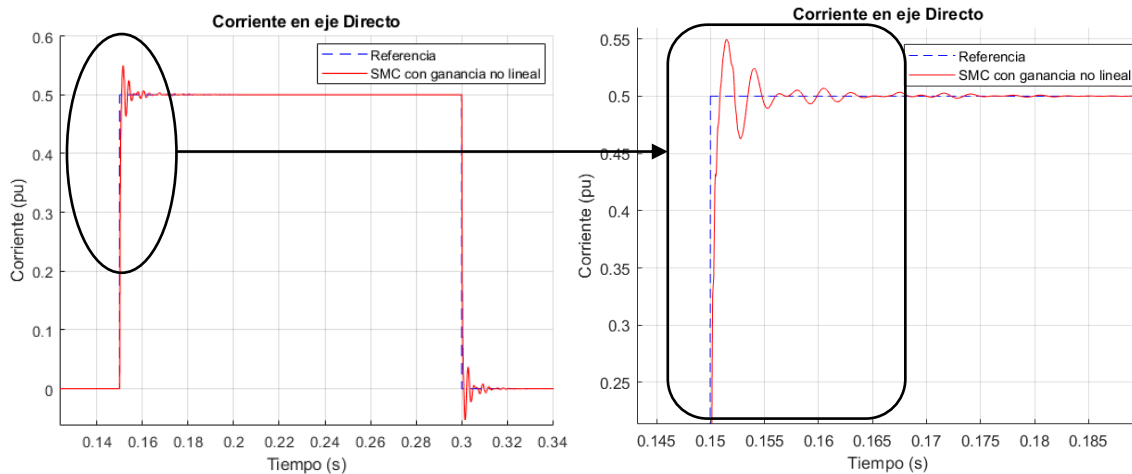


Figura 3.3 Respuesta de corriente en eje Directo

En la Figura 3.4 se presenta la salida del controlador de corriente en eje directo donde se ve la influencia de la ganancia no lineal (se muestra en la Figura 3.5).

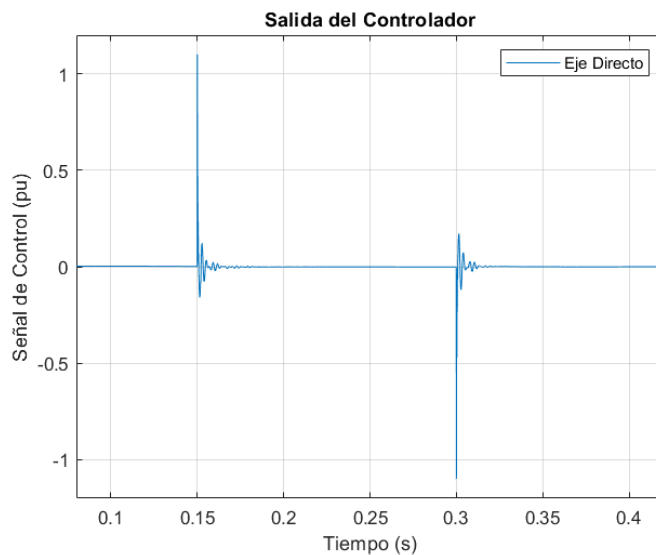


Figura 3.4 Salida del controlador SMS en eje Directo

En la Figura 3.4 y en la Figura 3.5 se puede apreciar el trabajo de la propuesta no lineal. La ganancia de la componente discontinua del controlador se calcula en función del error del sistema. Cuando existe un cambio repentino en la referencia, el error crece de forma abrupta haciendo que la ganancia crezca en la misma proporción, que a su vez hace que el efecto de la parte discontinua del contador sea más fuerte y empuje nuevamente al sistema a la referencia.

Una vez el error se hace cero, el valor de la ganancia disminuye hasta un valor mínimo, así mismo la acción de la parte discontinua disminuye dando paso a la acción continua del controlador que se encarga de mantener al sistema “montado sobre la referencia”.

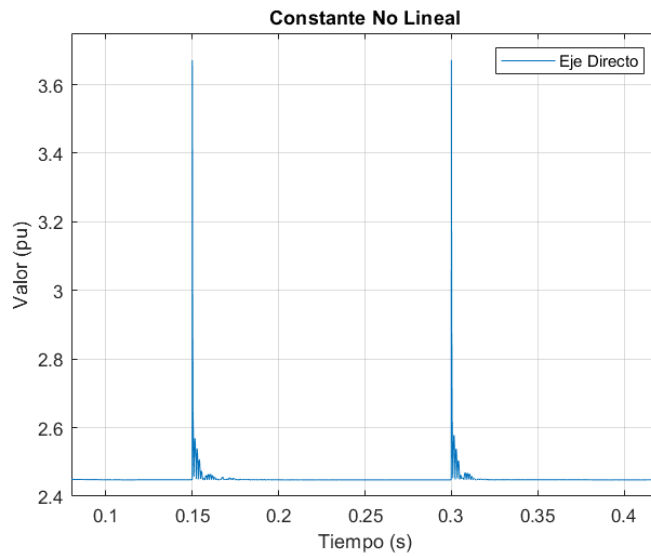


Figura 3.5 Valor de la ganancia no lineal en eje Directo

De igual manera que en eje directo, en la corriente en eje de cuadratura se ingresó una referencia tipo pulso de 0.5 (pu) de magnitud y 0.3 segundos de duración.

En la Figura 3.6 se presenta los resultados donde se ve que el sistema es capaz de seguir la referencia con un 4.32% de sobreimpulso y 25 (ms) de tiempo de estabilización.

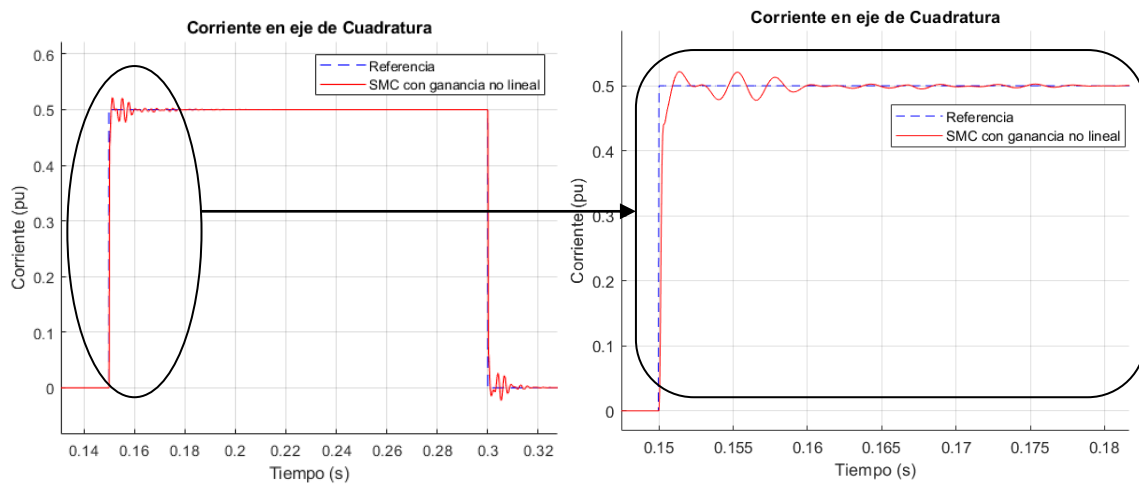


Figura 3.6 Respuesta de corriente en eje de Cuadratura

En la Figura 3.7 se presenta la salida del controlador de corriente en eje de cuadratura donde también se ve la influencia de la ganancia no lineal (se muestra en la Figura 3.8).

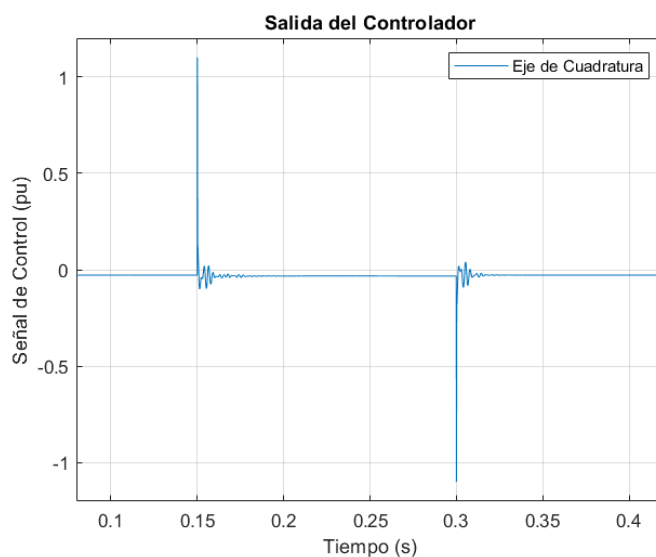


Figura 3.7 Salida del controlador SMS en eje de Cuadratura

En la Figura 3.7 y en la Figura 3.8 se puede apreciar el trabajo de la propuesta no lineal. De igual manera que en eje directo se ve que la ganancia crece de forma repentina cuando se produce un cambio brusco en la entrada del controlador haciendo que la acción discontinua sea más fuerte. Esta acción es momentánea y se reduce a medida que el error se hace cero.

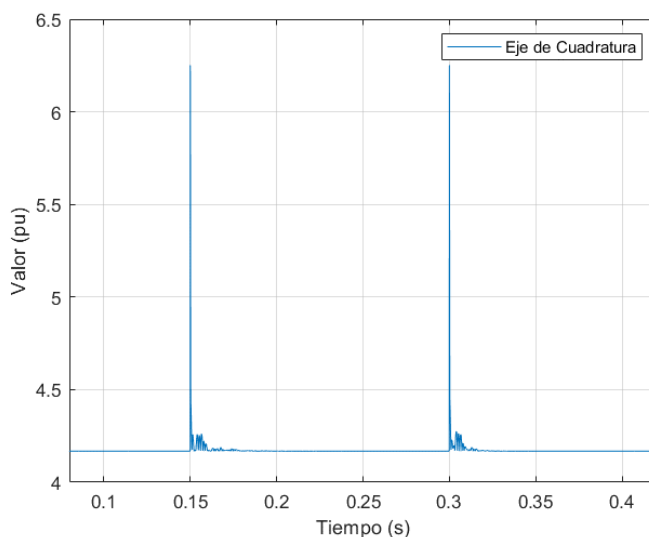


Figura 3.8 Valor de la ganancia no lineal en eje de Cuadratura

3.3 CONTROL DE VOLTAJE DE ENLACE DC (FASE 1)

En la Fase 1 el control del voltaje del enlace DC del convertor completo de frecuencia se encuentra en cascada con el control de corriente en eje directo.

Para este tipo de control se escogió uno de tipo PID en el que se implementó la ganancia no lineal en función del error.

El esquema de control usado fue el de la Figura 2.6 y la ecuación de control es la que se presentó en (2.23).

3.3.1 RESULTADOS DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

Al igual que con los controladores de corriente se procedió a sintonizar el controlador de voltaje usando algoritmos genéticos.

El proceso de optimización tomó alrededor de 14 horas y los resultados de este se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Ganancias para el control de Voltaje DC

Constante	Valores
K_D	13.5107
k_p	2.6104
k_i	122.1468
k_d	4.0 e-7

El controlador sintonizado fue de tipo PID, sin embargo, del proceso de optimización se obtuvo que la constante de la parte derivativa es prácticamente cero, por lo que en la práctica el controlador final es uno de tipo PI con una ganancia no lineal.

3.3.2 RESPUESTA DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE DC

Para probar el desempeño del controlador se ingresó una señal de entrada de tipo escalón de 1 (pu) de magnitud.

En la Figura 3.9 se presenta el resultado obtenido para 3 segundos de simulación. En rojo se puede ver el voltaje DC y en azul la referencia ingresada.

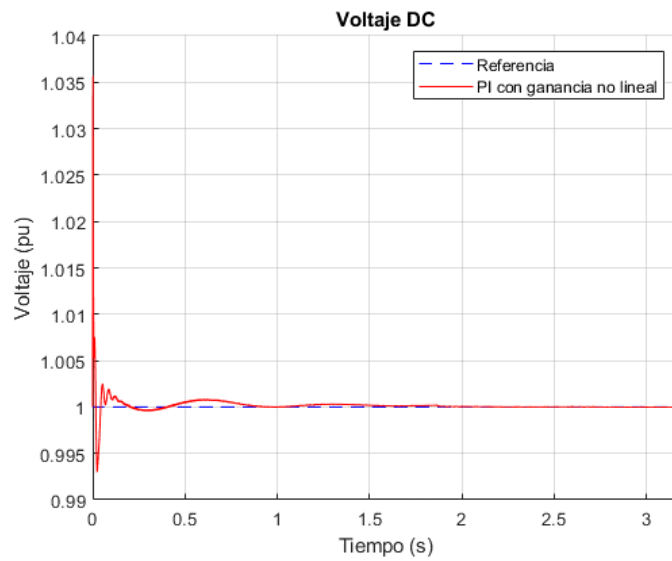


Figura 3.9 Respuesta del voltaje DC de acople

En la Figura 3.9 se puede evidenciar que el controlador implementado hace que el sistema siga la referencia con un 3.5 por ciento de sobre impulso y un tiempo de estabilización de dos segundos aproximadamente.

En la Figura 3.10 se muestra salida del controlador, la cual se ingresa como referencia en el control de corriente en eje directo.

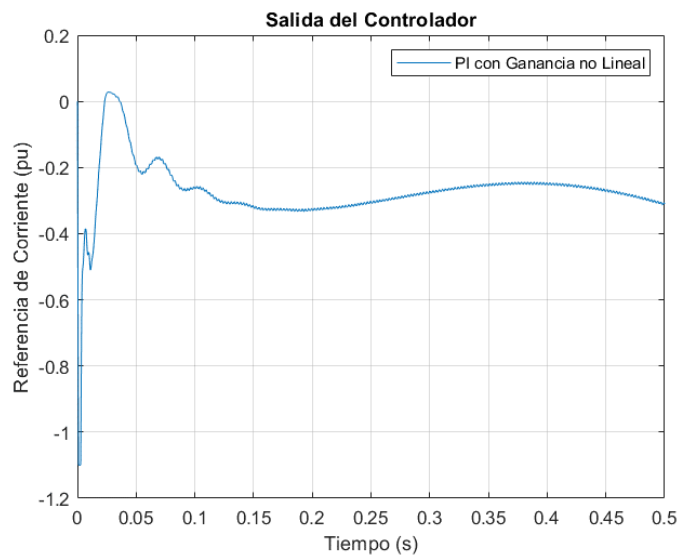


Figura 3.10 Salida del controlador PI no lineal

En la Figura 3.10 y en la Figura 3.11 se puede ver el efecto de la ganancia no lineal implementada en el controlador PI. Cuando la referencia tipo paso ingresa al sistema, provoca que el error crezca de forma repentina, al mismo tiempo la ganancia crece de forma proporcional al error haciendo que la acción del controlador sea muy fuerte. Una vez

que el error disminuye, también disminuye la ganancia atenuando el efecto del controlador en el sistema. Cuando el error se hace cero la ganancia no lineal se transforma en una constante, que en el presente caso es de 13.51.

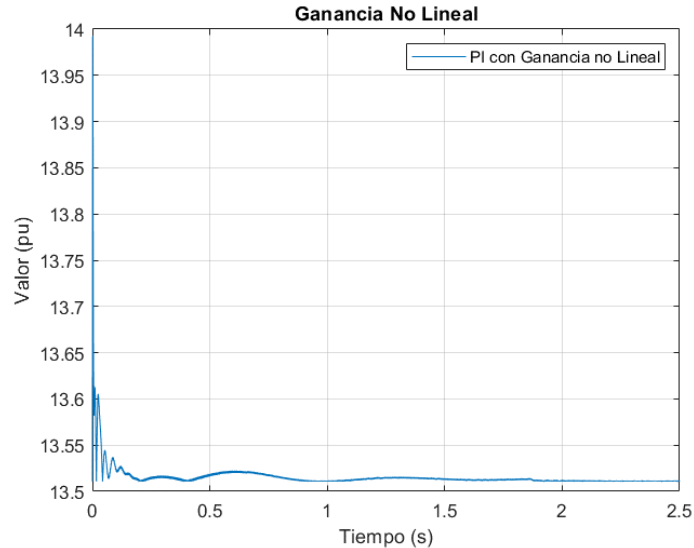


Figura 3.11 Valor de la ganancia no lineal

La influencia de la ganancia no lineal en el sistema hace que el mismo tenga una rápida reacción sin sacrificar el tiempo de estabilización por oscilaciones que pueden aparecer por efecto de ganancias muy altas que pueden empujar al sistema hacia un estado no estable.

3.4 CONTROL DE CORRIENTE DEL ENLACE DC (FASE 2)

En la fase uno de implementación se probaron las propuestas con ganancias no lineales, de donde se obtuvieron muy buenos resultados en el desempeño de los controladores.

Sin embargo, como se expuso en la metodología existen muchas ventajas en hacer que el aerogenerador trabaje siguiendo referencias de potencia en lugar de trabajar en el punto de máxima transferencia.

Para hacer que el sistema siga referencias de potencia, fue necesario cambiar las estructuras de control mostradas en la Figura 2.5 y Figura 2.6 a las que se presentó en la Figura 2.7 y la Figura 2.8.

Las principales diferencias entre las estructuras de control de la fase uno y dos son:

- En la fase uno, el control de voltaje DC se encuentra en cascada con el control de corriente en eje directo, en cambio, en la fase dos se reemplaza el control de voltaje por el control de Potencia Activa suministrada al sistema.
- En la fase uno el control de velocidad rotórica se encuentra en cascada con el control de corriente DC del enlace, en cambio, en la fase dos se reemplaza el control de velocidad por el de voltaje DC del sistema.
- En la fase uno se encuentra dentro de las estructuras de control variables del convertidor DC-DC y DC-AC mezcladas, en cambio en la fase 2, cada convertidor tiene su estructura de control con variables independientes.
- En la fase dos no se controla la velocidad rotórica de la máquina, dado que la estabilización de voltaje y frecuencia es realizada por el convertidor completo AC-AC, sin embargo, la misma se supervisa para que no se salga de los límites de operación.

Para el control de corriente DC del puente de enlace entre el rectificador y el inversor se eligió un control de tipo PID no lineal. Se eligió este control dado que para regular la corriente solo se controla un IGBT, por lo que basta con usar una estructura relativamente sencilla de control.

Al igual que en la fase uno, se siguió la metodología descrita en la sección 2.5 para la sintonización de las constantes del controlador.

En la Tabla 3.3 se presentan los resultados del proceso de optimización, de manera similar a la fase uno, del proceso de optimización se obtuvo que la constante derivativa es cero.

Tabla 3.3. Parámetros del control de corriente DC

Constante	Valores
K_D	21.000
k_p	1.493
k_i	39.787
k_d	6.000 e-7

En este caso el proceso de optimización tomo un lapso de 4 horas aproximadamente, para después someter al sistema a un proceso de calibración fina para ajustar el tiempo de estabilización y el sobreimpulso.

Una vez se ha realizado la sintonización de corriente se tuvo que seguir el mismo procedimiento para el voltaje DC, esto debido a que en la fase uno las constantes de este

se calibraron cuando estaba en cascada con el control de corriente en eje directo y controlaba el inversor, en cambio en la fase dos controla el conversor DC-DC y se encuentra en cascada con el control de corriente DC.

En la Tabla 3.4 se muestra los resultados de la sintonización del controlador de voltaje en la fase 2 comparados con los valores obtenidos en la fase uno.

Tabla 3.4 Ganancias para el control de Voltaje DC para fase uno y dos

Constante	Valores para la fase Uno	Valores para la fase Dos
K_D	13.5107	3.1691
k_p	2.6104	1.6858
k_i	122.1468	21.4753

3.4.1 RESPUESTA DEL CONTROLADOR DE CORRIENTE DC

Como el controlador de Corriente se encuentra en Cascada con el de Voltaje, para evaluar el desempeño del controlador, primero se desconectó la referencia del control de corriente y se la reemplazó por una señal tipo pulso de 0.5 (pu) de magnitud y de 200 (ms) de duración.

En la Figura 3.12 se presenta la respuesta del sistema, donde se ve que la corriente es capaz de seguir la referencia con un sobreimpulso de 2.64 por ciento y un tiempo de estabilización de 7 (ms).

Se debe tener en cuenta que el conversor que se está controlando es de tipo Elevador Reductor por lo que no se puede eliminar el rizado del sistema.

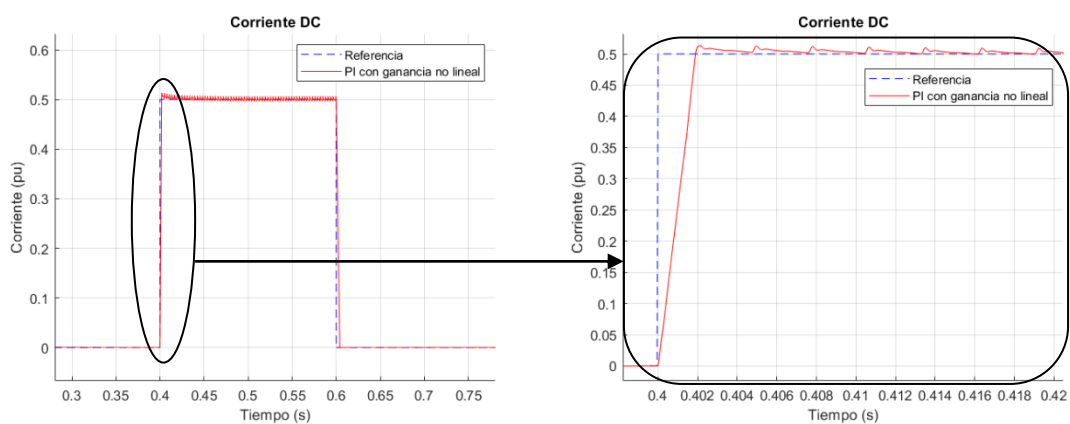


Figura 3.12 Respuesta de Corriente DC

En la Figura 3.13 se muestra la salida del controlador de corriente y en la Figura 3.14 se presenta la ganancia no lineal calculada en función del error.

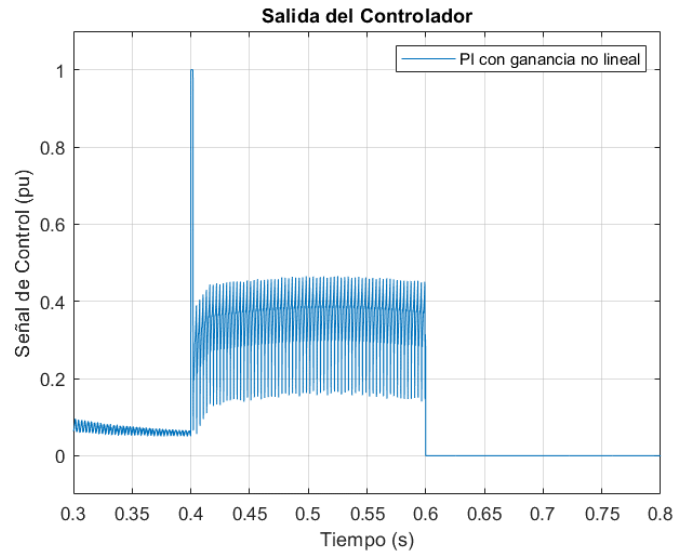


Figura 3.13 Salida del controlador PI con ganancia no lineal para corriente DC

En la salida del controlador se puede notar el efecto de la ganancia no lineal. A los 0.4 (s) que entra el pulso al sistema el error crece de forma repentina haciendo que la ganancia no lineal del controlador también crezca rápidamente empujando al sistema hacia la referencia.

Cuando ha pasado la perturbación el error vuelve a valores cercanos a cero y la ganancia disminuye hasta volverse casi constante.

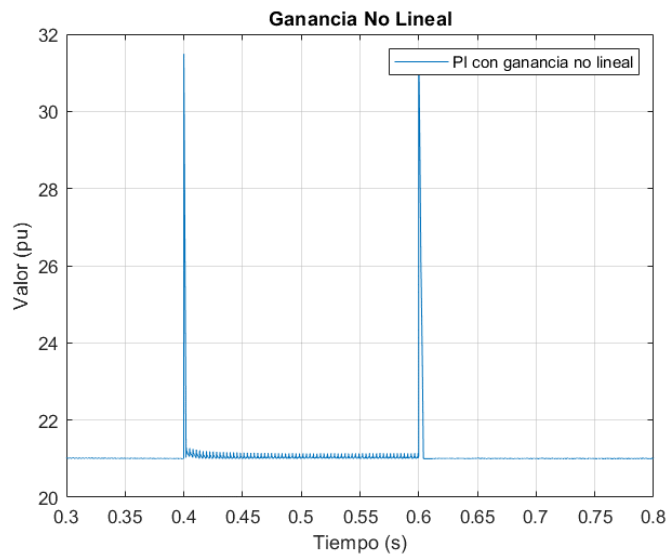


Figura 3.14 Valor de la ganancia no lineal para corriente DC

3.5 CONTROL DE POTENCIA ACTIVA (FASE 2)

Para el control de Potencia se usó el esquema de control que se presentó en la Figura 2.7 y un control de tipo PID con ganancia no lineal cuya ecuación se mostró en (2.23).

3.5.1 RESULTADOS DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

En la Tabla 3.5 se presentan los resultados del proceso de sintonización para el controlador de potencia mediante el algoritmo de optimización genética que se presentó en la sección 2.5.

Tabla 3.5. Parámetros del controlador de Potencia

Constante	Valores
K_D	2.5107
k_p	1.2000
k_i	90.1468
k_d	≈ 0

El proceso de optimización tomó alrededor de 28 horas, de manera similar que en los controladores antes descritos la constante derivativa fue aproximadamente cero, por lo que el controlador implementado se simplificó a un PI no lineal.

3.5.2 RESPUESTA DE LOS CONTROLADORES

Para probar el controlador de potencia se siguió el siguiente procedimiento:

1. Se conectaron tres PLL en el sistema de prueba (Figura 2.2), uno en la barra B2 donde se conectó una carga que varía por medio de interruptores de potencia, uno en la barra B4 para medir la potencia total que se inyecta en el sistema eléctrico a través del transformador T2 y uno en la barra B1 para medir la potencia que se entrega y recibe de la barra infinita.
2. Se ingresó un perfil dinámico de demanda, con entradas y salidas repentinas de carga para probar el desempeño de los controladores.
3. La duración de la simulación fue de 250 segundos, sin embargo, el tiempo que le toma al procesador en realizar el cómputo de los resultados fue de aproximadamente 28 minutos.

En la Figura 3.15 se presenta el comportamiento del sistema en el seguimiento de referencias de potencia. Se ha realizado un acercamiento en 50 segundos para visualizar

el desempeño del controlador, en donde se puede apreciar un sobre impulso de 0.64% y un tiempo de estabilización de 220 (ms) (13 ciclos aproximadamente).

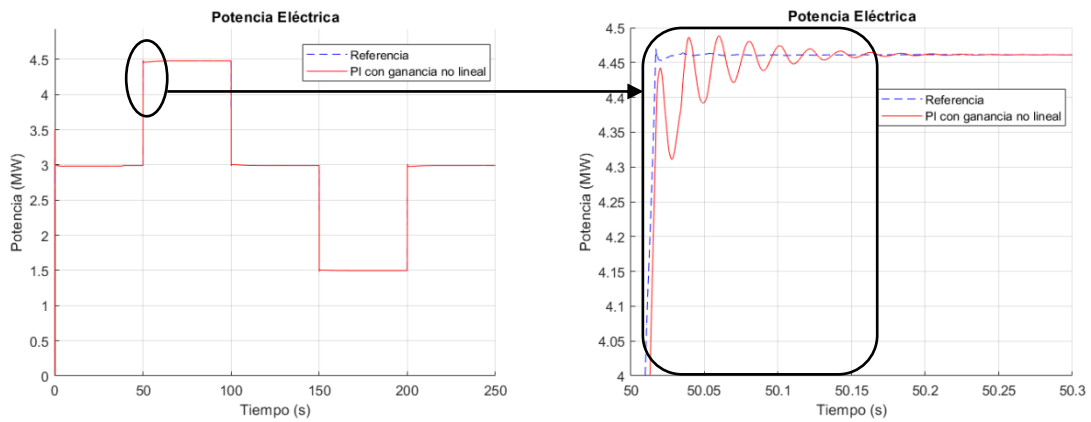


Figura 3.15 Respuesta de Potencia Activa Suministrada por la planta Eólica

Cabe aclarar que la referencia que se encuentra siguiendo el controlador no es la potencia demandada por la carga, si no la potencia medida por el sistema PLL que se encuentra conectado en la barra B2.

En la Figura 3.16 se muestra la salida del controlador y en la Figura 3.17 el valor de la ganancia no lineal, cada una con un acercamiento en 50 segundos.

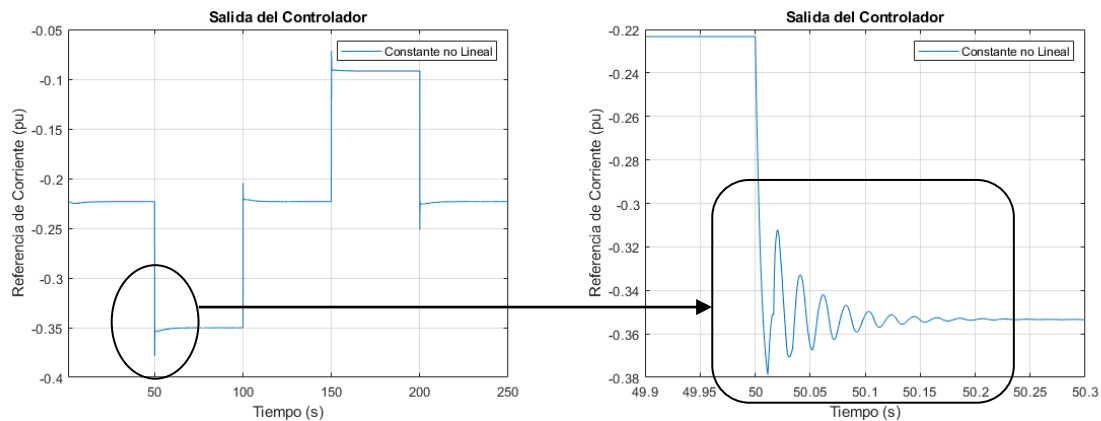


Figura 3.16 Salida del controlador PI con ganancia no lineal

En la Figura 3.7 se evidencia el efecto de la propuesta no lineal. Cuando cambia súbitamente la referencia, la ganancia cambia drásticamente haciendo que la acción del controlador sea más fuerte, sin embargo, este crecimiento es momentáneo y desaparece cuando el error del sistema se acerca a cero.

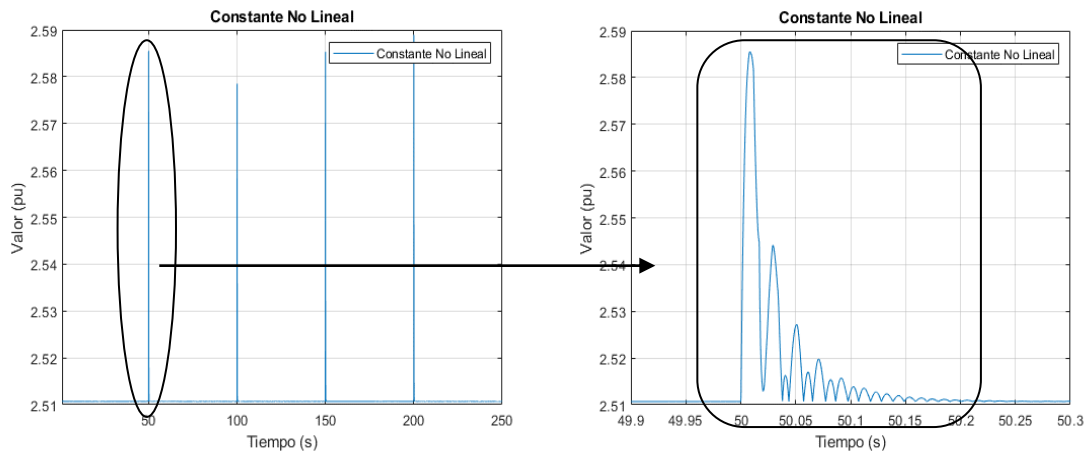


Figura 3.17 Valor de la ganancia no lineal para el control de Potencia Activa

La acción derivativa de un controlador PID tiene un comportamiento similar a la ganancia no lineal propuesta, a continuación, se presentan las principales similitudes y diferencias entra estas:

- Su principal tarea es dar velocidad de respuesta al sistema cuando se producen cambios fuertes en la referencia o aparecen perturbaciones externas.
- La acción derivativa introduce un cero al sistema, por lo que puede empujar el sistema a la inestabilidad, en cambio, la ganancia no aporta ceros, pero hace que en la ecuación de control aparezcan potencias del error, lo que también puede llevar a la inestabilidad al sistema.
- La acción derivativa tiene un desempeño adecuado en sistemas lineales, en cambio cuando el sistema presenta no linealidades la acción derivativa puede hacer que el sistema se torne inestable con mayor facilidad. [37]

Como se mencionó en el Capítulo 2, el sistema sobre el que se trabajó tiene un control de potencia reactiva y voltaje previamente implementado por los ingenieros de Hydro-Quebec (Canadá).

Se decidió no reemplazar este control por las propuestas no lineales debido a que la regulación no se la hace mediante funciones de transferencia, en cambio se lo hace en base a integradores y comparadores.

En la Figura 3.18 se puede ver la reacción del sistema ante un perfil de carga de Potencia Reactiva.

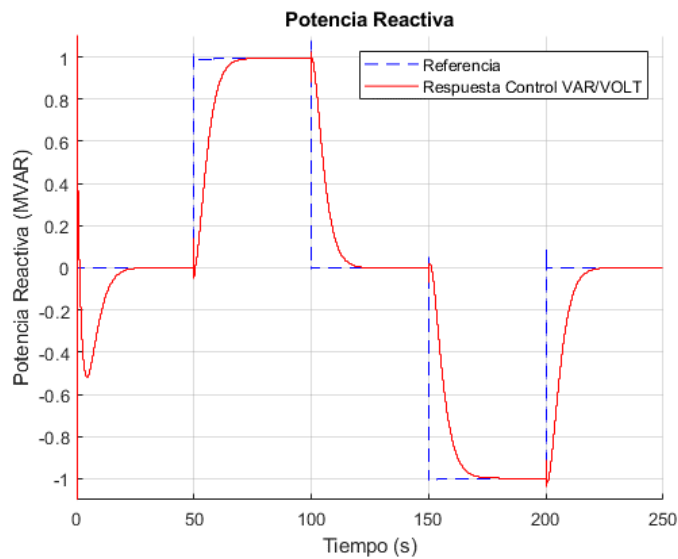


Figura 3.18 Respuesta de Potencia Reactiva con un Sistema de Control VAR/VOLT Basado en el Reporte: “Dynamic Modeling of GE 1.5 and 3.6 Wind Turbine-Generators, [38]”

En la Figura 3.19 se presenta la respuesta de corriente en eje directo y de cuadratura ante la entrada y salida repentina de carga en la barra B2.

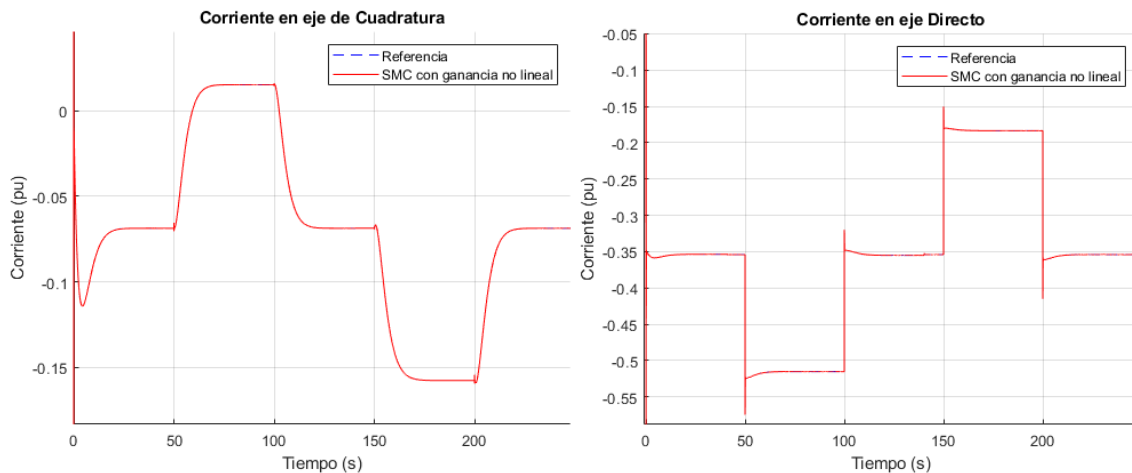


Figura 3.19 Respuesta de corriente en eje de cuadratura (izquierda) y eje directo (derecha) ante cambios bruscos de potencia activa y reactiva

Un elemento especialmente importante del convertor completo de frecuencia AC-AC es el convertor DC-DC o puente DC. Es importante que el voltaje se mantenga estable debido a que a dicho puente se pueden conectar otras fuentes de generación o sistemas de almacenamiento de energía en DC.

En la Figura 3.20 se muestra como afectó al puente DC la entrada y salida repentina de carga, la cual provocó un sobreimpulso de aproximadamente 3.28% y una oscilación de

casi dos segundos. Estos valores se encuentran dentro del rango de $\pm 5\%$ de variación permitido en este tipo de sistemas.

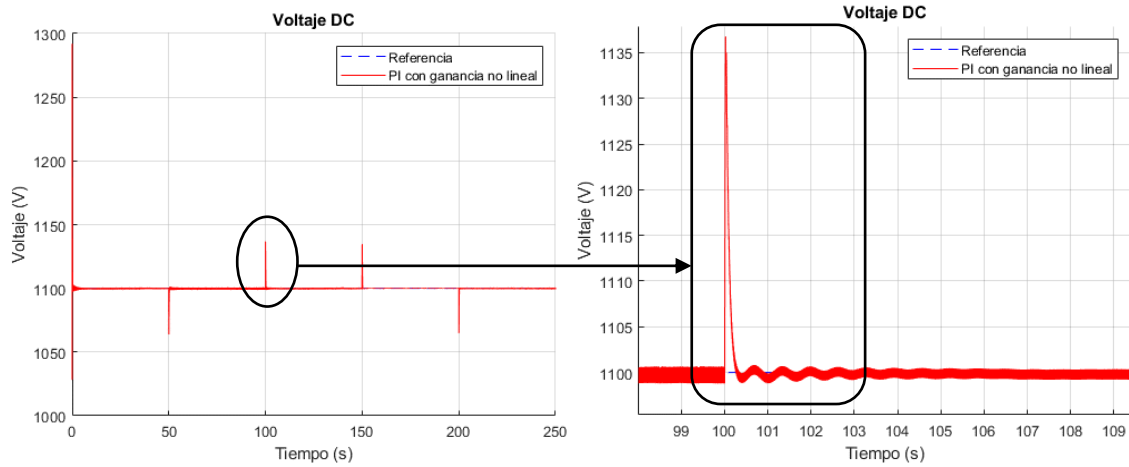


Figura 3.20 Respuesta de Voltaje DC ante Entrada y Salida Brusca de Carga

Finalmente, en la Figura 3.21 se presenta la respuesta de corriente del convertor DC-DC en la cual se ve reflejada la forma de onda de la potencia activa, esto debido a que en condiciones ideales (sin pérdidas en los elementos) la potencia activa AC debe ser igual a la DC.

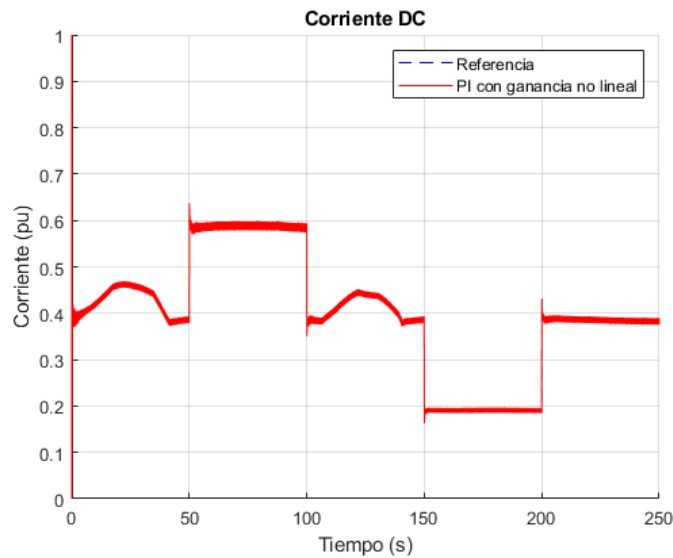


Figura 3.21 Respuesta de la Corriente DC ante Entrada y Salida Brusca de Carga

En el Anexo E se presenta una prueba para viento y carga dinámicos donde se presentan todas las señales involucradas en el presente trabajo de titulación.

4 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan todas las pruebas implementadas en el aerogenerador.

Las pruebas han sido divididas en dos secciones, una primera donde se comparan a las propuestas no lineales con controladores lineales de tipo PID y una segunda donde se somete al aerogenerador a diferentes perfiles de viento y se analiza el desempeño de los controladores antes estas situaciones.

4.1 PRUEBAS COMPARATIVAS CON CONTROLADORES LINEALES

En el presente trabajo de titulación se planteó tomar controladores SMC y PID convencionales y sobre ellos implementar ganancias no lineales.

Para evaluar el desempeño de las propuestas, a continuación, se compara el comportamiento del sistema cuando se le somete a las mismas referencias y el sobre él se han implementado controladores lineales y no lineales.

4.1.1 COMPARACIÓN DEL CONTROLADOR DE CORRIENTE

Como se mencionó en el Capítulo 2, los controladores desarrollados se probaron en un sistema eléctrico que se implementó tomando como base un ejemplo de la librería SimPowerSystems™, en el cual ingenieros de Hydro Quebec–Canadá implementaron y sintonizaron controladores PID lineales.

Para la corriente del inversor se implementó un controlador deslizante con la ganancia de la parte discontinua no lineal. En esta prueba se desea evaluar cuanto mejora el desempeño del sistema al usar la propuesta no lineal frente a la lineal.

En la Figura 4.1 se presentan los resultados de someter al sistema a una entrada tipo pulso de 0.5 (pu) de magnitud y 150 (ms) de duración. En azul se muestra la señal de referencia ingresada, en rojo la respuesta del sistema con un controlador PID lineal y en negro la respuesta con un SMC no lineal.

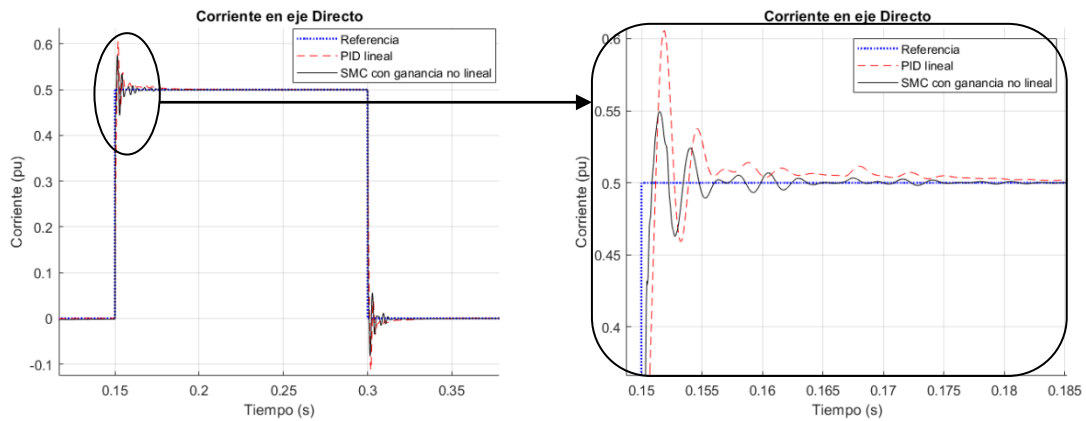


Figura 4.1 Respuesta de corriente en eje directo ante un pulso en la entrada

En la Tabla 4.1 se presentan los resultados de ambos controladores, donde se puede evidenciar una mejora en lo que respecta a tiempo de establecimiento y en la magnitud del sobre impulso.

El efecto de implementar la ganancia no lineal hace que la respuesta del sistema sea más estable, debido a que el controlador se vuelve adaptativo gracias a la ganancia no lineal, la cual ejerce acciones fuertes cuando el error crece súbitamente y luego cuando el sistema se encuentra en las cercanías de la referencia la acción del controlador decrece en la misma proporción que el error, haciendo que el sistema se recupere más rápido después del cambio brusco en la referencia, en cambio el PID tiene una estructura fija que hace que ejerza la misma acción cuando el error es grande o cuando el sistema se encuentra en las cercanías de la referencia.

Tabla 4.1. Desempeño de la propuesta SMC y del controlador PID de la corriente en eje directo

Control Implementado	IAE	Sobre Impulso	Tiempo de Establecimiento
SMC con ganancia no lineal	30.92	10%	32.5 (ms)
PID lineal	46.02	21%	80 (ms)
Mejora obtenida	32.82%	110%	59.38%

En la Figura 4.2 se presenta la comparación de la respuesta de la corriente en eje de cuadratura cuando se ha implementado sobre ella el control no lineal y el PID lineal.

Se ha ingresado una señal de entrada de tipo pulso al sistema de 0.5 (pu) de magnitud y de 150 (ms) de duración. Se presenta la referencia en azul, la respuesta del controlador PID en rojo y la del SMC en negro.

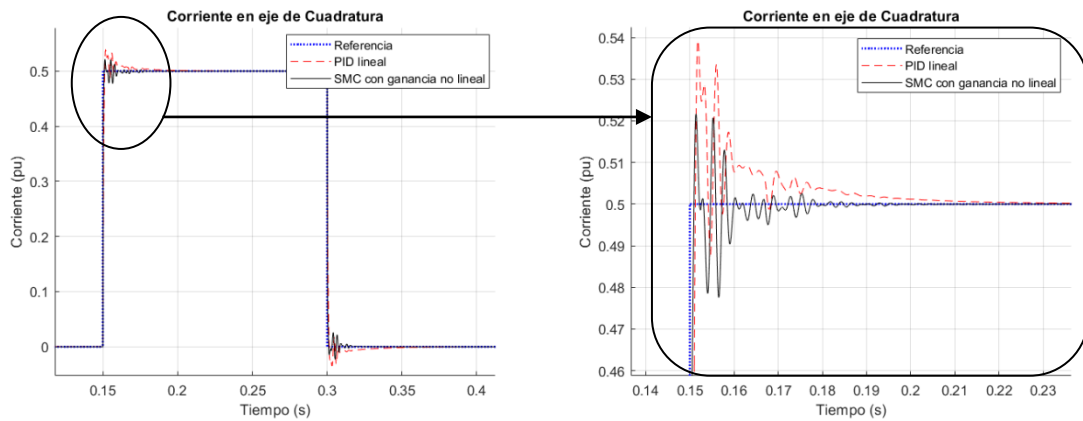


Figura 4.2 Respuesta de corriente en eje de cuadratura ante un pulso en la entrada

En la Tabla 4.2 se presentan los valores del índice de error absoluto, sobre impulso y tiempo de establecimiento para el sistema con los dos controladores implementados.

En los resultados se puede apreciar una notable mejora en el desempeño del controlador no lineal en la magnitud del sobre impulso y en el tiempo de establecimiento, sin embargo, en el IAE si bien se tuvo una mejora, la misma no es tan relevante como en los otros dos parámetros.

Tabla 4.2. Desempeño de la propuesta SMC y del controlador PID de corriente en eje de cuadratura

Control Implementado	IAE	Sobre Impulso	Tiempo de Establecimiento
SMC con ganancia no lineal	119.16	4.32%	25 (ms)
PID lineal	133.31	7.85%	75 (ms)
Mejora obtenida	10.61%	44.97%	66.6%

De esta prueba se puede rescatar que este tipo de controladores no lineales son relevantes en sistemas en los que se tiene perturbaciones o variaciones repentinas en la referencia, situaciones en las cuales los PID pueden ser muy lentos o presentar oscilaciones, sin embargo, cuando no se tienen este tipo de situaciones resultaría innecesario implementar estos controladores puesto que tienen un desempeño similar a los PID lineales, los cuales son relativamente más sencillos de implementar.

4.1.2 COMPARACIÓN DEL CONTROLADOR DE VOLTAJE DC

En esta sección se compara el rendimiento de la propuesta no lineal de controlador PID con un PID clásico.

El controlador PID no lineal se encuentra implementado en los sistemas de voltaje DC, corriente DC y en el de potencia activa. Para la comparación se ha elegido el voltaje DC debido a que sobre el mismo se tenía un PID lineal implementado y sintonizado por lo ingenieros de Hydro-Quebec.

En la Figura 4.3 se presenta el resultado de someter al sistema a una entrada de tipo escalón de 1 (pu) de magnitud. En azul se presenta la referencia, en rojo la respuesta del control PID lineal y en negro la del controlador no lineal.

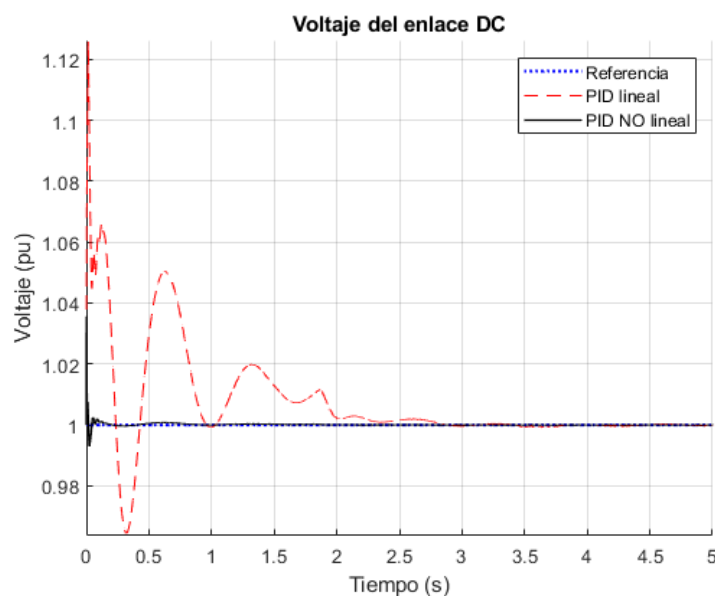


Figura 4.3 Respuesta del Voltaje DC ante una entrada de tipo escalón

En las señales anteriores se puede evidenciar una notoria mejora en la respuesta del sistema con la propuesta no lineal. En la Tabla 4.3 se presentan los valores del índice de error absoluto, sobre impulso y tiempo de establecimiento.

En esta prueba se puede ver una notoria mejora de un controlador con respecto a otro, la mayor fortaleza de los controladores adaptativos es que tienen características distintas en función de la situación actual del sistema, en cambio el controlador PID no puede cambiar su estructura para hacer que las acciones de control sean fuertes solamente cuando se las necesitan, en cambio, el controlador no lineal hace que las acciones del control disminuyan y aumenten en función del error del sistema, haciendo que cuando ya no se necesita fuerza

en el sistema la acción disminuya para que el sistema alcance rápidamente la referencia con un menor número de oscilaciones.

Tabla 4.3. Desempeño del controlador PID no lineal y lineal

Control Implementado	IAE	Sobre Impulso	Tiempo de Establecimiento
PID lineal	898.78	12.57%	6 (s)
PID no lineal	19.73	3.57%	2 (s)
Mejora obtenida	97.80%	71.6%	66.6%

Este sistema tiene características no lineales debido a que es un convertidor DC-DC de tipo reductor elevador, en donde el elemento final de control es un IGBT que recibe señales de activación o desactivación desde el controlador.

En esta prueba se evidencia el pobre rendimiento que tienen los controladores lineales en sistemas con características no lineales, en cambio se ve que la propuesta no lineal es capaz de adaptarse a las necesidades del sistema y a los cambios repentinos en la entrada de este.

4.1.3 DESEMPEÑO DEL CONTROL DE VOLTAJE ANTE PERTURBACIONES

Una vez se ha probado el desempeño de los controladores ante entradas con alta dinámica ahora se pretende evaluar el desempeño de los controladores no lineales ante perturbaciones externas al sistema.

Para esta prueba se escogió la configuración de control de la Fase 1 en la que el control de voltaje DC se encuentra en cascada con el control de corriente del inversor. Se escogió esta configuración debido a que en el control de corriente se encuentra implementado el SMC y en el voltaje DC un PID no lineal.

La perturbación a la que se sometió el sistema fue una caída de voltaje de 10% de un segundo de duración en la barra infinita a los 5 (s) de haber empezado la simulación, tal como se muestra en Figura 4.4. Esta prueba es recomendada en [30] para evaluar la respuesta de los controladores en el sistema.

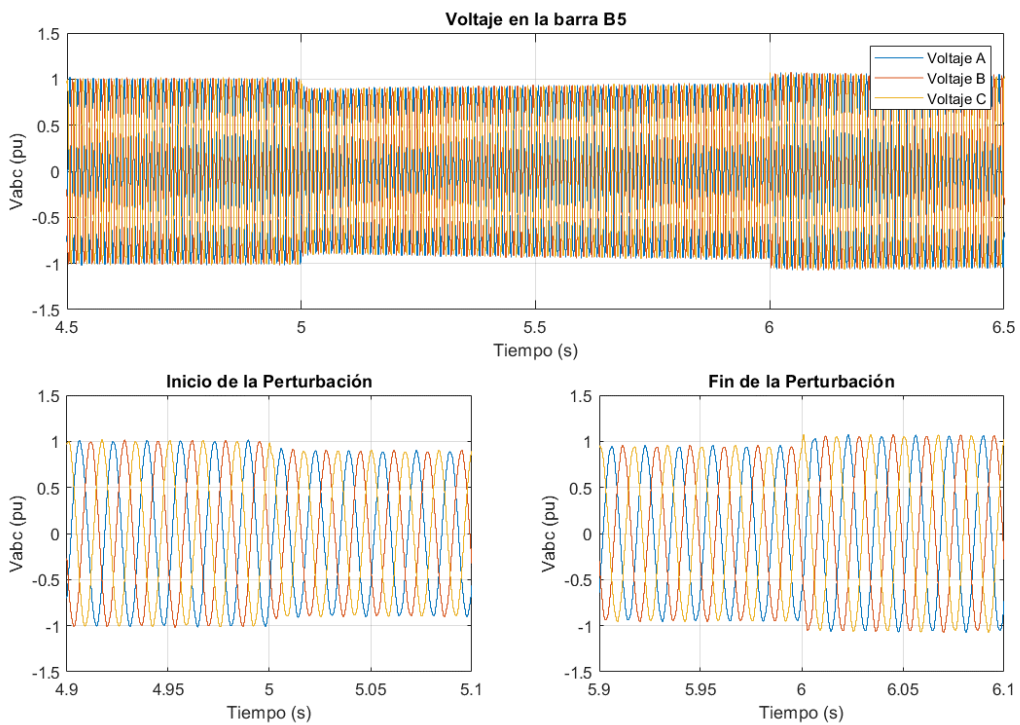


Figura 4.4 Caída de voltaje en el sistema medida en la barra B5

En la Figura 4.5 se presenta la respuesta de los sistemas ante la perturbación, en azul la referencia de voltaje, en rojo la respuesta con un PID lineal y en negro la respuesta con un PID no lineal.

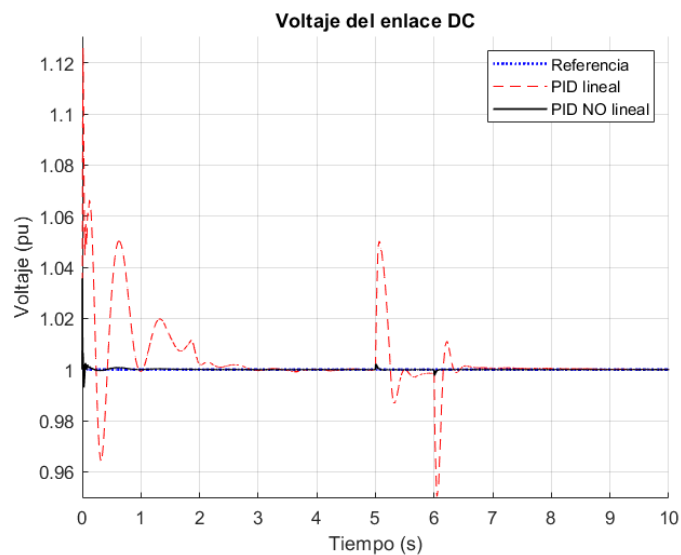


Figura 4.5 Respuesta del sistema ante una perturbación

En la Figura 4.6 se presenta un acercamiento a la respuesta para poder distinguir el desempeño del controlador no lineal.

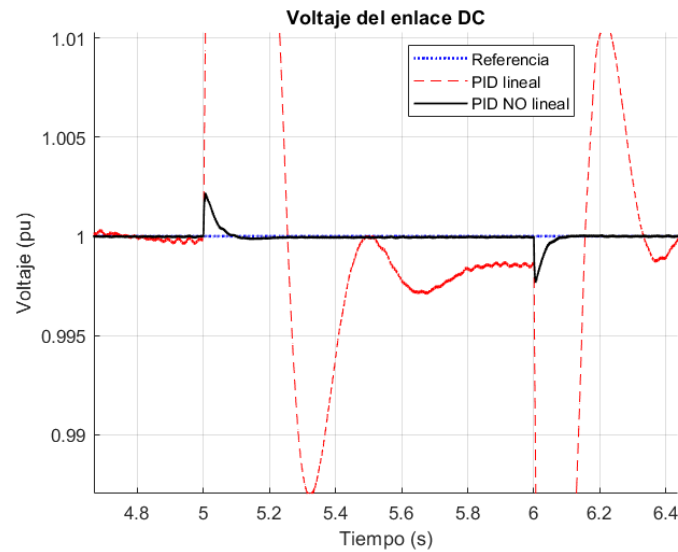


Figura 4.6 Acercamiento a la respuesta del sistema ante una perturbación

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados del desempeño de los controladores en comparación. Se puede ver una notable mejora en la respuesta del sistema cuando en este se encuentra implementado un controlador no lineal.

Tabla 4.4. Desempeño del controlador no lineal en comparación al lineal

Control Implementado	IAE	Sobre Impulso	Tiempo de Establecimiento
PID lineal	1 264.3	5%	4.5 (s)
PID no lineal	29.31	0.22%	0.25 (s)
Mejora obtenida	97.68%	95.6%	94.4%

Esta prueba destaca las ventajas de la ganancia no lineal, la cual hace que el sistema se recupere rápidamente al inicio y al final de la perturbación sin presentar oscilaciones sostenidas, es importante resaltar que no solo existen ventajas en los controladores no lineales, puesto que si están mal sintonizados pueden provocar el efecto contrario y amplificar la magnitud y duración de las oscilaciones del sistema.

4.2 PRUEBAS PARA DIFERENTES PERFILES DE VIENTO

Una vez se han comparado el desempeño de los controladores con PIDs lineales se procedió a poner a prueba a la planta eólica para diferentes perfiles de viento, esto para evaluar si el sistema es capaz de entregar potencia de forma estable. Se han considerado tres pruebas:

- Viento suficiente para suplir la demanda.
- Viento insuficiente para suplir la demanda.
- Viento fuera de los límites de trabajo del aerogenerador.

4.2.1 CASO 1: VELOCIDAD DE VIENTO SUFICIENTE PARA SUPLIR LA DEMANDA

En esta prueba se ingresó un perfil de viento constante de 10 (m/s) en el aerogenerador y se ingresó un perfil de carga en la barra B2 por medio de interruptores de potencia.

En la Figura 4.7 se presenta la respuesta del sistema, en donde en azul se presenta la referencia de potencia, en rojo la potencia suministrada por la planta eólica y en negro la potencia que entrega la barra infinita.

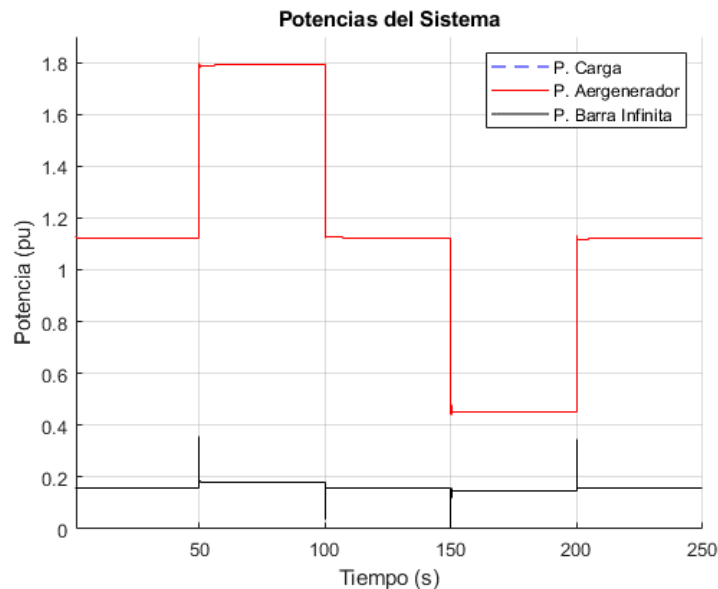


Figura 4.7 Potencias del Sistema para un Perfil de Viento Suficiente

Se debe tomar en cuenta que el aerogenerador sigue como referencia la potencia medida por el PLL en la barra B2. La potencia que se muestra en negro en la Figura 4.7 es la consumida por las líneas de transmisión y transformadores medida por un PLL que se encuentra en la barra B1.

Como resultado de esta prueba se puede concluir que los controladores y estructuras propuestas hacen que el sistema pueda seguir las referencias de potencia a las que se lo ha sometido.

4.2.2 CASO 2: VELOCIDAD DE VIENTO NO SUFICIENTE PARA EL SUMINISTRO DE POTENCIA

En esta prueba se pretende evaluar la capacidad del sistema para trabajar ante condiciones insuficientes de viento.

Cuando el aerogenerador sigue referencias de potencia en lugar de trabajar en el punto de máxima transferencia se presentan dos problemas:

- Si no existe el viento necesario para suplir la demanda, el aerogenerador empieza a frenarse, debido a que toda la energía cinética de la máquina se transforma en energía eléctrica (sin tomar en cuenta las pérdidas) y la máquina está entregando más energía de la que el viento le puede suministrar.
- En cambio, si existe más viento del necesario, toda la energía sobrante se convierte en energía cinética y el aerogenerador tiende a acelerarse.

El generador sincrónico puede operar de forma segura en un rango de velocidades que garantizan la integridad eléctrica y mecánica de la máquina, si el aerogenerador trabaja dentro de este rango no existe ningún riesgo ni inconveniente puesto que el convertidor completo AC-AC es el que se encarga de sostener la frecuencia y el voltaje.

Para afrontar los problemas antes descritos se plantearon las siguientes soluciones:

- Se escogió el rango de velocidades de 0.8 a 1.2 (pu) donde la máquina puede operar de forma segura y de 0.65 a 1.35 (pu) como límites de operación máxima. Estos valores son proporcionados en las especificaciones del generador usado en la simulación.
- Para velocidades inferiores a la nominal se salvaguarda la integridad de la máquina disminuyendo la referencia de potencia. Para esto se utilizó un esquema con histéresis, como se muestra en la Figura 4.8, en donde el término “mantener referencia” quiere decir que al sistema ingresa la última referencia que se tenía antes de entrar a la banda de histéresis.

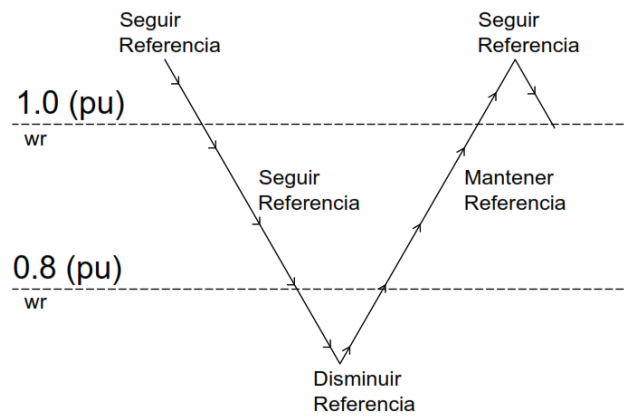


Figura 4.8 Cálculo de la Referencia de Potencia

- Para velocidades superiores a la nominal se protege al generador variando el ángulo de las aspas. Para esto también se utilizó un esquema con histéresis, tal como se muestra en la Figura 4.9. Cabe aclarar que el control de las aspas no se hace para regular la potencia, sino para disminuir la velocidad de la turbina evitando que el generador se destruya por sobre velocidad.

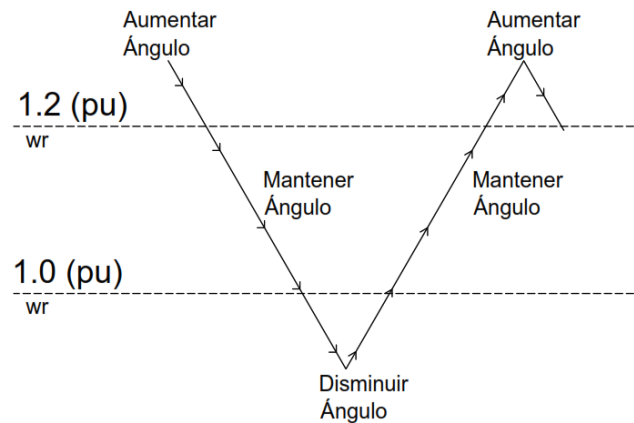


Figura 4.9 Cálculo del Ángulo de las Aspas

En la Figura 4.10 se presenta la respuesta del sistema para un perfil de carga ingresado en la barra B2 y un perfil de viento constante de 9 (m/s) ingresado en la turbina.

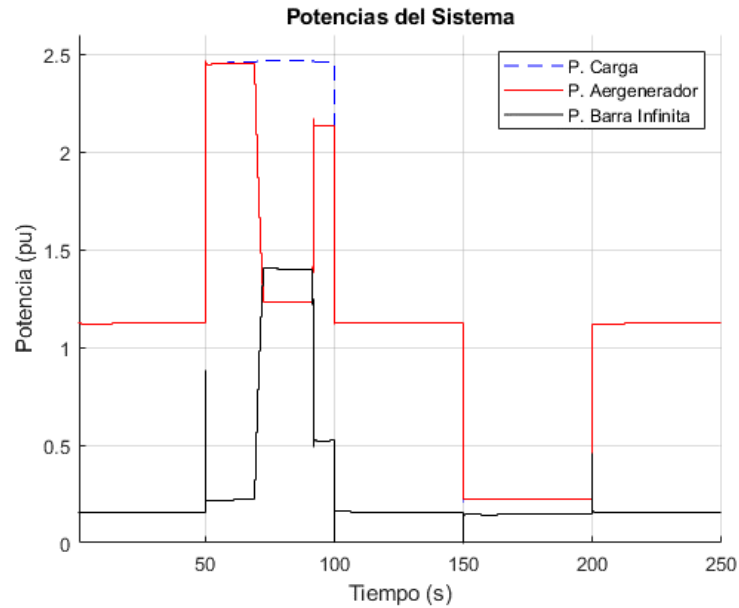


Figura 4.10 Potencias del Sistema para un Perfil de Viento No Suficiente

En la Figura 4.11 se presenta la velocidad el rotor del generador y en la Figura 4.12 se presenta el ángulo del aspa de la turbina eólica.

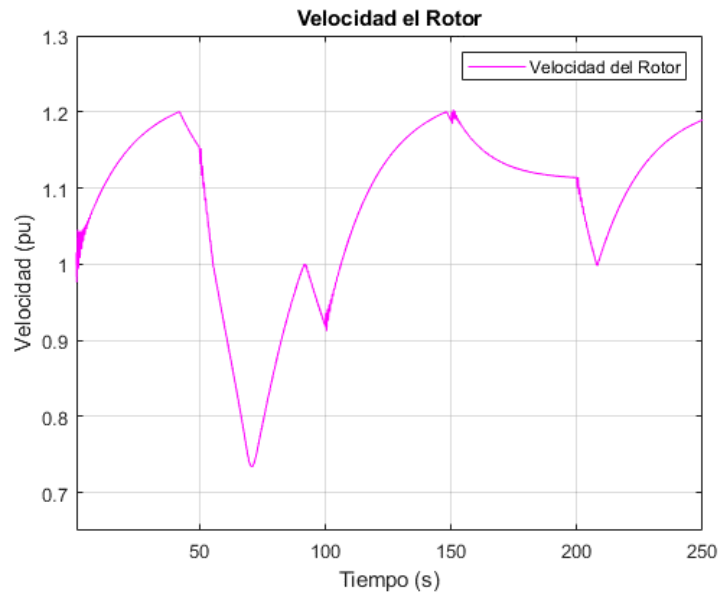


Figura 4.11 Velocidad del Rotor de la Turbina Eólica

Como resultado de esta prueba se puede resumir lo siguiente:

- De 66.51 a 91.56 (s) el sistema es incapaz de suplir la demanda con el perfil de viento ingresado, por lo que se disminuye el valor de la referencia ingresada al sistema de control de Potencia, aliviando la carga sobre el generador y permitiendo que se recupere la velocidad del rotor.

Esto se nota en la Figura 4.10 como una caída en la potencia generada por la planta eólica de 49 por ciento y en la Figura 4.11 como una caída en la velocidad rotórica de 0.8 (pu) hasta que se recupera nuevamente a 1 (pu)

- De 42.1 a 55.31 (s) y de 148.1 a 207.84 (s) la velocidad del rotor superó momentáneamente el límite superior establecido, por lo que el ángulo del aspa se incrementó rápidamente para disminuir la velocidad y llevar al generador nuevamente a sus valores nominales.

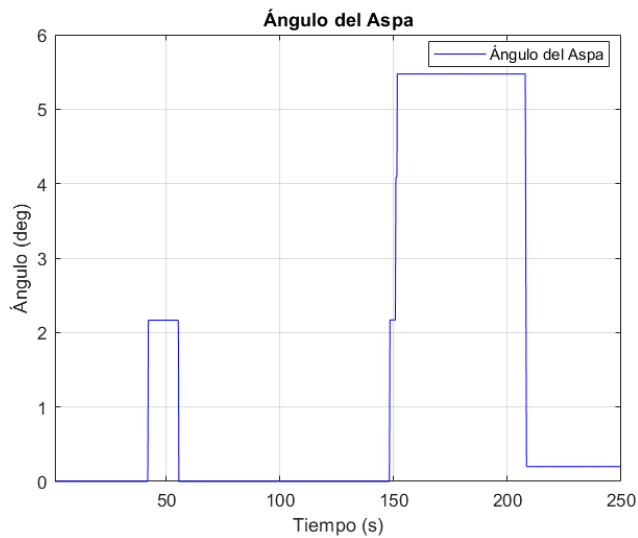


Figura 4.12 Ángulo del Aspa de la Turbina Eólica

Finalmente, cabe aclarar que en la Figura 4.10 se ve que el aerogenerador no es capaz de suministrar la potencia necesaria para alimentar la demanda, sin embargo, eso no quiere decir que el sistema de control se encuentre fallando, en cambio, es la referencia que se ingresa al sistema de control la que premeditadamente se disminuye para que la velocidad del rotor se recupere.

En la Figura 4.13 se presenta la respuesta del controlador ante la referencia de potencia que efectivamente ingresa al sistema de control, en azul se presenta la referencia y en rojo la potencia suministrada por el aerogenerador.

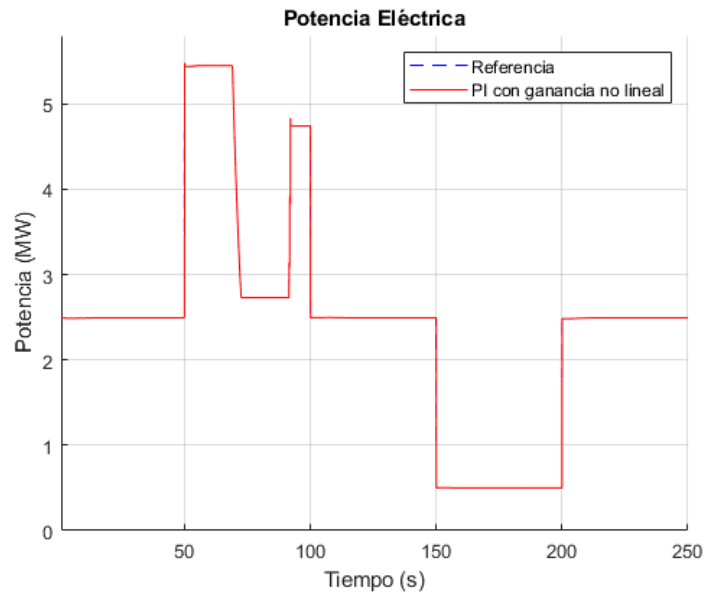


Figura 4.13 Control de Potencia con Cálculo Dinámico de Referencia

4.2.3 CASO 3: VELOCIDAD DE VIENTO FUERA DE LOS LIMITES DE FUNCIONAMIENTO

Finalmente se pretende evaluar la respuesta del sistema cuando se ingresa a la plana eólica un perfil de viento que se encuentra fuera de los límites de trabajo del aerogenerador.

Para la siguiente prueba se ha ingresado el perfil de viento que se muestra en la Figura 4.14, en donde de 30 a 60 (s) se ingresa una velocidad por debajo del valor mínimo de operación del aerogenerador y de 90 a 120 (s) se ingresa una velocidad por encima del límite de operación.

Los límites de operación del aerogenerador que se está usando son 4 (m/s) para el límite inferior y 32 (m/s) para el límite superior.

Trabajar fuera de estos límites de operación puede provocar la destrucción de los componentes mecánicos y eléctricos de la turbina y del generador sincrónico.

En la presente prueba se pretende evaluar el desempeño de los controladores cuando el aerogenerador se encuentra trabajando fuera de esos límites de operación.

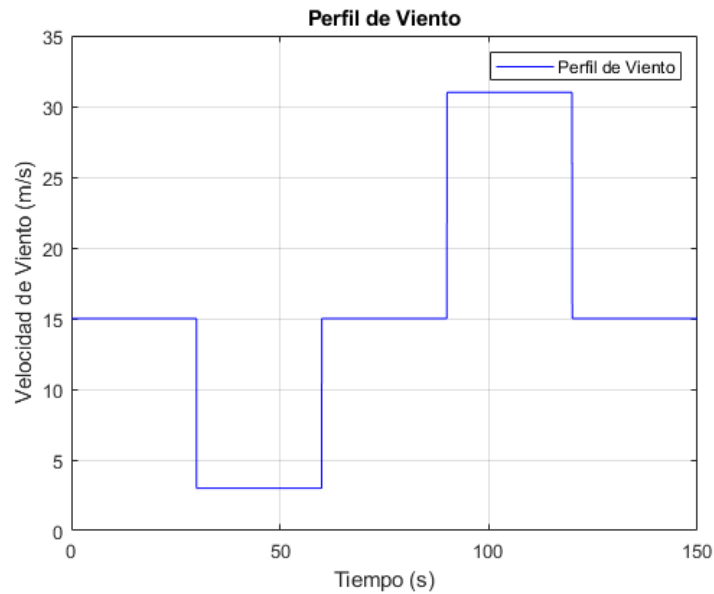


Figura 4.14 Perfil de Viento con valores fuera del límite de operación - 4 (m/s) para el mínimo y 32 (m/s) para el máximo

En la Figura 4.15 se presenta el resultado al someter al sistema al perfil de viento antes descrito. En azul la referencia de potencia, en rojo la potencia suministrada por el aerogenerador y en negro la potencia entregada por la barra infinita.

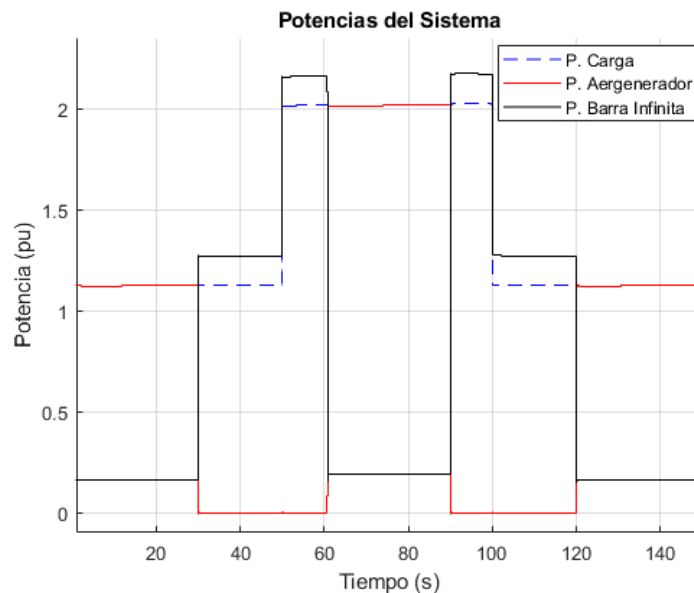


Figura 4.15 Potencias del Sistema ante niveles de viento fuera de los límites de operación

De la respuesta del sistema se puede destacar lo siguiente:

- De 30 a 60 (s) entra el perfil de viento por debajo de los límites de operación y automáticamente la planta eólica deja de suministrar potencia a la red, durante este periodo de tiempo es la barra infinita la que supe la demanda de la carga y de los elementos del sistema eléctrico de potencia.
- De 90 a 120 (s) entra el perfil de viento por encima de los límites de operación, al igual que en el caso anterior, el aerogenerador deja suministrar potencia y el ángulo del aspa aumenta para salvaguardar la integridad mecánica de la turbina eólica.
- Mientras el viento se encuentra dentro de los límites de operación la planta eólica se encuentra suministrando la referencia de potencia que ingresa al sistema.

En la Figura 4.16 se presenta la velocidad del rotor del aerogenerador y en la Figura 4.17 el ángulo del aspa.

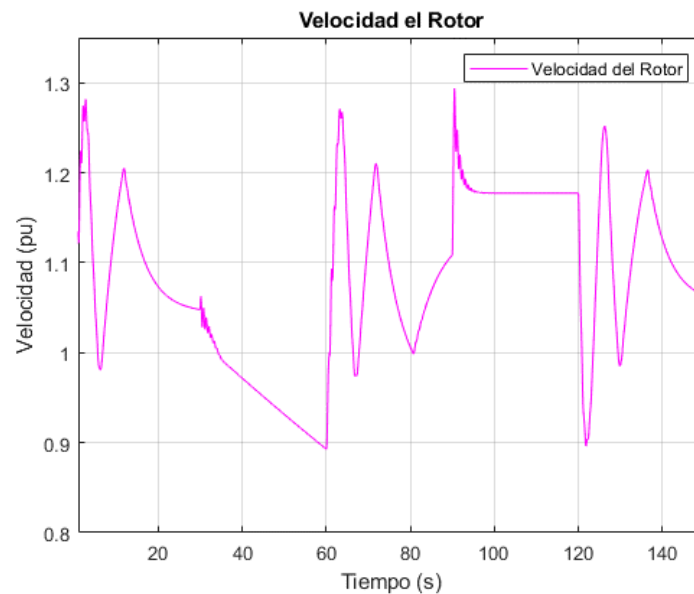


Figura 4.16 Velocidad del Rotor de la Turbina Eólica

En la Figura 4.16 se puede ver que la velocidad rotórica del generador se encuentra dentro de los límites de operación máxima, esto debido a que el aerogenerador suspende la entrega de potencia cuando la velocidad del viento se encuentra fuera de los límites de operación. Así mismo en la Figura 4.17 se ve como el ángulo del aspa varía para evitar que la velocidad de la máquina se incremente de forma que se produzcan daños mecánicos en el generador.

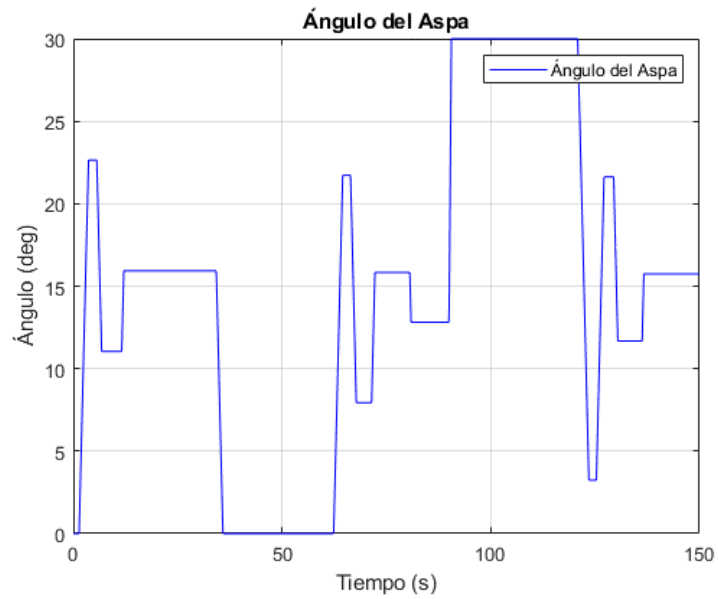


Figura 4.17 Ángulo del Aspa del Aerogenerador

Al igual que en el caso anterior, cabe recalcar que el control de potencia se encuentra operando en todo momento, cuando el viento sale de los límites de operación de la turbina se ingresa una referencia cero al sistema de control para evitar daños en la máquina. En la Figura 4.18 se puede ver la referencia que ingresa al sistema en azul y en rojo la respuesta del sistema.

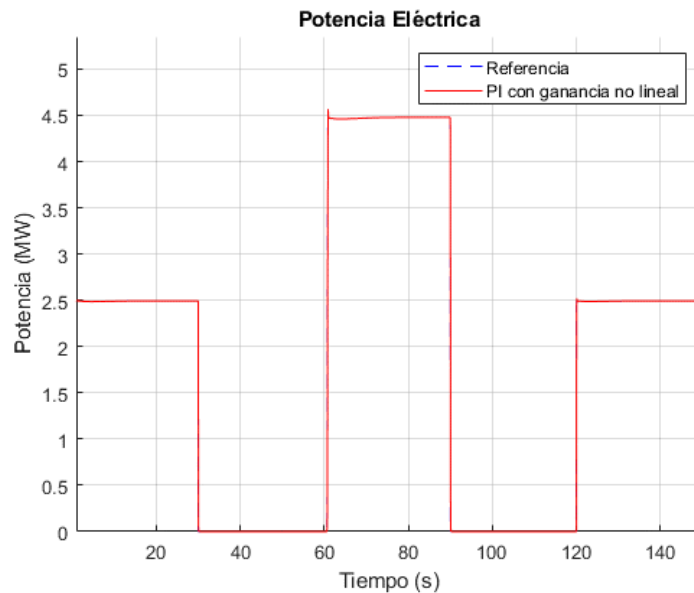


Figura 4.18 Seguimiento de Potencia ante una Referencia Dinámica

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Se implementaron controladores no lineales sobre un aerogenerador que funciona en un sistema eléctrico de potencia. Los controladores se diseñaron a partir de algoritmos más simples, un PID y un SMC fueron usados como estructura base para la implementación. La propuesta de este trabajo fue implementar una ganancia no lineal en los controladores que se incremente y decremente en función del error del sistema.
- De las pruebas comparativas realizadas en la sección 4.1 se pudo demostrar que el desempeño de los controladores no lineales implementados es superior a los de los controladores lineales, sobre todo ante cambios repentinos en la referencia y en la recuperación después de una perturbación fuerte. La mejora en el desempeño en el seguimiento de referencias en promedio es 54 por ciento mejor en los controladores no lineales que en los lineales.
- Cuando se sometió al sistema a una perturbación fuerte en forma de una caída de voltaje en la barra infinita se pudo comprobar que las propuestas no lineales se recuperan más rápido y con menos oscilaciones que los controladores lineales, presentando una mejora en la respuesta de alrededor del 96 por ciento.
- El controlador PID no lineal implementado en comparación con un controlador PID lineal presenta varias ventajas, como tiempos de estabilización más cortos, menos oscilaciones y menores sobreimpulsos ante cambios repentinos en la referencia, sin embargo, se presentan también desventajas como que el controlador es más elaborado de implementar y que la no linealidad de este puede hacer que el sistema se desestabilice más rápido sino se sintoniza de forma adecuada.
- La ganancia no lineal implementada en la parte discontinua del controlador deslizante hace que esta acción solo influya en el sistema cuando se necesita velocidad para alcanzar una referencia o recuperarse de una perturbación, esta ganancia también es una alternativa para evitar el ruido de alta frecuencia puesto que la misma no responde a una función signo, sino que se calcula en función del error, haciendo que el tiempo de respuesta de la ganancia sea el mismo que el del sistema.
- Se comprobó mediante la respuesta del algoritmo de optimización que para el control de estos sistemas no es necesaria la parte derivativa del controlador PID,

puesto que en todos los procesos de sintonización siempre la constante derivativa del controlador fue cero.

- Cuando se sometió al sistema a perfiles de viento altos y bajos se presentaron complicaciones con la velocidad del rotor, puesto que cuando había más viento del necesario el generador tendía a acelerarse y viceversa. Para solucionar esto se implementó un algoritmo de cálculo dinámico de referencia el cual disminuye el valor que ingresa al sistema de control del generador cuando la velocidad del rotor cae por debajo de los límites de operación. Así mismo, cuando la velocidad sale por encima de los límites de operación se varía el ángulo del aspa del aerogenerador para frenar a la máquina.
- La ventaja de hacer que el aerogenerador trabaje siguiendo una referencia de potencia, en lugar de trabajar en modo de máxima transferencia, es que la potencia generada puede regularse para satisfacer una demanda en específico, además de la posibilidad de trabajar en modo isla, sin embargo, una desventaja que debe tomarse en cuenta es la velocidad de la máquina, debido a que si existe más viento que el necesario para alimentar la demanda, la velocidad del rotor podría aumentar más allá de los límites de operación, esto debido a que la energía eólica que no se transformó en energía eléctrica se transforma en energía cinética.
- La configuración de conexión tipo 4 o tipo D del aerogenerador elegida para este proyecto, actualmente se encuentra en auge por la evolución tecnológica y la producción en masa de la electrónica de potencia asociada a los aerogeneradores, además esta configuración permite que el generador trabaje en todo el rango de velocidades para el que está diseñado puesto que la regulación de voltaje y frecuencia que se inyecta a la red se la hace en el inversor.
- Del estudio de la situación de la generación eólica en América Latina realizado en el capítulo uno, se puede concluir que los países que poseen el recurso eólico han hecho importantes inversiones e incentivos para la instalación de plantas de generación eólica, además, países europeos prefieren este tipo de plantas para su generación renovable, esto debido a la eficiencia de las plantas en comparación de otras alternativas intermitentes, a la evolución de la tecnología que permite tener generadores más eficientes y a la disponibilidad del recurso eólico durante todo el día a diferencia de la generación solar, sin embargo, esto se limita a los países y sectores que cumplen los requisitos mínimos de velocidad de viento.

5.2 RECOMENDACIONES

- Usar la librería GA del paquete “Global Optimization” de Matlab® en lugar de implementar el algoritmo genético de forma manual, debido a que varios usuarios han encontrado que la misma permite simular varios escenarios de Simulink en una sola corrida, lo que acorta en gran medida el tiempo que le toma al algoritmo sintonizar los controladores.
- Analizar los requerimientos y el alcance de la investigación cuando se escoja entre una simulación detallada o con valores promedios, puesto que la simulación detallada presenta tiempos de simulación mucho más extensos que la promedio y la única diferencia entre estas es que la primera permite realizar el análisis armónico del sistema.
- Si se desea modificar los bloques de una librería de Simulink, agregando o quitando señales, se recomienda no alterar las entradas y salidas predefinidas en los bloques, puesto que al momento de realizar la simulación se presentan errores en la compilación o en la ejecución del sistema. En cambio, si se usan los conectores con variables globales “go to” y “from to” se pueden ingresar señales dentro de los bloques predefinidos del sistema, además si no se desean tener advertencias en la simulación se deben conectar las señales que no se estén usando a conectores vacíos “Terminate”.
- Sino existe ningún sistema de almacenamiento de energía, no se recomienda trabajar en modo isla, puesto a que cuando falte el recurso primario para la generación, aparte de no poder suministrar energía a las cargas, en el proceso de disminución de la generación se vería comprometida la calidad de la energía y la integridad de las máquinas.
- Como trabajo futuro se propone agregar al sistema de pruebas más fuentes de generación intermitente y sistemas de almacenamiento de energía para analizar cómo se comportan los algoritmos de control propuestos en este tipo de sistemas y además probar nuevos esquemas para el despacho inteligente de generación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. C. Wu, J. N. Yang, and A. K. Agrawal, "Applications of Sliding Mode Control," *Earthquake*, vol. 1265, no. November 1997, pp. 1247–1265, 1998, doi: 10.1007/978-981-10-2374-3.
- [2] A. Rodríguez-Mariano, G. Reynoso-Meza, D. E. Páramo-Calderón, E. Chávez-Conde, M. A. García-Alvarado, and J. Carrillo-Ahumada, "Análisis del desempeño de controladores lineales sintonizados en diferentes estados estacionarios del biorreactor de Cholette mediante técnicas de decisión multi-criterio," *Rev. Mex. Ing. Quim.*, vol. 14, no. 1, pp. 167–204, 2015.
- [3] F. a Abbas, M. A. Abdulsada, and F. R. Abusief, "Speed Control of Wind Turbine by Using PID Controller," *Eng. Tech. J.*, vol. 29, no. 1, p. 7, 2011, doi: 10.13140/2.1.3717.5680.
- [4] F. Poschke, J. Fortmann, and H. Schulte, "Nonlinear wind turbine controller for variable power generation in full load region," *Proc. Am. Control Conf.*, no. May, pp. 1395–1400, 2017, doi: 10.23919/ACC.2017.7963148.
- [5] P. Mohan Kumar, K. Sivalingam, T.-C. Lim, S. Ramakrishna, and H. Wei, "Review on the Evolution of Darrieus Vertical Axis Wind Turbine: Large Wind Turbines," *Clean Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 205–223, 2019, doi: 10.3390/cleantechnol1010014.
- [6] S. Sawyer, "Bright Outlook for Wind Power in Latin America - Renewable Energy World," *Renewable Energy World*, 2018. <https://www.evwind.es/2018/08/24/bright-outlook-for-wind-power-in-latin-america/64313>.
- [7] CENACE, "Informe Operativo Anual 2019," Quito, 2019. [Online]. Available: http://www.cenace.org.ec/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=6:phocatinanuales&download=1478:informe-anual-2019&Itemid=6.
- [8] Y. Qi and Q. Meng, "The application of fuzzy PID control in pitch wind turbine," *Energy Procedia*, vol. 16, no. PART C, pp. 1635–1641, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.254.
- [9] J. Izquierdo Fernandez, "Controladores PI con acción de reset," Autónoma de Barcelona, 2011.
- [10] B. Boukhezzar and H. Siguerdidjane, "Comparison between linear and nonlinear control strategies for variable speed wind turbines," *Control Eng. Pract.*, vol. 18, no.

- 12, pp. 1357–1368, 2010, doi: 10.1016/j.conengprac.2010.06.010.
- [11] Y. X. Su, D. Sun, and B. Y. Duan, “Design of an enhanced nonlinear PID controller,” *Mechatronics*, vol. 15, no. 8, pp. 1005–1024, 2005, doi: 10.1016/j.mechatronics.2005.03.003.
- [12] Z. Lei and Y. Zhou, “A kind of nonlinear PID controller for Refrigeration Systems based on Vapour Compression,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 716–721, 2018, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.06.188.
- [13] L. Capito, P. Proaño, O. Camacho, A. Rosales, and G. Scaglia, “Experimental comparison of control strategies for trajectory tracking for mobile robots,” *Int. J. Autom. Control*, vol. 10, no. 3, p. 308, 2016, doi: 10.1504/ijaac.2016.077591.
- [14] O. Camacho and C. A. Smith, “Sliding mode control: An approach to regulate nonlinear chemical processes,” *ISA Trans.*, vol. 39, no. 2, pp. 205–218, 2000, doi: 10.1016/s0019-0578(99)00043-9.
- [15] C. Evangelista, “Control De Sistemas No Lineales Por Modos Deslizantes De Segundo Orden. Aplicacion a La Conversion De Energia Eolica,” p. 199, 2012, [Online]. Available: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/1460>.
- [16] B. Cajamarca, Ó. Camacho Quintero, G. Chavez Garcia, P. Leica, and M. Pozo, *Sliding Mode Control Based on Internal Model for a Non-minimum phase Buck and Boost Converter*, vol. 10. 2019.
- [17] X. Dominguez, O. Camacho, P. Leica, and A. Rosales, “A fixed-frequency Sliding-mode control in a cascade scheme for the Half-bridge Bidirectional DC-DC converter,” *2016 IEEE Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2016*, 2016, doi: 10.1109/ETCM.2016.7750835.
- [18] Y. Liu *et al.*, “DFIG wind turbine sliding mode control with exponential reaching law under variable wind speed,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, no. October 2017, pp. 253–260, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.018.
- [19] E. Bianconi *et al.*, “A fast current-based MPPT technique employing sliding mode control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1168–1178, 2013, doi: 10.1109/TIE.2012.2190253.
- [20] P. Pardalos, S. Rebennack, M. Pereira, N. Iliadis, and V. Pappu, “Grid Support Capabilities of Wind Turbines,” in *Handbook of Wind Power Systems*, New York: Springer, 2014, p. 839.

- [21] A. D. Hansen and L. H. Hansen, "Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995-2004)," *Wind Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 81–97, 2007, doi: 10.1002/we.210.
- [22] K. Ogata, "Modern Control Engineering," Cuarta Edi., Editorial Digital Design, 2010, p. 1013.
- [23] P. Proaño and L. Capito, "Seguimiento de Trayectorias Mediante Cuatro Técnicas de Control Utilizando una Plataforma Robótica Pioneer 3DX y el Sistema Operativo Róbotico ROS," Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [24] F. De La Cruz and O. Camacho, "Controlador De Modos Deslizantes Basado En Predictor De Smith Y Modelo De Segundo Orden Para Procesos Con Elevado Retardo," *Rev. Politécnica*, vol. 35, no. 2, pp. 1–7, 2015.
- [25] V. I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 22, no. 2, pp. 212–222, 1977, doi: 10.1109/TAC.1977.1101446.
- [26] J. Slotine, "Sliding controller design for non-linear systems," *Int. J. Control*, vol. 40, no. 2, pp. 421–434, 1984.
- [27] O. Camacho, "Sliding Mode Control in Process Industry," in *Instrument Engineers' Handbook, Volume Two: Process Control and Optimization*, Fourth Edi., vol. 30, no. 2005, B. Lipták, Ed. Rosewood: The Instrumentation, systems, and Automation Society, 2006, pp. 351–359.
- [28] MathWorks, "Simscape Electrical," *MathWorks Catalog*, 2015. <https://es.mathworks.com/products/simscape-electrical.html>.
- [29] J. Ferrer, "Conceptos Básicos de Metodología de la Investigación," *I.U.T.A.*, 2010. <http://metodologia02.blogspot.com/p/operacionalizacion-de-variables.html>.
- [30] MathWorks, "Wind Farm - Synchronous Generator and Full Scale Converter (Type 4) Average Model," *MathWorks*, 2015. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/wind-farm-synchronous-generator-and-full-scale-converter-type-4-average-model.html>.
- [31] O. Camacho and R. Rojas, "A General Sliding Mode Controller for Nonlinear Chemical Processes," *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, vol. 122, no. 4, p. 650, 2002, doi: 10.1115/1.1318351.
- [32] P. Proaño, L. Capito, A. Rosales, and O. Camacho, "A dynamical sliding mode

- control approach for long deadtime systems,” *2017 4th Int. Conf. Control. Decis. Inf. Technol. CoDIT 2017*, vol. 2017-January, no. June, pp. 108–113, 2017, doi: 10.1109/CoDIT.2017.8102575.
- [33] J. Salomaki, *Sensorless Control Of AC Drives Equipped With An Inverter Output Filter*. Helsinki University of Technology, 2007.
- [34] J. Salomäki, A. Piippo, M. Hinkkanen, and J. Luomi, “Sensorless vector control of PMSM drives equipped with inverter output filter,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 1059–1064, 2006, doi: 10.1109/IECON.2006.348050.
- [35] A. Raghavan, N. Srirattana, and J. Laskar, “Circuit Simulation,” in *Modeling and Design Techniques for RF Power Amplifiers*, I. PRESS, Ed. New Jersey, 2008, p. 198.
- [36] P. Proaño and M. Pozo, “Estrategias de control no lineal para la regulación de corriente y estabilización de voltaje DC para un aerogenerador operando en una microred Non-linear control,” *NOVASINERGIA*, vol. 3, no. 1, pp. 45–53, 2020, doi: <https://doi.org/10.37135/ns.01.05.05>.
- [37] D. Hryniuk, I. Suhorukova, and I. Orobei, “Non-linear PID controller and methods of its setting,” in *2017 Open Conference of Electrical, Electronic and Information Sciences, eStream 2017 - Proceedings of the Conference, 2017*, pp. 6–9, doi: 10.1109/eStream.2017.7950327.
- [38] N. W. Miller, J. J. Sanchez-Gasca, W. W. Price, and R. W. Delmerico, “Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 MW wind turbine-generators for stability simulations,” *2003 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. Conf. Proc.*, vol. 3, no. July, pp. 1977–1983, 2003, doi: 10.1109/pes.2003.1267470.