



---

**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**  
**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

**Control Óptimo Robusto para un Sistema de  
Generación basado en un Generador Síncrono de  
Imanes Permanentes**

**TESIS**

Que para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
ELÉCTRICA**

Presenta:

**Carlos Córdova Aguilar**

Director de Tesis:

**Dr. Fernando Ornelas Téllez**



Morelia, Michoacán, Agosto 2019







## CONTROL ÓPTIMO ROBUSTO PARA UN SISTEMA DE GENERACIÓN BASADO EN UN GENERADOR SÍNCRONO DE IMANES PERMANENTES

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban la Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de *Carlos Córdoba Aguilar*

Dra. Elisa Espinosa Juárez  
*Presidente del Jurado*

Dr. Fernando Ornelas Téllez  
*Director de Tesis*

Dr. J. Jesús Rico Melgoza  
*Vocal*

J. Jesús Rico Melgoza

Dr. Roberto Tapia Sánchez  
*Vocal*

Dra. Adriana del Carmen Téllez Anguiano  
*Revisor Externo (ITM)*

Dr. Roberto Tapia Sánchez  
*Jefe de la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica. UMSNH.  
(Por reconocimiento de firmas)*

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
Julio de 2019



# Agradecimientos

- *A mis papás Carlos Córdova Arredondo y Obdulia Aguilar Torres por todo su apoyo desde el momento que abrí los ojos hasta el día de hoy.*
- *A dios por haberme dado la fuerza y motivación de concluir el trabajo.*
- *A mi director de tesis Dr. Fernando Ornelas Téllez por haberme guiado en el transcurso del proyecto y brindarme sus enseñanzas.*
- *Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico otorgado durante todo el proceso.*
- *A mis compañeros David Cortes Vega y Didier González López por su apoyo incondicional.*
- *A mis maestros de licenciatura la Dra. Adriana del Carmen Téllez Anguiano y el Dr. Enrique Reyes Archundia por haberme apoyado para continuar con mis estudios.*
- *A mis hermanas Karina Córdova Aguilar y Karla Córdova Aguilar por ayudarme a salir adelante siempre.*



# Resumen

En el presente trabajo de tesis se realiza el modelado matemático y se diseña una estrategia de control para un sistema de generación eólico basado en un Generador Síncrono de Imanes Permanentes. El sistema completo es de naturaleza no lineal, mismo que requiere de un sistema de control eficiente, no lineal y robusto para la regulación de las variables involucradas, a fin de poder obtener la máxima extracción de energía a partir del viento. El sistema de generación cuenta con diferentes etapas, iniciando por una turbina eólica, que se encarga de transformar la energía cinética del viento en mecánica, de la cual se obtiene un par mecánico que ha de servir para impulsar el generador de imanes permanentes; posteriormente, se tiene una etapa de electrónica de potencia basada en un rectificador controlado trifásico, que mediante una modulación por ancho de pulso PWM, proporciona una serie de pulsos para el control de la conmutación del convertidor a fin de extraer la máxima potencia del sistema. La estrategia de control diseñada se basa en la teoría de control óptimo no lineal, donde se minimiza un funcional de costo que evalúa el desempeño del sistema a controlar, así como el esfuerzo de control para lograr tal desempeño. La metodología de control toma en consideración que el sistema a controlar tiene una perturbación, por lo que el diseño resulta en un controlador robusto. El sistema completo de generación está simulado en Matlab/Simulink. El control óptimo robusto realiza el seguimiento de trayectorias variantes con el tiempo, donde las referencias para las variables del sistema se obtienen mediante algoritmos seguidores de máximo punto de potencia MPPT, donde para tal fin se emplean dos algoritmos distintos, esto es, perturba y observa (*P&O*) y razón de cambio de velocidad *TSR*. Es importante mencionar que debido a la variabilidad de la velocidad del viento, es necesario realizar seguimiento de trayectorias en las variables del sistema a fin de obtener la máxima extracción de potencia, particularmente, controlando la velocidad del rotor del PMSG. En el presente trabajo cuenta con resultados experimentales de un prototipo en el laboratorio, obteniéndose buenos resultados del algoritmo de control diseñado.

Palabras clave: MPPT, PWM, Convertidor, dq0, SDRE.



# Abstract

In this thesis work, a mathematical modeling is carried out and a control strategy is designed for a wind generation system based on a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG). The complete system is non-linear, which requires an efficient, non-linear and robust control system for the regulation of the variables involved, in order to obtain the maximum extraction of energy from the wind. The generation system has different stages, starting with a wind turbine, which is responsible for transforming the kinetic energy of the wind into mechanical energy, from which a mechanical torque is obtained that must serve to drive the permanent magnet generator; subsequently, there is a power electronics stage based on a three-phase controlled rectifier, which by means of Pulse Width Modulation (PWM), provides a series of pulses for the control of the converter switching in order to extract the maximum power from the system. The control strategy designed is based on the theory of optimal nonlinear control, where a cost functional that evaluates the performance of the system to be controlled is minimized, as well as the control effort to achieve such performance. The control methodology takes into account that the system to be controlled has a disturbance, so the design results in a robust controller. The complete generation system is simulated in Matlab/Simulink. The optimal robust control performs the tracking of variant trajectories with time, where the references for the system variables are obtained by means of algorithms followers of maximum MPPT power point, where for this purpose two algorithms are used different, that is, disturbs and observes  $P&O$  and speed change ratio ( $TSR$ ). It is important to mention that due to the variability of the wind speed, it is necessary to track trajectories in the system variables in order to obtain the maximum power extraction, particularly, controlling the speed of the PMSG rotor. In the present work, experimental results were developed in a Laboratory Prototype, obtaining good results from the control algorithms designed.



# Contenido

Agradecimientos . . . . .	III
Resumen . . . . .	V
Abstract . . . . .	VII
Contenido . . . . .	IX
Lista de Figuras . . . . .	XI
Lista de Símbolos . . . . .	XIII
Lista de Acrónimos . . . . .	XV
Lista de Publicaciones . . . . .	XVII
1. Introducción . . . . .	1
1.1. Planteamiento del problema . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	3
1.2.1. Tipos de aerogeneradores y sus particularidades . . . . .	5
1.2.2. Estrategia de control para maximizar la potencia extraída de aerogeneradores de velocidad variable conectados a la red eléctrica . . . . .	8
1.2.3. Técnicas de control en sistemas eólicos . . . . .	9
1.2.4. Tipos de MPPT . . . . .	11
1.3. Motivación . . . . .	11
1.4. Hipótesis . . . . .	12
1.5. Objetivos de la tesis . . . . .	12
1.5.1. Objetivo general . . . . .	12
1.5.2. Objetivos particulares . . . . .	12
1.6. Aportaciones . . . . .	13
1.7. Descripción de capítulos . . . . .	13
2. Modelado del sistema de generación eólica basado en un PMSG y rectificador trifásico controlado. . . . .	15
2.1. Modelo promediado del convertidor AC/DC . . . . .	15
2.2. Modelo de la turbina de viento . . . . .	16
2.2.1. Perturba y observa . . . . .	17
2.2.2. El TRS-MPPT . . . . .	19
2.2.3. El coeficiente de potencia . . . . .	19
2.3. Modelado dinámico de la máquina síncrona de imanes permanentes. . . . .	20
2.4. Modelado del PMSG. . . . .	21

2.4.1. Conclusión de capítulo . . . . .	27
3. Control no lineal óptimo robusto para el sistema de generación	29
3.1. Control óptimo . . . . .	30
3.2. Sistemas no lineales . . . . .	31
3.3. Sistemas no lineales SDCF . . . . .	32
3.4. Control óptimo para sistemas SDCF . . . . .	34
3.5. Control óptimo para la estabilización de sistemas no lineales. . . . .	35
3.6. Control óptimo no lineal para seguimiento de trayectorias. . . . .	35
3.6.1. Planteamiento del problema de seguimiento . . . . .	36
3.6.2. Conclusión de capítulo . . . . .	38
4. Resultados de simulaciones y experimentos.	39
4.1. Comparación del modelo matemático promediado con el modelo conmutado.	39
4.2. Control óptimo a nivel simulación del sistema PMSG . . . . .	43
4.2.1. Emulador de turbina para el PMSG . . . . .	44
4.3. Resultados experimentales de Control óptimo para el PMSG. . . . .	54
4.3.1. Descripción del experimento PMSG . . . . .	55
4.4. Resultados Experimentales. . . . .	57
4.4.1. Conclusiones del capítulo . . . . .	64
5. Conclusiones	65
5.1. Conclusiones generales . . . . .	65
5.2. Trabajos futuros . . . . .	66
Referencias	67

# Lista de Figuras

1.1. Esquema a bloques de la transformación de energía eólica a eléctrica donde se rectifica, invierte y filtra para conectar a la red eléctrica (back to back) [Benelghali10]. . . . .	3
1.2. Comportamiento de la potencia en una turbina eólica [Mirez11]. . . . .	4
1.3. Aerogeneradores vertical y horizontal [Ma13]. . . . .	7
1.4. Sistema de generación eléctrica [Friedland12]. . . . .	8
1.5. Curvas de potencia mecánica [Espejo Marín12]. . . . .	9
2.1. Diagrama de flujo del P&O. . . . .	18
2.2. Sistema a bloques del TSR donde se mide la velocidad del viento para obtener una velocidad angular y compararla contra la real [Thongam11]. . . . .	19
2.3. Proceso de conversión energía cinética a eléctrica [Yaramasu17]. . . . .	20
2.4. Máquina operando como motor, y generando energía mecánica [Yaramasu17].	21
2.5. Modelo PMSM trifásico con un convertidor de potencia trifásico [Yaramasu17].	22
2.6. Representación de los circuitos de estado estable del eje $dq0$ para un PMSM [Yaramasu17]. . . . .	23
2.7. Circuito para el modelado PMSG . . . . .	24
2.8. Modelo en espacio de estados del PMSG. . . . .	26
3.1. Análisis básico de control sobre un sistema o planta . . . . .	30
3.2. Modelo en SDCF del PMSG. . . . .	38
4.1. Diagrama entre modelos . . . . .	40
4.2. Comparación entre estados $x_1$ conmutado y promediado. . . . .	41
4.3. Comparación entre estados $x_2$ conmutado y promediado. . . . .	41
4.4. Comparación entre estados $x_3$ conmutado y promediado. . . . .	42
4.5. Comparación entre estados $x_4$ conmutado y promediado. . . . .	42
4.6. Diagrama a bloques del sistema. . . . .	44
4.7. Perfil de viento para la turbina. . . . .	45
4.8. Potencia extraída del PMSG. . . . .	46
4.9. Velocidad del PMSG y referencia. . . . .	47
4.10. Velocidad del PMSG con referencias del P&O. . . . .	47
4.11. Potencia extraída del PMSG usando P&O. . . . .	48
4.12. Coeficiente de Potencia del MPPT P&O. . . . .	48

4.13. Coeficiente de Potencia del MPPT TSR. . . . .	49
4.14. Estado $i_q$ con control óptimo. . . . .	49
4.15. Estado $i_d$ mostrando el control sobre una referencia 0. . . . .	50
4.16. Estado $V_c$ voltaje del capacitor comportamiento con control óptimo. . . . .	51
4.17. Voltajes de control $V_d$ y $V_q$ , después de la transformación al marco $abc$ . . . . .	51
4.18. Posición del rotor respecto al tiempo. . . . .	52
4.19. Corrientes del PMSG. . . . .	52
4.20. Diagrama de simulación en Matlab/Simulink parte 1 se muestra el bloque del PMSG y el rectificador. . . . .	53
4.21. Diagrama de simulación en Matlab/Simulink parte 2 se muestra el control y el PWM. . . . .	53
4.22. Diagrama de simulación en Matlab/Simulink parte 3 se muestra la parte interna del bloque vector control y se encuentra el control óptimo. . . . .	54
4.23. Esquema del motor de inducción y PMSG . . . . .	55
4.24. Experimento del control óptimo del PMSG. . . . .	56
4.25. Seguimiento de trayectoria velocidad del PMSG. . . . .	58
4.26. Seguimiento de trayectoria con PI de la velocidad del PMSG. . . . .	58
4.27. Corrientes en $abc$ del PMSG. . . . .	59
4.28. Voltaje en $abc$ del PMSG. . . . .	60
4.29. Corrientes en $dq0$ control óptimo. . . . .	60
4.30. Corrientes en $dq0$ PI. . . . .	61
4.31. Voltaje $dq0$ controlador óptimo del PMSG. . . . .	62
4.32. Voltaje $dq0$ controlador PI del PMSG. . . . .	62
4.33. Voltaje del PMSG con control óptimo. . . . .	63
4.34. Voltaje del capacitor con el controlador PI del PMSG. . . . .	63

# Lista de Símbolos

<b>Símbolos</b>	<b>Significado</b>
$\omega$	Velocidad Angular
$T_e$	Par electromagnético
$T_m$	Par mecánico
$\rho$	Densidad del aire
$A$	Área de la turbina
$v$	Velocidad del viento
$C_p$	Coefficiente de potencia
$R_s$	Resistencia del PMSG
$L_d$	Inductancia $d$
$L_q$	Inductancia $q$
$J$	Inercia
$\mu$	Fricción
$\psi$	Flujo magnético
$v_{as}$	Voltaje de entrada fase A
$v_{bs}$	Voltaje de entrada fase B
$v_{cs}$	Voltaje de entrada fase C
$\omega_r$	Velocidad del rotor
$i_{as}$	Corriente de estátor fase A
$i_{bs}$	Corriente de estátor fase B
$i_{cs}$	Corriente de estátor fase C
$\psi_{as}$	Flujo magnético fase A
$\psi_{bs}$	Flujo magnético fase B
$\psi_{cs}$	Flujo magnético fase C
$R_s$	Resistencia de devanado del estátor
$L_{aa}$	Inductancia de línea A
$L_{bb}$	Inductancia de línea B
$L_{cc}$	Inductancia de línea C
$M_{aa}$	Inductancia de fase A
$M_{bb}$	Inductancia de fase B
$M_{cc}$	Inductancia de fase C



# Lista de Acrónimos

<i>Acrónimo</i>	<i>Significado</i>
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracker
<i>PMP</i>	Punto de Máximo Potencia
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation
<i>PMSG</i>	Permanent Magnet Synchronous Generator
<i>PMSM</i>	Permanent Magnet Synchronous Motor
<i>HJB</i>	Hamilton-Jacobi-Bellman
<i>FER</i>	Fuentes de Energía Renovable
<i>SGE</i>	Sistemas de Generación Eólica
<i>AC</i>	Corriente Alterna
<i>AC/DC</i>	Alternating Current to Direct Current Converter
<i>DC</i>	Corriente Continua
<i>MW</i>	Mega Watts
<i>SG</i>	Generadores Síncronos
<i>AG</i>	Generadores Asíncronos
<i>WECS</i>	Wind Wnergy Conversion System
<i>TSR</i>	Tip Speed Ratio
<i>WECS</i>	Wind Energy Conversion System
<i>P&amp;O</i>	Perturba y Observa
<i>PWM</i>	Modulación de Ancho de Pulso
$T_e$	Par electromagnético
<i>SDCF</i>	State-dependent coefficient factorized
<i>SDRE</i>	State-dependent Riccati equation
<i>LQR</i>	Linear quadratic regulator



# Lista de Publicaciones

“Nonlinear Optimal Control for a Grid-Connected Photovoltaic System”

Fernando Ornelas Téllez, J.Jésus Rico Melgoza, Carlos Córdova Aguilar, Didier González López. *IEEE Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, Ixtapa Zihuatanejo, 2018.

“Optimal tracking control for a Permanent Magnet Synchronous Generator”

Fernando Ornelas Téllez, J.Jésus Rico Melgoza, Carlos Córdova Aguilar, David Cortés Vega. *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CODIT)*, París Francia, 2019.



## Capítulo 1

# Introducción

Las fuentes de energía renovables (FER) eólica y solar, representan hoy alternativas económicamente realizables para ayudar a la generación de energía eléctrica convencional. Entre los diversos factores que contribuyen a este éxito se pueden mencionar: el desarrollo de nuevas tecnologías como electrónica de potencia, novedosas configuraciones en circuitos y estrategias de control [Song03]. Una de las principales ventajas de la energía eólica es que contribuye a la mitigación del cambio climático global, generado en gran parte por la emisión de gases de efecto invernadero, que son producidos por otras fuentes de energía convencionales que utilizan combustibles fósiles como el carbón y derivados del petróleo. Además, es una fuente de energía inagotable ya que se obtiene de procesos atmosféricos naturales y continuos [González08]. Aunque, tecnológicamente, los sistemas de conversión de energía eólica han evolucionado fuertemente, todavía no se ha logrado obtener el sistema ideal, debido a la variabilidad y al comportamiento no lineal de su fuente motriz, el viento, que varía tanto geográficamente como temporalmente [González08]. La tendencia de la energía eólica está incrementándose debido a los múltiples beneficios de usar FER en sistemas de generación distribuida o dispersa. Estos beneficios incluyen los incentivos favorables en muchos países que impactan directamente en la aceptación comercial de los SGE (Sistemas de Generación Eólica) conectados a la red eléctrica [Heier08]. El uso óptimo del recurso eólico impone el requerimiento de operar constantemente el aerogenerador cerca del punto de máxima potencia (PMP) independientemente de las condiciones de velocidad

del viento. De esta manera, se mejora la relación entre los costos de generación e inversión del SGE [Datta03].

Actualmente la tendencia es el desarrollo de la energía eólica para proteger el medio ambiente y dejar de lado los hidrocarburos, la propuesta es desarrollar la generación trifásica eléctrica mediante una turbina eólica y un generador de imanes permanentes debido a que este tipo de generadores no necesita caja de engranes y puede ser acoplado con la turbina, directamente, además se puede trabajar con velocidades variables a diferencia de los primeros generadores de jaula de ardilla que se tenían que mantener a una sola velocidad de operación, debido a que tienen menores pérdidas de energía.

Los aerogeneradores funcionan con energía cinética del viento la cual es estocástica, esto quiere decir que es un proceso cuyo comportamiento es no determinista, en la medida que el subsiguiente estado del sistema está determinado tanto por las acciones predecibles del proceso como por elementos aleatorios. En este tipo de sistemas es muy importante la extracción de máxima potencia como las condiciones necesarias para esta operación, se necesita saber velocidad del viento y otro tipo de variables para asegurar un control sobre la generación de potencia máxima [Slavov18].

## 1.1. Planteamiento del problema

El problema principal para solucionar es la máxima extracción de energía del viento mediante un generador eólico, y con electrónica de potencia poder conectarlo a la red eléctrica. Para esto hay varios problemas a resolver, uno de ellos es que un generador de imanes permanentes (PMSG) trabaje a su máxima potencia, para lo cual existen varios tipos de algoritmos para lograr el MPPT (Maximum Power Point Tracker) seguimiento de punto de potencia máximo. Este algoritmo sirve para trabajar siempre el sistema en el máximo punto de potencia, moviendo el punto de una posición a otra llevándolo al punto óptimo, que va de la mano con la etapa de potencia, el rectificador trifásico controlado. Ya que el PMSG genera corriente alterna (AC) trifásica y es necesario rectificar la señal trifásica. El controlador que se diseñó, para el rectificador controlado es un control óptimo robusto no lineal.

Se propone un sistema de generación a escala utilizando un generador síncrono de imanes permanentes, y para emular la turbina de viento se utilizó un motor de inducción acoplado mediante una flecha al PMSG. Un esquema de conexión típico se muestra en la Figura 1.1, donde se puede observar la turbina de viento acoplada con el PMSG, la etapa de rectificación, inversión, filtrado y conexión a la red eléctrica. A esta configuración se le llama convertidor back to back. En la etapa de rectificación está el convertidor de potencia de corriente alterna a continua (AC/DC). En esta misma etapa se controla la velocidad del rotor o alguna otra variable del PMSG por medio del PWM, el cual manda una serie de pulsos al rectificador controlado. Este diseño con transistores de potencia llamados IGBT, los cuales son transistores bipolares de compuerta aislada que operan como interruptores controlados en circuitos de potencia donde el PWM, los hace trabajar de manera controlada de acuerdo a las ordenes del controlador óptimo robusto no lineal, todo esto con la finalidad de extraer la potencia máxima del viento apoyándose en el MPPT.

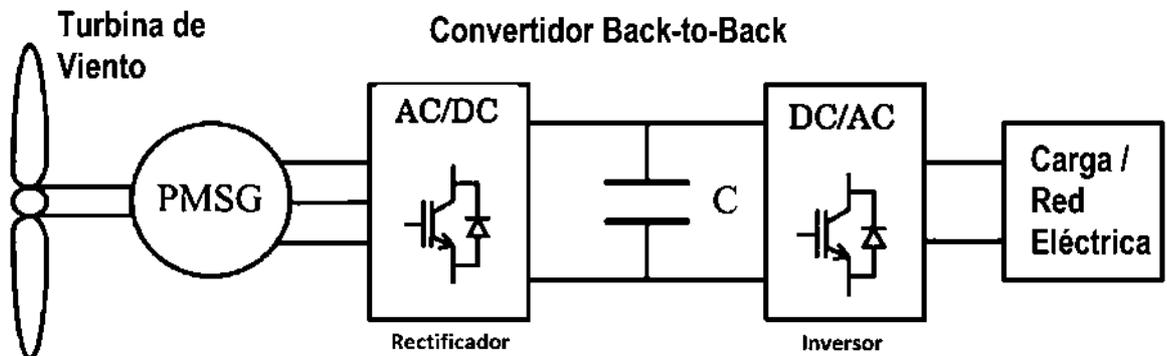


Figura 1.1: Esquema a bloques de la transformación de energía eólica a eléctrica donde se rectifica, invierte y filtra para conectar a la red eléctrica (back to back) [Benelghali10].

## 1.2. Antecedentes

A pesar de que Dane Poul la Cour desarrolló la primera generación de electricidad con una turbina eólica en 1891, la energía eólica no jugó casi ningún papel en el desarrollo de suministro de electricidad. Curiosamente, en 1918 las turbinas eólicas ya estaban suminis-

trando 3 % de la demanda de electricidad en Dinamarca. Sin embargo, las grandes turbinas de vapor dominaron la industria de generación de electricidad en todo el mundo debido a sus ventajas económicas [Ackermann05].

Ahora se definen algunas partes del aerogenerador como lo es el generador y turbina. Los diferentes tipos de generadores que se utilizan en los aerogeneradores son síncronos o asíncronos, jaula de ardilla o doblemente alimentados, con excitación o con imanes permanentes. Se define como la parte del aerogenerador que convierte la energía eólica en electricidad. En las turbinas la curva de potencia de un aerogenerador sigue un comportamiento similar al de la Figura 1.2 entre la velocidad del viento de corte (la velocidad a la que la turbina eólica comienza a funcionar) y la capacidad nominal, Figura 1.2. La turbina eólica generalmente alcanza la capacidad nominal a una velocidad de viento entre 12 y 16m/s, dependiendo del diseño de la turbina eólica individual [Ackermann05]. Cualquier turbina eólica comienza a funcionar con una cierta velocidad del viento como se muestra en la Figura 1.2. Tiene una cierta potencia para cada velocidad de viento hasta llegar a sus valores nominales de cada turbina.

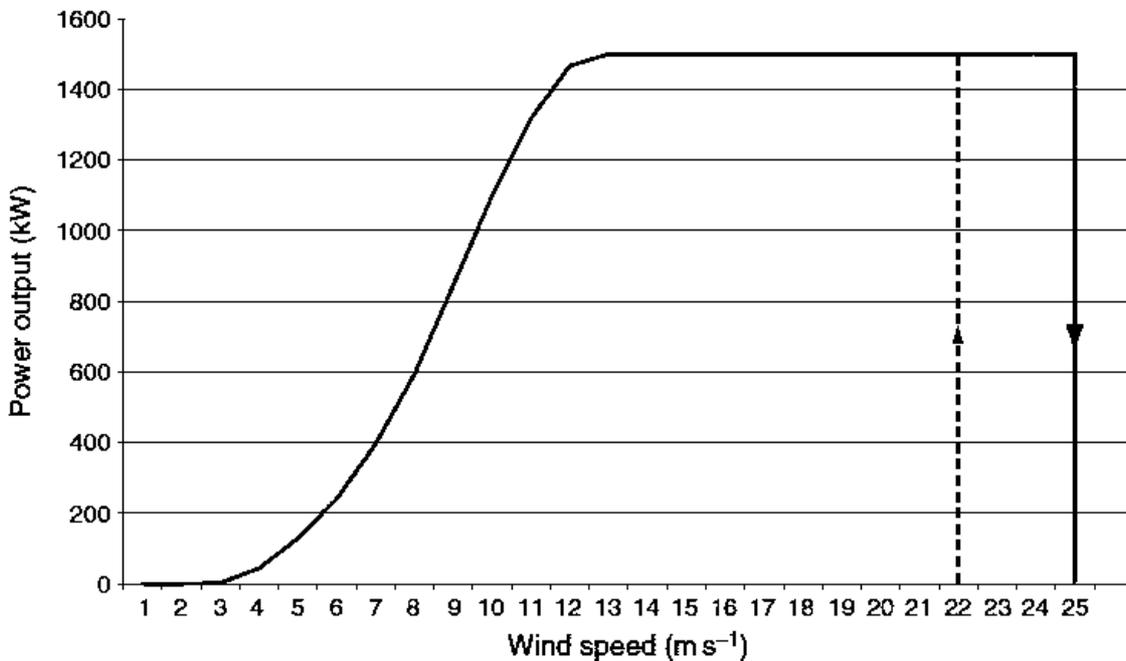


Figura 1.2: Comportamiento de la potencia en una turbina eólica [Mirez11].

Las turbinas eólicas de velocidad variable están diseñadas para lograr la máxima eficiencia aerodinámica en una amplia gama de velocidades del viento. Con una operación de velocidad variable  $\omega$ , tiene que ser posible adaptarse a los cambios de aceleración o desaceleración de la velocidad del viento. De esta manera, la relación de velocidad punta se mantiene constante en un valor predefinido que corresponde al coeficiente de potencia máxima. A diferencia de un sistema de velocidad fija, un sistema de velocidad variable mantiene el par del generador bastante constante y las variaciones en el viento son absorbidas por los cambios en el generador.

El sistema eléctrico de una turbina eólica de velocidad variable es más complicado que el de una turbina eólica de velocidad fija. Por lo general, está equipado con un generador síncrono y conectado a la red a través de un convertidor de potencia. El convertidor de potencia controla la velocidad del generador; es decir, las fluctuaciones de potencia causadas por las variaciones del viento son absorbidos principalmente por los cambios en la velocidad del generador al rotor y, por consiguiente, en la velocidad del rotor de la turbina eólica. Las ventajas de las turbinas eólicas de velocidad variable son: mayor extracción de energía, calidad de potencia mejorada y estrés mecánico reducido. Las desventajas son: las pérdidas en la electrónica de potencia, el uso de más componentes y el aumento del costo en el equipo debido a la electrónica de potencia.

### 1.2.1. Tipos de aerogeneradores y sus particularidades

La primera y más clásica clasificación, se basa en la posición de su eje principal. Existen dos tipos, los de eje horizontal y los de eje vertical.

#### **Aerogenerador de eje horizontal**

Los aerogeneradores de eje horizontal, se les llama de esta forma ya que poseen los ejes principales situados paralelamente al suelo. Necesita un control de orientación al viento, por ejemplo un motor eléctrico para aerogeneradores de más de 50 kW. Los elementos de conexión, multiplicador y generador, se encuentran a la altura del rotor en la góndola situados en lo alto de la torre. Con este tipo de aerogeneradores se obtiene una mayor producción energética, pero en desventaja, el manipulado, restauración y arreglos que pueda

necesitar el generador eólico, provoca que se encarezca su precio. La clasificación de eje horizontal depende del número de palas que tenga el aerogenerador. Se encuentran 3 tipos de aerogenerador en este caso: de dos palas, de tres palas o aerogeneradores multipalas. Los más utilizados son los aerogeneradores de tres palas, la gran mayoría de las turbinas vendidas en los mercados mundiales poseen este diseño de concepto danés, el motivo es la fricción con el aire; con tres palas rinden un 4% más que con dos y con 2 palas rinden un 10% más que con una [Nistal Lastra15].

### **Aerogenerador de eje vertical**

Los aerogeneradores de eje vertical tienen la ventaja de adaptarse a cualquier dirección de viento y por ello se les llama panémomos (todos los vientos). No precisan de dispositivos de orientación; trabajan por la diferencia de coeficiente de arrastre entre las dos mitades de la sección expuesta al viento. Esta diferencia de resistencia al viento hace que el rotor sea propenso a girar sobre su eje en una dirección específica. Los aerogeneradores de eje vertical operan con vientos de baja velocidad y difícilmente superan las 200 rpm. Se emplean para generar potencias que van de los 200W a los 4MW, en estricto rigor no necesitan de una torre. Generalmente se caracterizan por tener altos torques de partida. Otra particularidad de estos aerogeneradores es que son mucho más fáciles de reparar pues todos los elementos de transformación de la energía del viento se encuentran a nivel de suelo. El inconveniente de este tipo de turbinas es que el eje no se ubica a mucha altura y las velocidades del viento disminuyen al llegar al suelo por efecto de la rugosidad del mismo. La velocidad del viento crece de forma importante con la altura, con lo que estos aerogeneradores han sido desplazados por los de eje horizontal. De cualquier forma, colocar un aerogenerador a más altura mediante una torre implica incurrir en costos adicionales ligados a la seguridad del soporte del aerogenerador [Friedland12].

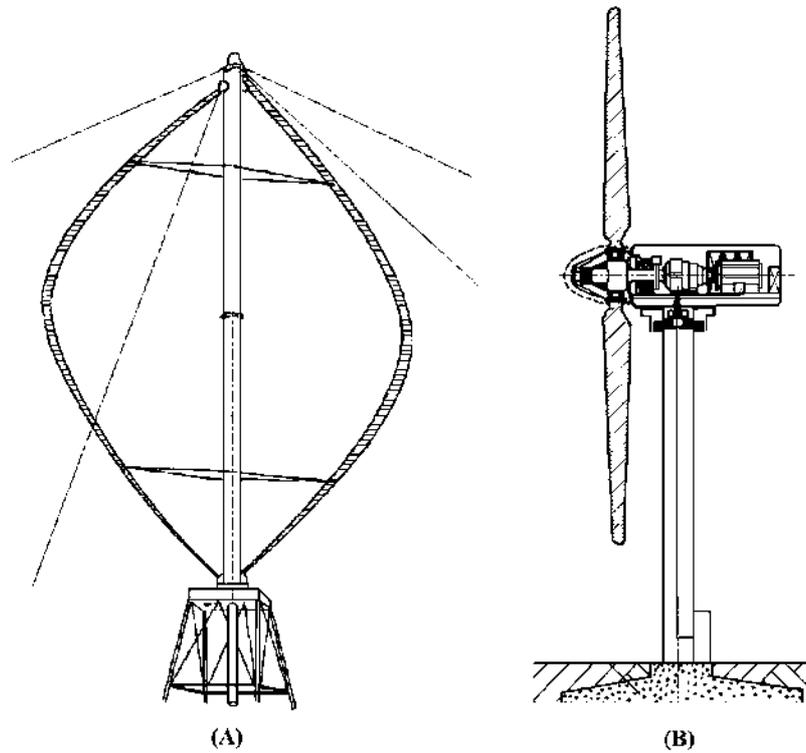


Figura 1.3: Aerogeneradores vertical y horizontal [Ma13].

En la Figura 1.3(A) muestra el aerogenerador vertical y en la Figura 1.3(B) el horizontal.

### **Tipos de generadores y diferencias.**

A la hora de generar energía eléctrica por medio de la potencia del viento existe una gran variedad de configuraciones posibles que se diferencian en las características eléctricas, electrónicas y mecánicas. Desde el punto de vista del generador se pueden diferenciar los asíncronos (AG) de los sincrónicos (SG). A su vez los primeros pueden tener rotor de jaula o rotor bobinado, mientras que los segundos pueden usar imanes permanentes o rotor bobinado. En la Figura 1.4 se observa el camino de la energía para un generador eólico con conexión indirecta a la red, se muestra una caja multiplicadora en la turbina, generador, rectificación, inversión y conexión a la red, esto constituye la transformación de energía mecánica a eléctrica a grandes rasgos.

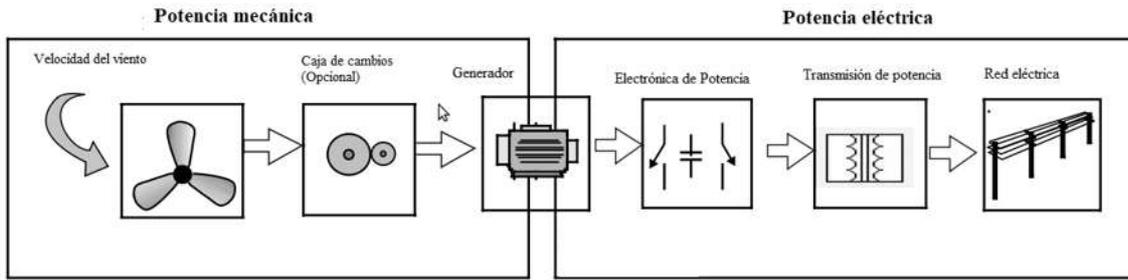


Figura 1.4: Sistema de generación eléctrica [Friedland12].

### 1.2.2. Estrategia de control para maximizar la potencia extraída de aerogeneradores de velocidad variable conectados a la red eléctrica

En la actualidad, la integración a la red eléctrica de sistemas de SGE está en un rápido crecimiento entre las tecnologías de energía renovables. Esta tendencia está incrementándose debido a los múltiples beneficios de usar FER en sistemas de generación distribuida o dispersa. Estos beneficios incluyen los incentivos favorables en muchos países que impactan directamente en la aceptación comercial de los SGE conectados a la red eléctrica [Molina08]. El uso óptimo del recurso eólico impone el requerimiento de operar constantemente el aerogenerador cerca del punto de máxima potencia (PMP) independientemente de las condiciones de velocidad del viento. De esta manera, se mejora la relación entre los costos de generación y los costos de inversión del SGE.

La Figura 1.5 presenta la potencia mecánica de salida de una turbina eólica en función de la velocidad angular con diferentes velocidades de viento, para el caso de un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, considerando el ángulo de paso de la pala  $b = 0^\circ$ . Como puede observarse, para cada velocidad del viento existe un punto específico en la característica de potencia del aerogenerador, también denominado PMP, donde la potencia de salida se maximiza. De esta forma, el control de la potencia del sistema de generación eólica se convierte en un control de velocidad variable.

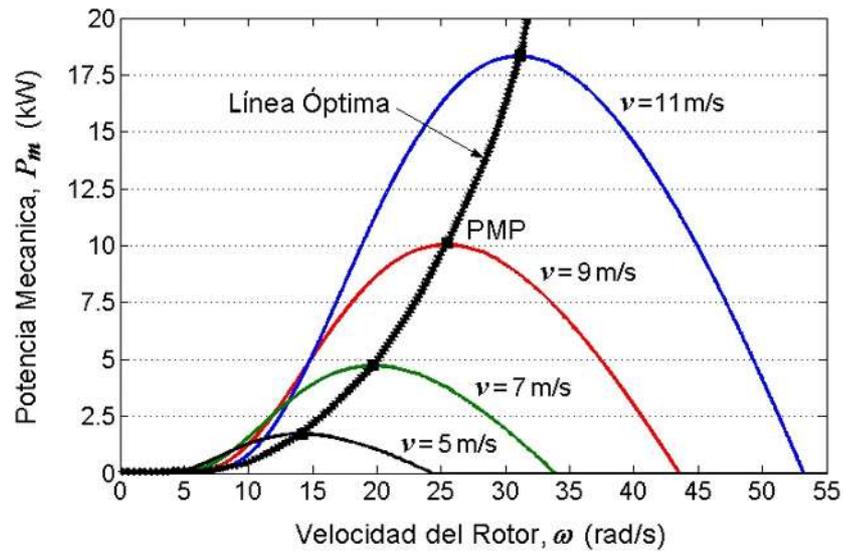


Figura 1.5: Curvas de potencia mecánica [Espejo Marín12].

### 1.2.3. Técnicas de control en sistemas eólicos

Existen varias estrategias de control que han sido aplicadas en el campo de aerogeneradores. En el estudio desarrollado por [Song00] aplicaron una combinación entre el control adaptativo y el control no lineal para regular la velocidad del rotor, lo cual es necesario para aumentar la eficiencia de generación de potencia.

En el artículo [Sakamoto04] se presentó el desarrollo del control en el ángulo de paso a través de control adaptativo usando un regulador de auto sintonía que tiene un método de identificación de mínimos cuadrados.

En [Kraan93] se propuso un método de control que trabaja en un amplio rango de velocidades conmutando entre 5 controladores que fueron acondicionados apropiadamente por medio de la aproximación de observadores.

En [Amandola07] se diseñó un controlador difuso que controla la extracción de la energía eólica, aplicado al control del ángulo de paso. La velocidad está regulada por otro controlador difuso que actúa sobre el torque del generador de modo que siga el valor de referencia generado por un estimador óptimo de la velocidad angular.

Así, existen diferentes tipos de controladores y trabajos previos sobre los aerogeneradores y

diferentes tipos de generadores, todo esto está vinculado con la electrónica de potencia que se necesita para este tipo de trabajos.

Hoy en día, la técnica de modulación ancho de pulso (PWM) que se aplica en el convertidor de AC/DC tiene una gran cantidad de aspectos interesantes tal como: una estabilización de la tensión de salida en DC, menos armónicos en la tensión de salida y su mejor factor de potencia. Esto podría ayudar a soportar y mejorar la calidad del sistema de energía. El convertidor AC/DC transformará un inestable voltaje de entrada del sistema de AC trifásico en una tensión de salida de DC estabilizada en una respuesta de tiempo corto [Moungkhum13]. Por otro lado las técnicas MPPT (Maximum Power Point Tracker) se encargan de definir el punto de operación de los sistemas de control de manera que se alcance la máxima energía disponible del viento en todo momento. Estas pueden ser clasificadas en función a la estructura de control en dos grandes familias: La primera de ellas, son las de lazo abierto, que se encargan de medir la velocidad del viento y fijar el punto de operación, bien sea el par o la velocidad de rotación de la turbina eólica. El otro grupo importante son: las de lazo cerrado, que consisten en un lazo de control retroalimentado y pueden tener como variable controlada el par o la velocidad de la turbina eólica en función de la potencia eléctrica generada, potencia que puede ser medida o estimarse con cierta fiabilidad.

En el artículo [Sirouni18] menciona el control de ángulo de inclinación donde controla la posición de las cuchillas para mantener la velocidad del rotor dentro de los límites de operación. Se utilizan dos estrategias de control, el controlador proporcional integral derivativo (PID), que necesita el conocimiento de la dinámica del sistema y el controlador de lógica difusa que no necesita un sistema conocido y es posible que el sistema contenga no linealidades.

Por otro lado en el artículo [Labidi17] manejan una técnica de control de torque para brindar máxima potencia mecánica y una técnica de control de par electromagnético para extraer la máxima cantidad de energía eléctrica.

#### 1.2.4. Tipos de MPPT

Existen varios algoritmos de MPPT los cuales se dividen en lazo abierto y cerrado. Respecto a lazo abierto, el MPPT se encarga de medir la velocidad del viento y definir el punto de operación del sistema de control; el algoritmo MPPT fija la velocidad de referencia del lazo de control para cada velocidad del viento. Con un conocimiento previo del modelo, es posible predecir la velocidad de rotación que maximiza la potencia de salida. También es necesario medir la velocidad de rotación del sistema mecánico. La estructura de control puede utilizarse en algunas aplicaciones con control de par, en el que el algoritmo MPPT define el par de referencia al resto del sistema de control. Esta técnica presenta varios inconvenientes en lazo abierto ya que la hacen poco usada en sistemas de generación de energía eólica para baja y mediana potencia, una de ellas está fundamentada en que la medición de la velocidad del viento debe ser realizada en las proximidades de la turbina, con lo que la medición puede verse afectada por las turbulencias producidas por la misma. Otro inconveniente importante que tiene la técnica de lazo abierto, es que el desempeño de la misma depende del modelo matemático de la turbina utilizada, por lo que las dinámicas no estudiadas e incertidumbres que pueda tener el modelo pueden causar la ineficiencia de la técnica. En muchos casos, el beneficio obtenido con esta técnica en sistemas de pequeña potencia no justifica su uso.

Las técnicas en lazo cerrado, se fundamentan en la retroalimentación de variables de interés del sistema de control de tal manera que se pueda aportar directa o indirectamente la potencia entregada de la turbina eólica al PMSG.

En esta tesis se realiza un MPPT a lazo cerrado ya que se utilizan sensores que constantemente monitorean las distintas señales como velocidad del viento, voltaje o velocidad angular, dependiendo de la técnica a utilizar.

### 1.3. Motivación

Debido a la situación actual del agotamiento de combustibles fósiles se ha venido desarrollando un importante crecimiento en las energías limpias como la energía solar y eólica. No obstante, estas energías se les llaman intermitentes ya que no todo el tiempo se

puede tener la energía solar o eólica y poder generar una cantidad determinada de energía eléctrica. Sin embargo, los sistemas instalados hoy en día pueden mejorarse con nuevos controladores más eficientes en los convertidores de potencia para lograr los estándares adecuados en la calidad de energía suministrada a la red eléctrica. Por lo tanto, el trabajo realizado está enfocado en mejorar el desarrollo de estas tecnologías y aportar al crecimiento de las energías renovables y en lo posible reducir la demanda de hidrocarburos, ayudando al planeta en problemas de contaminación.

## 1.4. Hipótesis

Es posible diseñar un algoritmo de control óptimo y robusto para lograr seguimiento de trayectoria, con el objetivo de regular y mantener la máxima transferencia de potencia en una máquina PMSG, utilizando un rectificador controlado trifásico de onda completa, conectado a una carga. Lo anterior ha de lograrse aun en presencia de incertidumbres o perturbaciones afectando al sistema a controlar.

## 1.5. Objetivos de la tesis

### 1.5.1. Objetivo general

Diseñar un algoritmo de control óptimo robusto para obtener la máxima transferencia de potencia de la máquina PMSG, con referencias calculadas de un algoritmo MPPT a nivel simulación, apoyado con Matlab/Simulink, y posteriormente implementar físicamente en el laboratorio emulando la turbina de viento con un motor de inducción. Para lograr este algoritmo de control es necesario disponer del modelo de la máquina y obtener sus parámetros.

### 1.5.2. Objetivos particulares

- Obtener el modelo de la máquina PMSG con el rectificador controlado.
- Implementar un algoritmo MPPT al PMSG para obtener la máxima transferencia de potencia.

- Desarrollar el algoritmo de control óptimo robusto para el rectificador, para el seguimiento de trayectorias y obtener la máxima transferencia de potencia.
- Realizar la implementación física del controlador propuesto en el laboratorio para un sistema de generación basado en un PMSG.

## 1.6. Aportaciones

- Desarrollar modelo PMSG con el rectificador trifásico controlado y determinar los parámetros del sistema real.
- Diseñar e implementar una técnica de control óptimo robusto para lograr seguimiento de trayectorias en sistemas no lineales con coeficientes dependientes del estado.
- Implementar en tiempo real un algoritmo de control óptimo robusto, con el que se logra controlar la velocidad del PMSG para tener la máxima extracción de potencia.

## 1.7. Descripción de capítulos

La tesis está organizado en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 2:** Desarrollo y diseño de un algoritmo de control óptimo, para el seguimiento de trayectoria en el sistema no lineal del PMSG. Obtención del modelo PMSG-rectificador del sistema en el marco de referencia  $dq0$ .
- **Capítulo 3:** En este capítulo se describe el diseño del algoritmo de control óptimo robusto para seguimiento de trayectorias y se muestran los resultados a nivel simulación del PMSG en simulink con el controlador óptimo robusto.
- **Capítulo 4:** Se presentan los resultados de la implementación en tiempo real del algoritmo de control, donde participa el motor de inducción emulando la turbina de viento con algunos resultados de simulación en los cuales se compara el modelo promediado con el conmutado.

- **Capítulo 5:** Se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado y posibles trabajos futuros.

## Capítulo 2

# Modelado del sistema de generación eólica basado en un PMSG y rectificador trifásico controlado.

En este capítulo se presenta todo el proceso para modelar matemáticamente el sistema eólico. El PMSG cuenta con su modelo matemático y el rectificador controlado con otro. En esta sección se realiza un solo modelo del PMSG con el rectificador controlado para poder trabajar con un solo sistema, y así posteriormente diseñar un sistema de control.

### 2.1. Modelo promediado del convertidor AC/DC

La descripción completa de este modelado comienza por la turbina de viento y los algoritmos de control para la misma, después con la máquina PMSG y finalmente el modelo con el PMSG y el convertidor de potencia.

## 2.2. Modelo de la turbina de viento

La potencia mecánica de un aerogenerador depende de la relación específica de la turbina, que se define como la tasa entre la máxima velocidad del rotor de turbina y la velocidad del viento. La máxima eficiencia de conversión de energía en una turbina se produce en un punto particular para una velocidad del viento y un ángulo de paso particular de las aspas. Por lo tanto, cuando cambia la velocidad del viento, debe de cambiar la velocidad del generador para extraer la máxima potencia. La ecuación (2.1) se muestra la ecuación de la potencia de la turbina ( $P_{Turbina}$ ).

$$P_{Turbina} = \frac{1}{2}\rho Av^3 C_p \quad (2.1)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $A$  es el área de sección transversal,  $v$  es la velocidad del viento y  $C_p$  es el coeficiente de potencia proporcionado por una función polinomial [Muyang Li09].

Los aerogeneradores convierten la fuerza del viento en energía cinética.

La energía cinética es:

$$E_k = \frac{1}{2}mV_w^2 \quad (2.2)$$

Teniendo en cuenta la misma masa  $m$  moviéndose a una velocidad  $V_w$  pasando a través de un área  $A$ , la potencia mecánica disponible en el viento estará dada por

$$P_{wind} = \frac{1}{2}\rho mV_w^2 \quad (2.3)$$

La potencia de salida mecánica del aerogenerador puede ser expresado como

$$P_{extract} = \frac{1}{2}\rho AC_p(\lambda, \beta)V_w^3 \quad (2.4)$$

donde la densidad del aire es igual a  $1.1839kg/m^3$  a  $25^\circ C$ ;  $C_p$  representa el ideal o máxima eficiencia teórica de un aerogenerador, o la relación de potencia máxima obtenida del viento.[Gómez16]

$$C_p(\lambda, \beta) = \frac{P_{extract}}{P_{wind}} \quad (2.5)$$

$C_p$  depende de la relación de velocidad de la punta (TSR) Tip Speed Ratio  $\lambda$  y del ángulo de inclinación  $\beta$ . El torque puede ser expresado como:

$$T_m = \frac{P_{extract}}{w} \quad (2.6)$$

Tabla 2.1: Características de MPPTs.

Método	Precisión	Sensores
Lógica difusa	Buena	corriente(I), voltaje(V)
Red neuronal	Buena.	Estimador $V_w$
TRS	Excelente.	anemómetro $V_w$
P&O	Baja	corriente(I), voltaje(V)

donde  $w$  es la velocidad angular del rotor.

A continuación se describe un algoritmo MPPT.

Existen varios tipos de MPPT para sistemas fotovoltaicos y eólicos, incluso algunos algoritmos son muy similares. Estos sistemas se dividen en el lazo abierto y cerrado. En el caso de lazo abierto este tipo de algoritmos se basan en la medición de la velocidad del viento y mediante el sistema de control definir el punto de operación del sistema mientras que en los de lazo cerrado su principal característica es que presenta una realimentación de las variables de interés, tales como la velocidad del viento y la potencia entregada [Ruiz Salamanca17]. Dentro de los MPPT eólicos de lazo cerrado están descritos en la Tabla 2.1 [Frutos Martínez12]. En este trabajo se desarrollaron el Perturba y Observa  $P&O$  y el TRS.

### 2.2.1. Perturba y observa

Es una técnica de optimización matemática usada para la búsqueda de los puntos extremos de una función dada. Es ampliamente utilizado en los sistemas de generación eólica. El método está basado en perturbar un parámetro de control mediante pequeños incrementos y observar los cambios en la función objetivo hasta que la pendiente se vuelve cero.

Hay varias opciones para el método: algunos autores perturban la velocidad del generador y observan la potencia mecánica. Otros monitorean la potencia eléctrica de salida del generador y perturban el voltaje de entrada o una de las variables del convertidor: como el ciclo de trabajo, corriente de entrada o el voltaje de entrada del inversor. Como el método  $P&O$  no necesita un conocimiento previo de las curvas características del generador, es un sistema independiente, simple y flexible. Falla al alcanzar los puntos máximos de potencia

bajo rápidas variaciones de velocidad. Más aún, el problema de escoger el tamaño del escalón no es una tarea fácil; mientras que grandes escalones se traducen en un tiempo de respuesta rápido también hacen al sistema menos eficiente, por otra parte, escalones pequeños mejoran la eficiencia sacrificando la velocidad de convergencia. Esta técnica tiene la desventaja de que el sistema está continuamente perturbado, produciendo oscilaciones en las variables de control; este problema se incrementa cuando se presenta alta inercia en el sistema mecánico [Tan04]. En la Figura 2.1 se presenta el diagrama de flujo del método P&O.

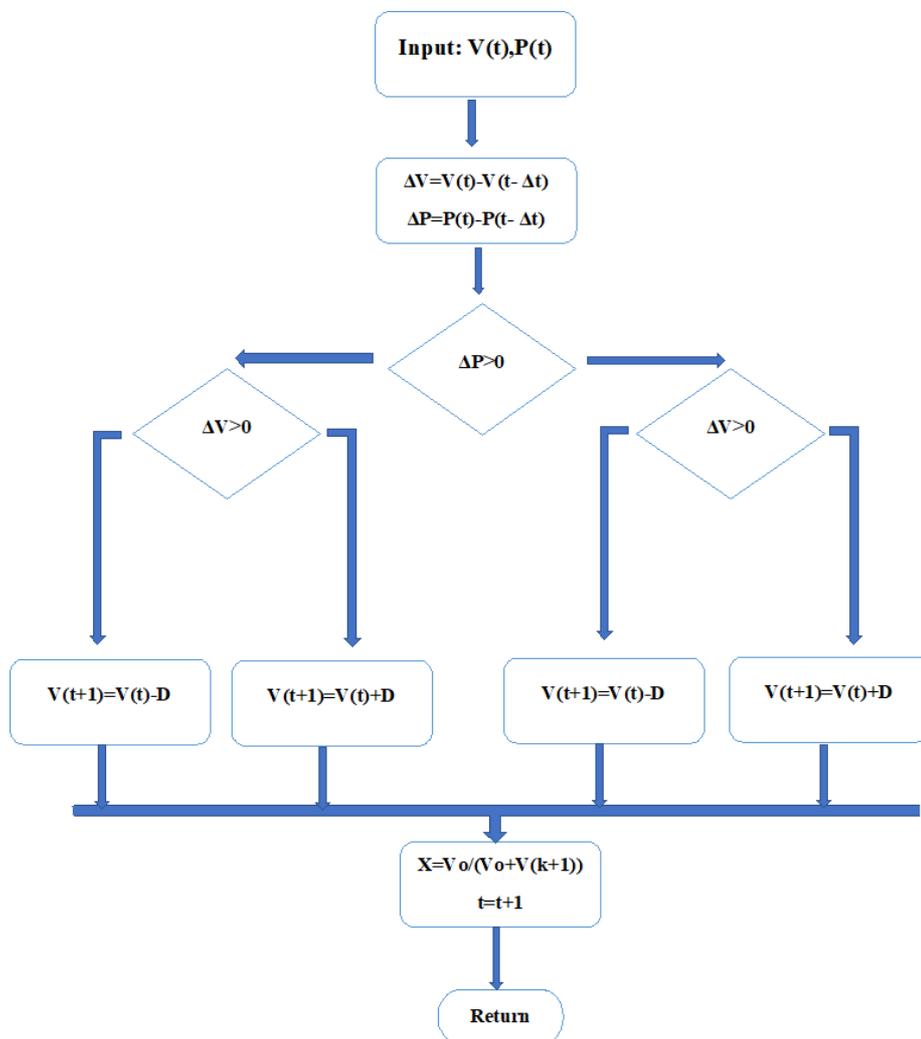


Figura 2.1: Diagrama de flujo del P&O.

### 2.2.2. El TRS-MPPT

El método TSR regula la velocidad de rotación del generador para mantener el TSR a un valor óptimo en el que la potencia extraída es máxima. Este método requiere tanto la velocidad del viento como la velocidad de la turbina, se midió con algún tipo de sensor o estimación, además se requiere saber el TSR óptimo de la turbina para que el sistema pueda extraer la máxima potencia posible. El TSR, es calculado como;

$$TSR = \lambda = \frac{\omega R}{V_w} \quad (2.7)$$

donde:  $\lambda$  velocidad de punta y  $R$  es el radio del rotor unidades en metros (m),  $\omega$  velocidad angular (rad/s) y  $V_w$  velocidad del viento. En la Figura 2.2 se muestra el diagrama de bloques de un sistema de conversión de energía eólica con TSR [Thongam11] .

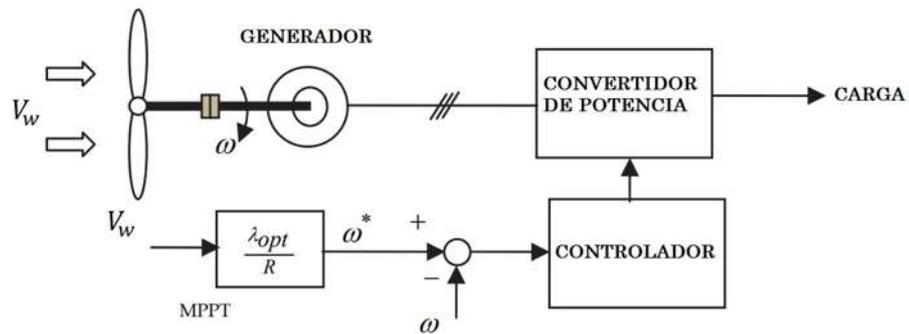


Figura 2.2: Sistema a bloques del TSR donde se mide la velocidad del viento para obtener una velocidad angular y compararla contra la real [Thongam11].

### 2.2.3. El coeficiente de potencia

El coeficiente de potencia o  $C_p$  indica con qué eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

Simplemente dividiendo la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir como de técnicamente eficiente es un aerogenerador. En otras palabras, tomamos la curva de potencia y la dividimos por el área del rotor para obtener la potencia disponible por metro cuadrado de área del rotor.

### 2.3. Modelado dinámico de la máquina síncrona de imanes permanentes.

Una máquina eléctrica se puede utilizar como generador o como motor, según la aplicación. El primer caso que se muestra en la Figura 2.3 usa la máquina en modo generador, mientras que el segundo caso se muestra la Figura 2.4 en modo motor. En velocidad variable, el par de entrada mecánica  $T_m$  del generador es proporcionado por la turbina de viento y la máquina funciona como un generador y produce la corriente eléctrica para inyectarse a la red trifásica a través de un convertidor de potencia. El par mecánico ( $T_m$ ) tiene un signo negativo en el caso del generador PMSG y tiene un signo positivo en el caso del motor PMSM. Sobre la base del signo de  $T_m$ , la dirección de la corriente y la potencia cambian, mientras que la dinámica de la máquina sigue siendo la misma. Estos modelos se utilizan tanto para el generador como para el motor.

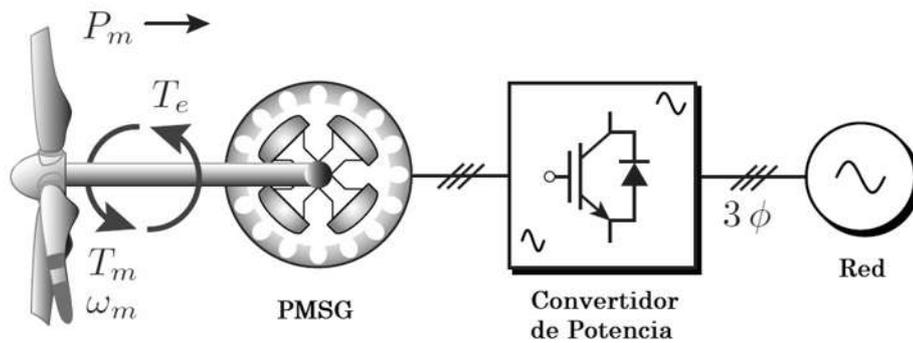


Figura 2.3: Proceso de conversión energía cinética a eléctrica [Yaramasu17].

La Figura 2.3 muestra el diagrama de los proceso de conversión de energía cinética del viento a eléctrica. Este Figura 2.3 muestras las diferentes etapas comenzando con la turbina, máquina PMSG, etapa de potencia y conexión a la red eléctrica. Cabe resaltar que la etapa de rectificación e inversión está indicada como una sola etapa de convertidor de potencia.

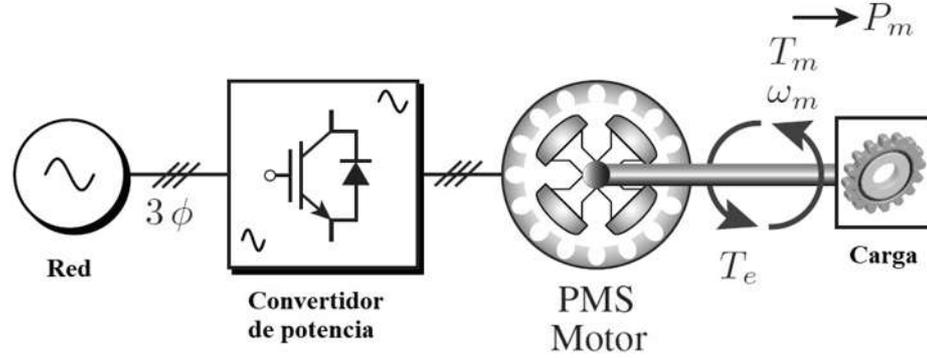


Figura 2.4: Máquina operando como motor, y generando energía mecánica [Yaramasu17].

En la Figura 2.4 se muestra la configuración de la máquina en modo motor PMSM. La dinámica de la velocidad del rotor mecánico es:

$$J_m \frac{d}{dt} \omega_m + B_m \omega_m = T_e - T_m \quad (2.8)$$

donde  $\omega_m$  es la velocidad mecánica del rotor (rad/s)  $T_e$  es el par electromagnético y  $T_m$  el par mecánico (N.m),  $J_m$  y  $B_m$  son el momento de inercia del eje ( $kg.m^2$ ) y la fricción viscosa ( $N.m.s$ ).

## 2.4. Modelado del PMSG.

El modelo PMSG con un convertidor de potencia trifásico se muestra en la Figura 2.5, la conexión estrella de la máquina está aislada del convertidor de potencia [Yaramasu17]. En un marco de referencia natural, los voltajes del estátor PMSG se expresan a continuación en términos de corrientes de estator y enlaces de flujo:

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ns} \\ v_{ns} \\ v_{ns} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

donde  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$  y  $v_{cs}$  son los voltajes de la máquina,  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$  y  $i_{cs}$  son las corrientes (A),  $\psi_{as}$ ,  $\psi_{bs}$  y  $\psi_{cs}$  son los flujos magnéticos (Wb) de la máquina,  $v_{ns}$  es el voltaje de punto neutro de la máquina y  $R_s$  es la resistencia de devanado de la máquina ( $\Omega$ ).

Los flujos magnéticos en el marco  $abc$  se originan a partir del flujo magnético permanente y la corriente que fluye a través de la propia máquina 2.5 y las inductancias mutuas [Yaramasu17].

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_r \cos \theta_r \\ \psi_r \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \psi_r \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

donde  $L_{aa}, L_{bb}$  y  $L_{cc}$  son las inductancias de cada línea  $abc$ ,  $M_{ab}, M_{bc}$  y  $M_{ac}$  son las inductancias entre fase y fase y  $\psi_r$  es el máximo flujo magnético creado por los imanes.

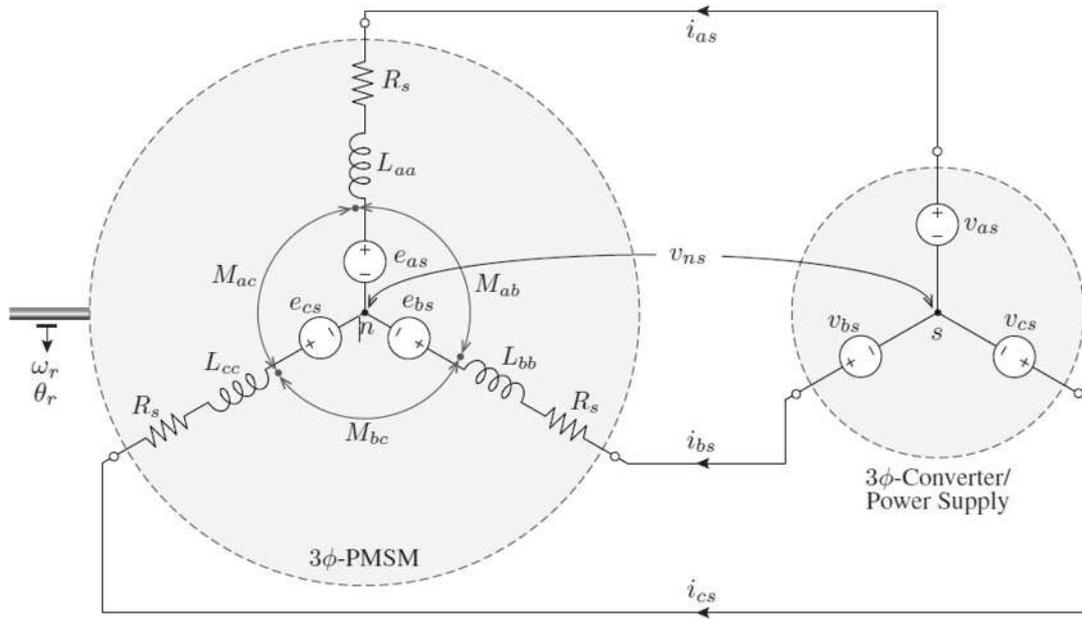


Figura 2.5: Modelo PMSM trifásico con un convertidor de potencia trifásico [Yaramasu17].

Al combinar (2.9) y (2.10) se puede obtener la derivada de las corrientes trifásicas en términos de voltajes de la máquina, corrientes, enlaces de flujo magnético de imán permanente y una matriz que contiene inductancias variables en el tiempo. Sin embargo, para lograr el modelo final de la dinámica de corriente de la máquina, se hacen operaciones en el matriz que varía con el tiempo. Se procede a cambiar del marco  $abc$  a  $dq0$  llamada transformación de Park [Chen03]. La conversión de un modelo de marco  $abc$  a un marco  $dq0$  implica un proceso de dos pasos: Primero los modelos  $abc$  en (2.9) y (2.10) se transforman

de  $abc$  a  $dq0$ . Los voltajes del estátor en el marco  $dq0$  son:

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

donde  $v_{ds}$  y  $v_{qs}$  son los voltajes de estátor en el marco  $dq0$ ,  $i_{ds}$  y  $i_{qs}$  son las corrientes de estátor en el marco  $dq0$ ,  $\psi_{ds}$  y  $\psi_{qs}$  son los flujos magnéticos del estátor en  $dq0$  y  $\omega_r$  es la velocidad del rotor.

De manera similar los flujos también se convierten a  $dq0$  como se muestra:

$$\begin{bmatrix} \psi_{ds} \\ \psi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ds} & 0 \\ 0 & L_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_r \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

En el marco  $dq0$ , los valores  $L_{ds}$ ,  $L_{qs}$  y  $\psi_r$  se vuelven invariantes en el tiempo. Los valores simplifican significativamente el análisis para el modelado y control de PMSM o PMSG. Como tal se llegó a la versión simplificada del modelo PMSM en  $dq0$ .

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_{ds} \\ \omega_r L_{ds} & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ds} & 0 \\ 0 & L_{qs} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \psi_r \end{bmatrix}. \quad (2.13)$$

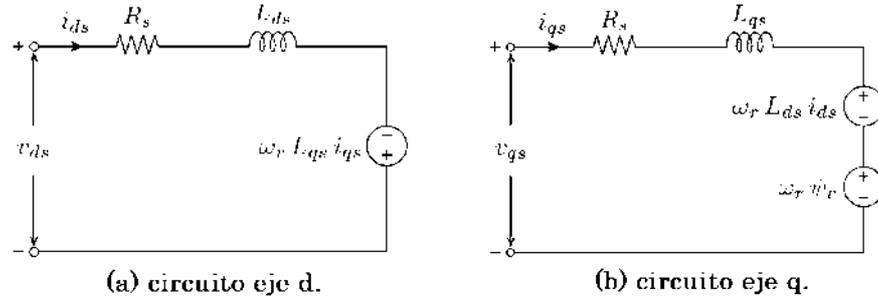


Figura 2.6: Representación de los circuitos de estado estable del eje  $dq0$  para un PMSM [Yaramasu17].

Del modelo anterior, la dinámica de la corriente del estátor  $dq0$  se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{ds}} & \frac{\omega_r L_{qs}}{L_{ds}} \\ -\frac{\omega_r L_{ds}}{L_{qs}} & -\frac{R_s}{L_{qs}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ds}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{qs}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\omega_r \psi_r}{L_{qs}} \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Ahora que ya se tiene el modelo de la máquina PMSG, se hace una explicación de los voltajes que llegan al convertidor, para poder explicar como se desarrolla el modelo del rectificador controlado.

Considerando el voltaje de entrada sinusoidal de tres fases del convertidor en un marco de referencia  $abc$ .

$$V_{as}(t) = V_m \cos(\omega t) \quad (2.15)$$

$$V_{bs}(t) = V_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad (2.16)$$

$$V_{cs}(t) = V_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \quad (2.17)$$

Las ecuaciones de voltaje inductivo en cada fase y corriente capacitiva se pueden escribir de la siguiente manera.

$$L \frac{di_{as}}{dt} = V_{as} - V_{ag} \quad (2.18)$$

$$L \frac{di_{bs}}{dt} = V_{bs} - V_{bg} \quad (2.19)$$

$$L \frac{di_{cs}}{dt} = V_{cs} - V_{cg} \quad (2.20)$$

$$C \frac{dv_{DC}}{dt} = V_{ag}i_{as} + V_{bg}i_{bs} + V_{cg}i_{cs} - I_{load}. \quad (2.21)$$

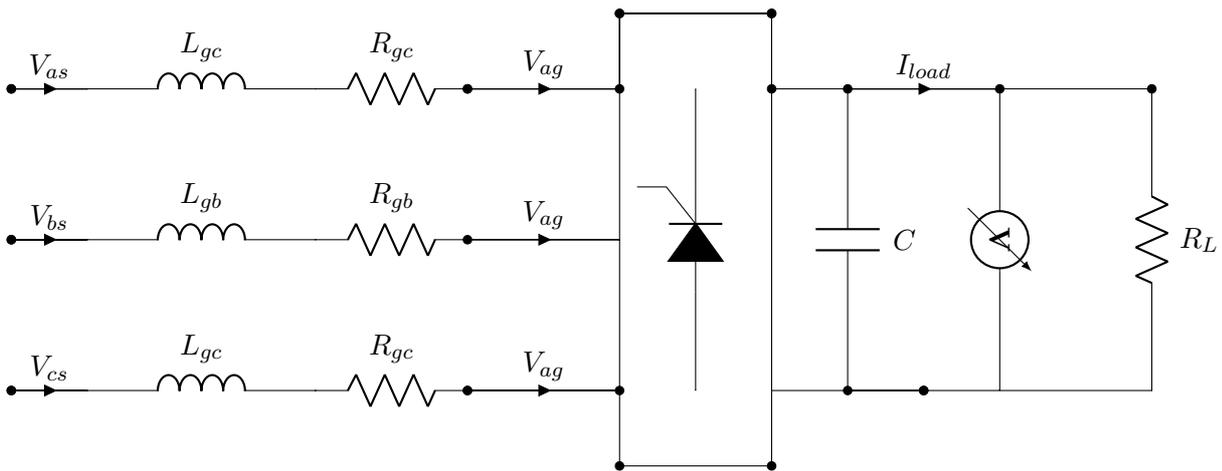


Figura 2.7: Circuito para el modelado PMSG

En la Figura 2.7 se muestra el voltaje del capacitor  $V_{DC}$  y la corriente de la carga  $R_L$  representada como  $I_{load}$ . Las ecuaciones (2.18)-(2.19)-(2.20)-(2.21) están en el marco  $abc$  y se necesitan cambiar al marco  $dq0$ . Las ecuaciones transformadas quedan:

$$L \frac{di_d}{dt} = V_d + \omega L i_d - V_d \quad (2.22)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = V_q + \omega L i_q - V_q \quad (2.23)$$

$$C \frac{dv_{DC}}{dt} = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) - I_{load} \quad (2.24)$$

donde  $\omega$  es la velocidad angular del PMSG,  $V_d$  y  $V_q$  los voltajes en  $dq0$ .

El modelo completo de la máquina PMSG con la etapa de potencia del rectificador trifásico, reflejado en la potencia de corriente alterna debe ser igual a la potencia en corriente directa del lado del capacitor.

$$P_{AC} = P_{DC} \quad (2.25)$$

$$\frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) = V_{DC} I_{DC} \quad (2.26)$$

Partiendo en (2.24),  $C \frac{dV_{DC}}{dt}$ . En las siguientes ecuaciones se muestra la suma de la corriente en el capacitor  $I_c$  mas la corriente en la carga  $I_L$ .

$$I_c = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (2.27)$$

$$I_c = I_{DC} - I_{load} \quad (2.28)$$

$$I_{DC} = I_c + I_{load} \quad (2.29)$$

Desarrollando esta ecuación se obtiene la siguiente expresión (2.30), donde se muestra que la corriente en directa es igual a la corriente del capacitor más la corriente:

$$I_{DC} = C \frac{d}{dt} V_c + \frac{V_c}{R_L} \quad (2.30)$$

Ahora se sustituye (2.30) en (2.26) para obtener:

$$\frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) = V_{DC} \left( C \frac{d}{dt} V_c + \frac{V_c}{R_L} \right) \quad (2.31)$$

Despejando  $\frac{d}{dt} V_c$ .

$$\frac{d}{dt} V_c = \frac{3}{2 V_{DC} C} (V_d i_d + V_q i_q) - \frac{V_c}{R_L C} \quad (2.32)$$

Con (2.32) y las ecuaciones de la máquina PMSG (2.14) (2.13) se obtuvo el modelo completo del rectificador controlado. El modelo matemático completo con la máquina PMSG con el rectificador queda de la siguiente manera:

$$\dot{x}_1 = \frac{Tm}{J} - \frac{\mu x_1}{J} + \frac{3x_3\psi p}{2J} \quad (2.33)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{-R_s x_2}{L_d} + \frac{x_1 p L_q x_3}{L_d} + \frac{V_d}{L_d} \quad (2.34)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{-p\psi x_1}{L_q} - \frac{x_1 L_d p x_2}{L_q} - \frac{R_s x_3}{L_q} + \frac{V_q}{L_q} \quad (2.35)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{-x_4}{R_L C} - \frac{3x_2 V_d}{2C x_4} - \frac{3x_3 V_q}{2C x_4} \quad (2.36)$$

Figura 2.8: Modelo en espacio de estados del PMSG.

donde  $\omega$  sera el  $x_1$ ,  $i_{ds}$  es  $x_2$ ,  $i_{qs}$  es  $x_3$  y  $V_c$  es  $x_4$ .

El sistema descrito por la Figura (2.8), puede ser representado mediante una factorización de coeficientes dependientes del estado como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x)x + B(x)u + D \\ y &= C(x)x \end{aligned} \quad (2.37)$$

Se explicara más a detalle sobre esta factorización en el Capítulo 3, las matrices dependientes del estado  $A(x), B(x), C(x)$  y  $D$  están dadas por

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{-\mu}{J} & 0 & \frac{3\psi p}{2J} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_d} & \frac{x_1 p L_q}{L_d} & 0 \\ \frac{-p\psi}{L_q} & \frac{-x_1 L_d p}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{R_L C} \end{bmatrix}; B(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ -\frac{3x_2}{2C x_4} & -\frac{3x_3}{2C x_4} \end{bmatrix};$$

$$C(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} \frac{T_m}{J} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

### 2.4.1. Conclusión de capítulo

En el capítulo se mostró el modelo del sistema que se pretende controlar y se transformó de *abc* a *dq0* reduciendo la complejidad de manejo del sistema. En el siguiente capítulo se habla de la técnica de control que se va a utilizar para este sistema.



## Capítulo 3

# Control no lineal óptimo robusto para el sistema de generación

En este capítulo se presenta un controlador para seguimiento óptimo de trayectorias en sistemas no lineales de coeficientes factorizables, mismo que es aplicado al sistema descrito en el Capítulo 2, correspondiente al Rectificador Controlado y al PMSG, para realizar seguimiento óptimo de potencia. En un sistema de control, un análisis básico de control es una referencia que se le da al controlador, éste manda una entrada de control a la planta o sistema a controlar y se retroalimenta, llegando a una salida controlada, como se puede ver en la Figura 3.1. El controlador propuesto minimiza un índice de desempeño que pondera el esfuerzo de control y el error de seguimiento. Se muestran resultados a nivel simulación de la aplicación del controlador, considerando en una primera instancia que todos los estados están disponibles para retroalimentación. Es necesario el control para seguimiento óptimo de trayectorias ya que el sistema depende de la velocidad del viento, dicha variable esta cambiando en el tiempo y para poder extraer la máxima potencia es necesario hacer un seguimiento de trayectorias óptimo.

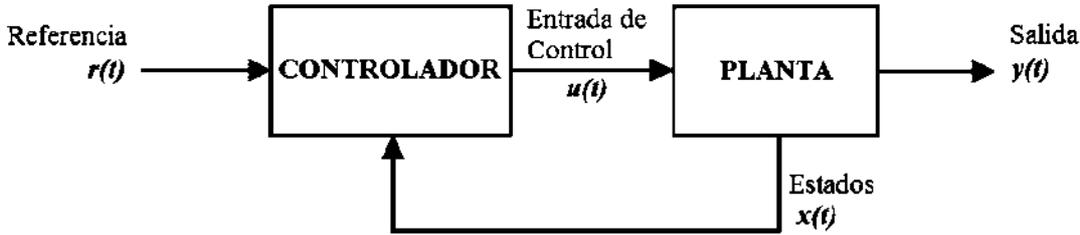


Figura 3.1: Análisis básico de control sobre un sistema o planta

### 3.1. Control óptimo

En general, los sistemas que pueden considerarse control clásico son lineales e invariantes en el tiempo, además cuentan con una entrada y una salida. El objetivo principal es diseñar utilizando métodos de diseño de control clásico es estabilizar una sistema, mientras que los objetivos secundarios pueden incluir la obtención de una determinada respuesta transitoria, ancho de banda, rechazo de perturbaciones, el error de estado estacionario y la robustez de la planta ante incertidumbres.

Uno de los principales objetivos del control moderno, en contraposición al clásico, es presentar soluciones a una clase más amplia de los problemas de control. El control óptimo es una rama del control moderno que se relaciona con el diseño de controladores para sistemas dinámicos tal que se minimice una función de medición que se denomina índice de desempeño o funcional de costo del sistema [Anderson89]. En términos más formales, el objetivo principal de la teoría de control óptimo es determinar las señales de control que causan que un proceso satisfaga las restricciones físicas que se tengan y así mismo minimizar o maximizar, según sea el caso, cierto criterio de desempeño.

El control óptimo tiene propiedades que presentan ventajas en comparación con otras clases de estrategias de control. A continuación se enuncian algunas de las propiedades de este esquema de control, particularmente del regulador cuadrático lineal (LQR), donde éstas vienen determinadas por parámetros que ponderan el desempeño de las variables del sistema y el esfuerzo de control (a través de las matrices  $Q$  y  $R$  en un funcional de costo), y del propio sistema (mediante su descripción por las matrices  $A$ ,  $B$  y  $C$ , en una representación

en espacio de estados).

- La estabilidad del control óptimo lineal en lazo cerrado es garantizada si el sistema de control cumple que:  $R > 0$ ,  $Q \geq 0$ , el par  $(A; B)$  es estabilizable y el par  $(A; C)$  es detectable, donde  $Q = C^T C$  [Anderson89].
- El control óptimo (LQR), provee un margen de ganancia (GM) infinito y un margen de fase (FM) de al menos  $60^\circ$ . Lo anterior se puede considerar como márgenes de estabilidad adecuados, y son propiedades de robustez que todo diseño de control debería proveer. Por otro lado, la segunda propiedad permite tener ciertas variaciones paramétricas o retardos en el sistema de control, los cuales afectarían el margen de fase del sistema, sin llegar a desestabilizar al sistema de control [Anderson89].
- Un LQR tiene un índice de funcionamiento (funcional de costo), que justamente evalúa el desempeño del sistema de control.
- La sintonización del LQR se hace regularmente de manera experimental, pero cumpliendo las condiciones del punto uno mencionado previamente, no se afectaría la estabilidad en el lazo cerrado, independiente de la elección de  $Q$  y  $R$ .

El control óptimo puede resolverse utilizando el principio máximo de Pontryagin (con condición necesaria) [Pontryagin18] y el método de programación dinámica desarrollado por Bellman [Bellman62]. Este último lleva a una ecuación diferencial parcial no lineal, la cual es conocida como ecuación de Hamilton-Jacobi-Bellman (HJB), cuya solución proporciona controladores por retroalimentación de estados y trayectorias óptimas para cada condición inicial [Primbs99]. El controlador óptimo se deriva a partir de la ecuación de HJB, cuya solución puede obtenerse para una clase de sistemas no lineales, llamados sistemas no lineales con factorización dependiente del estado (SDCF).

## 3.2. Sistemas no lineales

Los sistemas físicos son inherentemente de naturaleza no lineal, por lo que los sistemas de control son no lineales [Slotine91]. Un sistema no lineal puede ser representado

por un conjunto de ecuaciones diferenciales en la forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= f_i(x_i, u_p) \\ y_i &= h_i(x_i, u_p) \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde  $x_i \in \mathfrak{R}^n$  denota la variable de estado,  $u_p \in \mathfrak{R}^m$  son las variables de entrada, y  $y \in \mathfrak{R}^p$  es el vector de salida que comprende las variables de particular interés,  $f_i$  y  $h_i$  son mapas de diferentes dimensiones. Un valor particular del vector de estado es denominado punto porque corresponde a un punto en el espacio de estado, y el número de  $n$  estados se denomina orden del sistema.

### 3.3. Sistemas no lineales SDCF

Linealización extendida [Friedland12], también conocida como linealización aparente [Wernli75], o factorización de coeficiente dependiente del estado (SDCF) [Cloutier97], [Ornelas-Tellez17] es el proceso de factorizar un sistema no lineal en una estructura semejante al lineal, que contiene matrices dependientes del estado. De (3.1), considere una clase de entrada no lineal descrito como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + B(x)u + D \\ y &= h(x) \end{aligned} \tag{3.2}$$

donde  $x \in \mathfrak{R}^n$  es el vector de estado,  $u \in \mathfrak{R}^m$  es la entrada de control, y  $y \in \mathfrak{R}^p$  es el sistema de salida de la función  $f(x)$ ,  $B(x)$  y  $h(x)$  son suficientemente suaves para hacer que el sistema este bien definido, y se supone que pueden descomponerse en el SDCF. Bajo los supuestos  $f(\cdot) \in C_1(\Omega)$  y  $f(0) = 0$  existe una función continua de valor matricial no lineal tal que  $f(x) = A(x)x$  y  $h(x) = C(x)x$ , respectivamente [Shamma03]. Entonces el sistema (3.2) se puede reescribir como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(x)x + B(x)u + D \\ y &= C(x)x \end{aligned} \tag{3.3}$$

**Consideración 1:** Ahora en adelante, el sistema (3.3) se nombrará en esta tesis como SDCF factorización de coeficiente dependiente del estado no lineal, y se utilizará para fines de análisis y control.

**Consideración 2:** Las factorizaciones  $A(x)x$  y  $C(x)x$  no son únicas; entonces, con el fin de obtener esquemas de control bien definidos, estas factorizaciones deben elegirse en orden para cumplir con las propiedades de controlabilidad y observabilidad dependientes del estado, como se ve en [Hammett98, Ornelas-Tellez13]. Asociadas con el SDCF, se establecen las siguientes definiciones:

**Definición 1:** [Antsaklis07] Un estado  $x_1$  se llama accesible si existe una entrada que transfiere el estado del sistema  $x$  del estado cero a  $x_1$  en un tiempo finito  $T$ . Además, un estado  $x_0$  se llama controlable si existe una entrada que transfiere el estado desde  $x_0$  hasta el estado cero en tiempo finito  $T$ .

**Definición 2:** [Antsaklis07] El concepto de observabilidad se refiere a la capacidad de determinar el estado actual  $x_0$  de un sistema dado, a partir del conocimiento de salidas pasadas  $y$  y entradas presentes  $u$ .

**Definición 3:** [Cimen10] El SDCF es una parametrización controlable del sistema no lineal en una región  $\Omega$  si el par de matrices  $[C(x); A(x)]$  es detectable puntualmente (respectivamente observable) en sentido lineal  $\forall x \in \Omega$ .

La matriz de controlabilidad de SDCF debe satisfacer:

$$\text{rank}\{C(x)\} = n \forall x \quad (3.4)$$

con

$$C(x) = \begin{bmatrix} B(x) & A(x)B(x) & \dots & A^{n-1}(x)B(x) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

mientras que la matriz de observabilidad debe cumplir

$$\text{rank}\{O(x)\} = n \forall x \quad (3.6)$$

$$O(x) = \begin{bmatrix} C(x) \\ C(x)A(x) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ C(x)A^{n-1}(x) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

### 3.4. Control óptimo para sistemas SDCF

El objetivo habitual de la teoría de control es influir en el comportamiento de un sistema dinámico, que evoluciona con el tiempo, para alcanzar ciertos objetivos deseados. La teoría de control óptimo busca que el control optimice un cierto criterio, o función de costo. El control óptimo es una rama de la teoría de control estrictamente relacionada con la optimización. Si bien este tipo de problemas aparecen en la práctica desde hace cientos de años, es en las décadas de 1950 y 1960 que cobran real importancia. El estudio de problemas de control óptimo determinista fue un área de investigación muy activa a partir de los años 1950, motivado fuertemente por el creciente interés en la ingeniería aeroespacial. La ecuación de Riccati dependiente del estado (SDRE) [Cimen10], conlleva la factorización de la dinámica no lineal de un sistema en el producto de una función de valor matricial (dependiente en el estado), y un vector de estado. Al hacerlo, el algoritmo SDRE captura completamente las no linealidades del sistema, y en el contexto de control óptimo, permite la minimización de un índice de rendimiento cuadrático, que tiene una estructura de tipo lineal. SDRE ha surgido como una metodología de diseño general, que proporciona un medio sistemático de diseño de observadores y filtros no lineales, esto incluye misiles, aviones, no tripulados, vehículos aéreos, satélites, naves espaciales, vehículos submarinos, sistemas biomédicos y robótica [Cimen10]. De acuerdo con la existencia de la solución SDRE. Se exponen las siguientes consideraciones:

**Consideración 3:** Si las matrices  $A(x)$ ,  $B(x)$ ,  $C(x)$  están delimitadas y por partes continuas y, si el par  $[A(x), B(x)]$  es observable, entonces la solución de SDRE es definida positiva y acotada.

**Consideración 4:** Si los pares  $[A(x), B(x)]$  y  $[A(x), C(x)]$  son estables y detectables  $\forall x$ , el SDRE tiene una solución única y asintóticamente estable.

Las consideraciones anteriores se derivan de las propiedades de los sistemas lineales en términos de la ecuación de Riccati como se ve en [Kalman60], y para esta tesis, estas propiedades son consideradas como heredadas a los sistemas SDCF debido a su estructura semejante al lineal.

### 3.5. Control óptimo para la estabilización de sistemas no lineales.

Considere un sistema no lineal descrito por (3.3). El objetivo del controlador de estabilización óptimo no lineal es proporcionar una ley de control óptima  $u(x)$  tal que estabilice el sistema (3.3). El controlador óptimo no lineal es introducido por el siguiente teorema.

**Teorema 2:** [Ornelas-Tellez13] Suponga que el sistema (3.3) es un control dependiente del estado, y observable, entonces es posible calcular un ley de control óptimo  $u(x)$  de manera que proporcione estabilidad asintótica del sistema en lazo cerrado:

$$u^*(x) = -R^{-1}B^T(x)P(x)x \quad (3.8)$$

lo que minimiza el siguiente funcional de costo descrito por:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (3.9)$$

Donde  $Q$  y  $R$  son matrices simétricas y definidas positivas y  $P(x)$  es la solución a State-dependent Riccati matrix differential equation (SDRE) dada por:

$$\dot{P}(x) = -Q + P(x)B(x)R^{-1}B^T(x)P(x) - A^T(x)P(x) - P(x)A(x) \quad (3.10)$$

con la condición límite  $P(x(\infty)) = 0$ . De acuerdo con el teorema 2, se logra la estabilización de (3.3).

### 3.6. Control óptimo no lineal para seguimiento de trayectorias.

El control óptimo no lineal de seguimiento de trayectorias [Ornelas-Tellez13], es una metodología de control óptimo extendido no lineal mediante el uso del SDCF para seguir señales o referencias que varían en el tiempo. El problema considerado es el control de seguimiento en horizonte infinito [Carlson12] de sistemas no lineales, derivados del problema de regulación [Athans13], que tiene el objetivo de "mantener el estado cerca de cero".

### 3.6.1. Planteamiento del problema de seguimiento

Considere el sistema dado por (3.2), que se puede describir en el SDCF dado por (3.3). Considerando la salida del sistema  $y$  una referencia o señal  $r$ , el objetivo del control de seguimiento óptimo no lineal es hacer que la salida del sistema siga la señal de referencia deseada, y al mismo tiempo, minimice un índice de rendimiento o funcional de costo dado como:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (3.11)$$

con un error de seguimiento de trayectoria definido como:

$$\begin{aligned} e &= r - y \\ &= r - C(x)x \end{aligned} \quad (3.12)$$

donde  $r$  es la referencia a seguir, el vector  $r$  puede ser considerado como la salida deseada para el sistema, como se ve en [Antsaklis07];  $Q$  y  $R$  son simétricos y sus matrices definidas positivas. El esquema de seguimiento óptimo se ocupa del problema de determinar una ley de control óptimo  $u(x)$  que force la salida del sistema (3.3) para rastrear una referencia  $r$ , en el sentido óptimo de minimizar el funcional de costo dado (3.11), por lo que el error de seguimiento  $e$  está minimizado [Athans13]. La matriz  $Q$  es una matriz que evalúa el rendimiento del vector de estado, mientras que  $R$  es una matriz que evalúa el gasto del esfuerzo de control, si se le da más importancia al rendimiento del estado del sistema, se podría seleccionar un valor más alto para  $Q$  o reducir el valor de  $R$ . La matriz  $Q$  también se puede seleccionar como  $Q(x)$  para ganar flexibilidad en las entradas de  $Q$ , de tal manera que puedan definirse como funciones de error para ponderar el rendimiento del controlador en términos del error.

Se reportan diferentes metodologías en el que se calculan los valores óptimos de la matriz  $Q$ , como se ve en [Ornelas-Tellez13] donde se utiliza un método de optimización de enjambre de partículas, podría ser un enfoque diferente el uso de las llamadas reglas de Bryson para sistemas lineales, por lo tanto las entradas de la matriz  $Q$  podrían ser seleccionados como:

$$q_n = \frac{\alpha}{\beta|e| + \gamma} \quad (3.13)$$

Por lo tanto, se garantiza que para errores más “pequeños” el elemento de la matriz  $Q$  será una constante definida por  $\lim_{e \rightarrow 0} (q_n) = \frac{\alpha}{\gamma}$  y para el caso de “gran” esfuerzo de control

$\lim_{e \rightarrow \infty} (q_n) = 0$  lo que reduce el esfuerzo de control. El siguiente teorema establece la solución al problema de control óptimo de seguimiento de trayectoria para sistemas SDCF:

**Teorema 3:** [Ornelas-Tellez17] Supongamos que el sistema 3.3 es controlable dependiente del estado y observable, luego la ley de control óptimo no lineal.

$$u^*(x) = -R^{-1}B^T(x)(P(x)x - z(x)) \quad (3.14)$$

logra el seguimiento de la trayectoria del sistema 3.3, a lo largo de una trayectoria deseada  $r$ , donde  $P(x)$  es la solución de la SDRE y  $z(x)$  es la solución de una ecuación diferencial vectorial, respectivamente, donde

$$\dot{P}(x) = -C^T(x)QC(x) + P(x)B(x)R^{-1}B^T(x)P(x) - A^T(x)P(x) - P(x)A(x) \quad (3.15)$$

$$\begin{aligned} \dot{z}(x) &= -[A(x) - B(x)R^{-1}B^T(x)P(x)]^T z(x) - C^T(x)Qr + PD \\ \dot{\varphi}(x) &= -\frac{1}{2}r^T Qr + z^T D + \frac{1}{2}z^T B(x)R^{-1}B^T(x)z \end{aligned} \quad (3.16)$$

Algunas condiciones  $P(x(\infty)) = 0$ ,  $z(x(\infty)) = 0$  y  $\varphi(\infty) = 0$ .

Aplicando el diseño de control, el sistema del PMSG en la Figura 2.8 puede ser representado en la forma SDCF como:

$$\dot{x} = A(x)x + B(x)u + D \quad (3.17)$$

$$y = C(x)x \quad (3.18)$$

El vector de estados esta compuesto (3.19) y las entradas de control (3.20).

$$x^T = \begin{bmatrix} \omega & i_{ds} & i_{qs} & V_c \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$u = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$A(x) = \begin{bmatrix} \frac{-\mu}{J} & 0 & \frac{3\psi p}{2J} & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_d} & \frac{x_1 p L_q}{L_d} & 0 \\ \frac{-p\psi}{L_q} & \frac{-x_1 L_d p}{L_q} & \frac{-R_s}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{R_L C} \end{bmatrix}; B(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \\ -\frac{3x_2}{2Cx_4} & -\frac{3x_3}{2Cx_4} \end{bmatrix};$$

$$C(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} \frac{T_m}{J} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Figura 3.2: Modelo en SDCF del PMSG.

### 3.6.2. Conclusión de capítulo

En este capítulo se presento el desarrollo del algoritmo de control como la aplicación del control óptimo robusto para sistemas no lineales que pueden ser representados con una estructura con coeficientes dependientes del estado. En el siguiente capítulo se presenta simulación y la aplicación en tiempo real de este controlador para el sistema de generación basado en el PMSG.

## Capítulo 4

# Resultados de simulaciones y experimentos.

En este capítulo se muestran los experimentos, así como la comparación del modelo promediado con el conmutado, esto quiere decir que se toma un modelo conmutado en el software Matlab/Simulink, donde se encuentra en un bloque la máquina del PMSG, y se compara contra el modelo promediado en la Figura 4.1. En este capítulo se mostrarán todos los resultados que son obtenidos de la aplicación de control óptimo robusto diseñado para el sistema PMSG.

### **4.1. Comparación del modelo matemático promediado con el modelo conmutado.**

Se realizó una prueba de congruencia de los dos modelos, ya que para poder utilizar el control óptimo no lineal es necesario tener un modelo matemático y conmutado que tengan un comportamiento muy parecido. Se realizó una prueba a lazo abierto con un mismo torque de entrada y se observaron los estados del sistema; A continuación, se muestra un diagrama en la Figura 4.1 en Matlab/Simulink del diagrama en la simulación de tal prueba. Cabe resaltar que la prueba fue realizada con condiciones iniciales de acuerdo con los parámetros del PMSG que se tiene en el Laboratorio de Control de la División de Estudios de Posgrado

de la FIE-UMSNH.

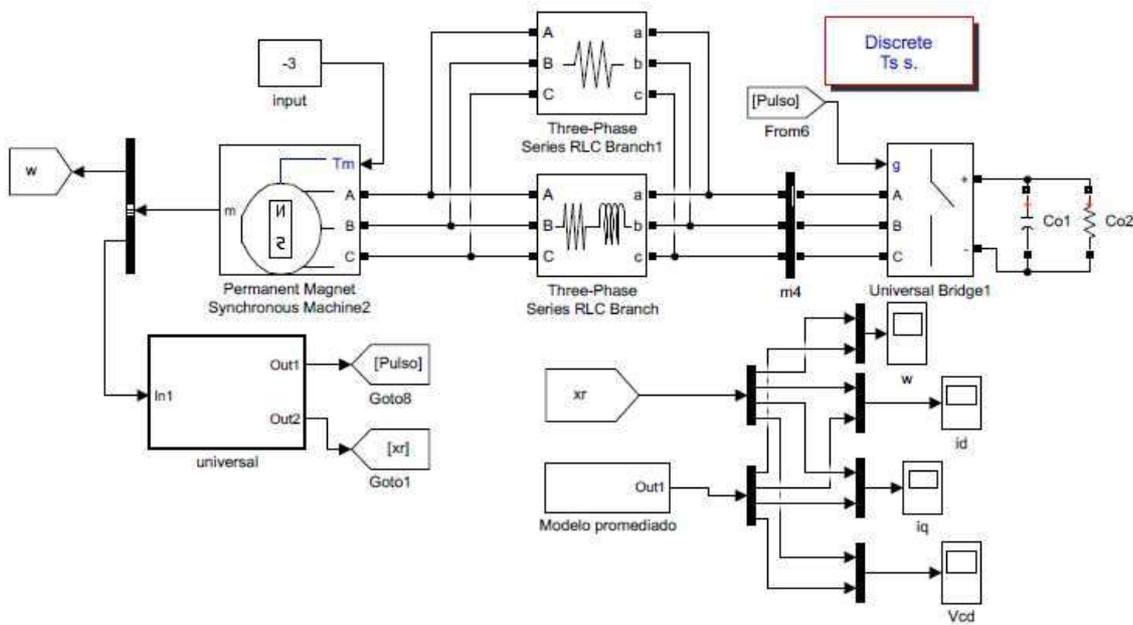


Figura 4.1: Diagrama entre modelos

En la Figura 4.1 el esquema del sistema PMSG está a lazo abierto, dentro del bloque modelo promediado se encuentra todo el desarrollo matemático ya explicado en el Capítulo 2. Esta comparación está bajo condiciones iniciales ideales, quiere decir sin perturbaciones y sin fricción, de esta manera se demostraron los diferentes estados obteniendo la convergencia al mismo punto.

En las Figuras 4.2,4.3,4.4,4.5 se muestran los cuatro estados del modelo matemático contra el conmutado.

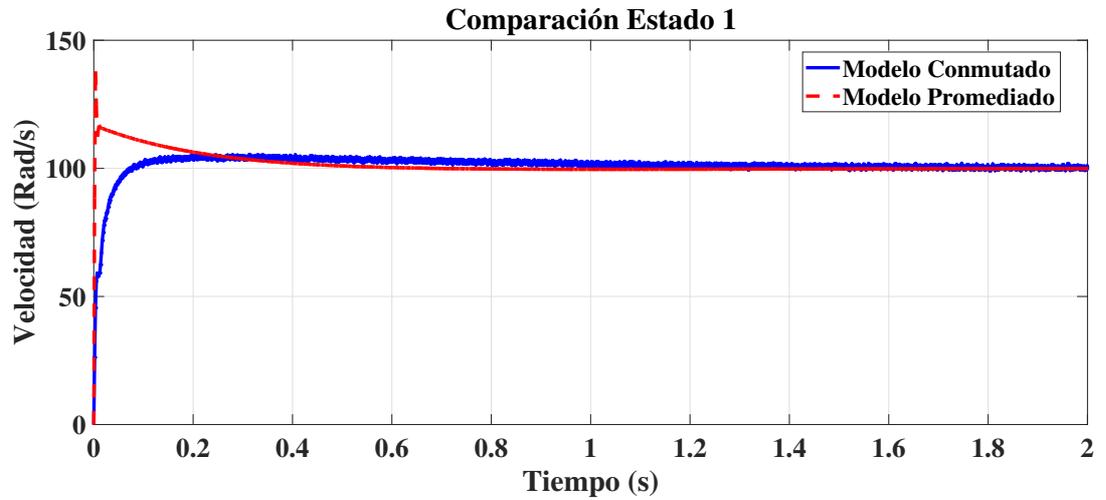


Figura 4.2: Comparación entre estados  $x_1$  conmutado y promediado.

Como se ve en la Figura 4.2, la línea punteada es el comportamiento del modelo promediado y la línea continua es el modelo conmutado, notando que las dos llegan al mismo valor.

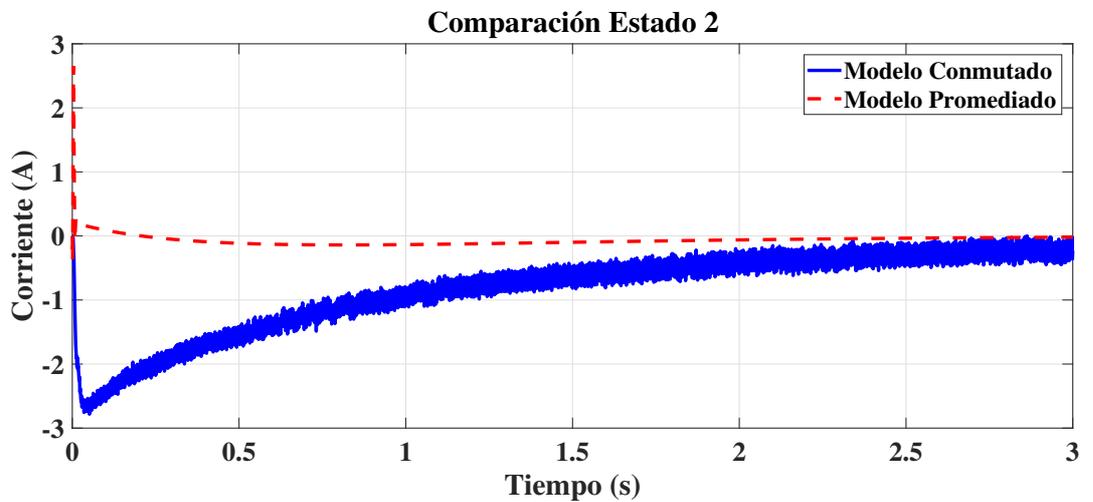


Figura 4.3: Comparación entre estados  $x_2$  conmutado y promediado.

Como se ve en la Figura 4.3, la línea punteada es el comportamiento del modelo promediado y línea continua es el modelo conmutado, notando que las dos convergen al mismo valor.

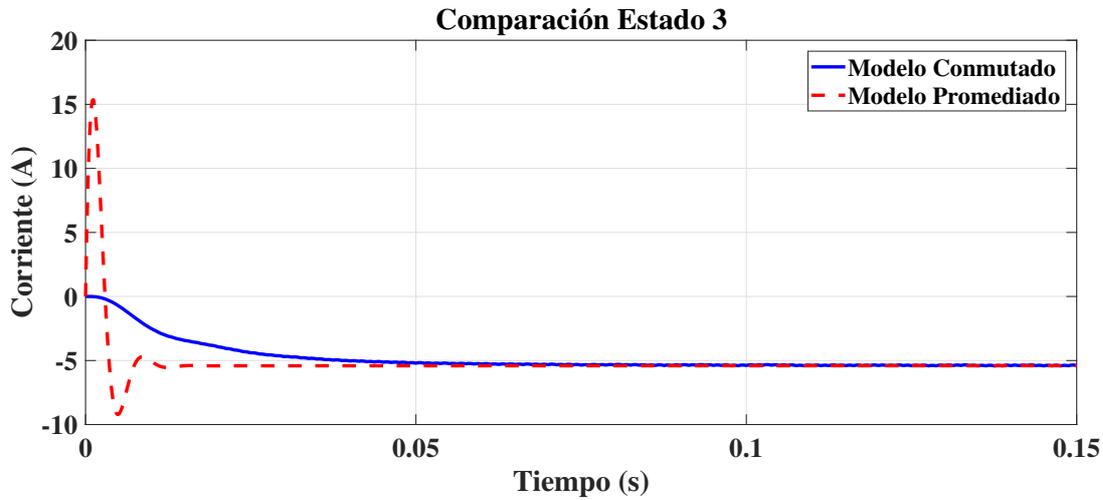


Figura 4.4: Comparación entre estados  $x_3$  conmutado y promediado.

En la Figura 4.4, están las corrientes  $i_q$  de los dos modelos, la línea punteada es el comportamiento del modelo promediado y la línea continua es el modelo conmutado, notando que las dos llegan al mismo punto.

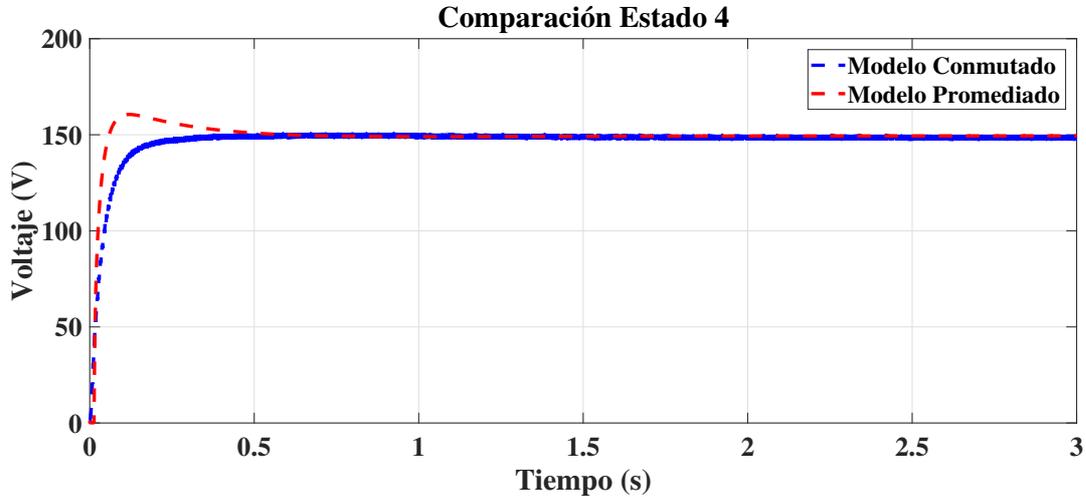


Figura 4.5: Comparación entre estados  $x_4$  conmutado y promediado.

El voltaje del capacitor se ve en la Figura 4.5, la línea punteada es el comportamiento del modelo promediado y la línea continua es el modelo conmutado, estas llegan al mismo punto. Con este experimento queda definido que el sistema promediado se compor-

Tabla 4.1: Valores de las variables PMSG.

Parámetro PMSG	Valor
$R_s$	10.5
$L_d$	0.0038
$L_q$	0.0038
$\psi$	0.238236
$J$	0.00059714
$\mu$	0.0005396
Número de polos	4

ta similar que el conmutado dando por hecho que es posible utilizarlo para poder realizar control óptimo robusto.

## 4.2. Control óptimo a nivel simulación del sistema PMSG

En esta simulación se controla la corriente  $i_d$ ,  $\omega$  e  $i_q$  donde  $i_q$  es controlada indirectamente por  $\omega$ , en el modelo matemático se puede apreciar como están relacionadas, es deseable que  $i_d$  vaya a 0 e  $i_q$  tome valores dado por la  $\omega$  (velocidad de referencia). La Tabla 4.1 muestra los parámetros del PMSG, donde  $R_s$  es la resistencia de la máquina,  $L_d$  y  $L_q$  son las inductancias,  $\psi$  es el flujo magnético,  $J$  es la inercia y  $\mu$  es la fricción. Las simulaciones se realizaron con condiciones iniciales en el control óptimo en  $P = 0$ ,  $Z = 0$  y en la máquina  $\omega=1$ ,  $V_c = 1$ . Las condiciones iniciales de la máquina son diferentes a uno en velocidad  $\omega$  y voltaje del capacitor  $V_c$  por qué en el modelo matemático hay divisiones entre estas variables y puede llegar a tener discontinuidad la simulación.

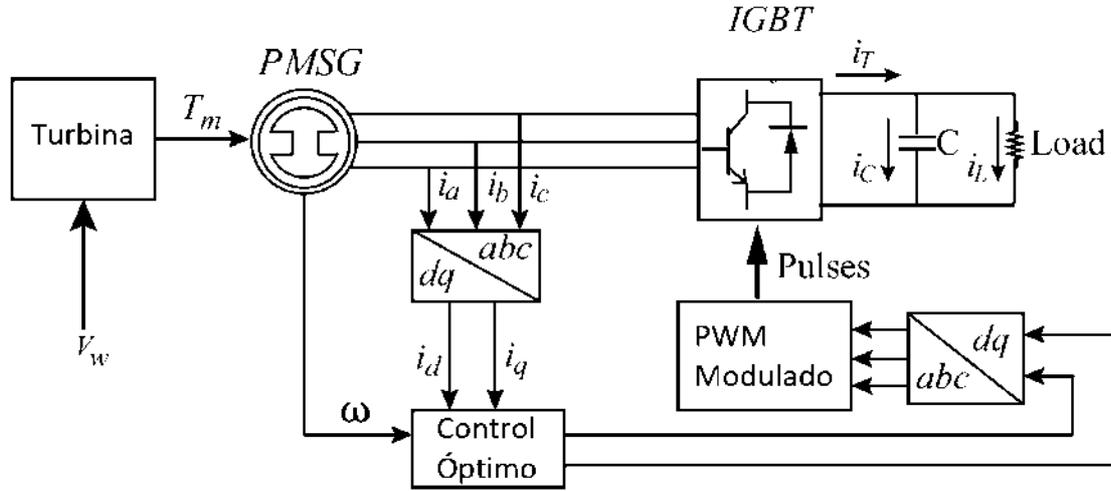


Figura 4.6: Diagrama a bloques del sistema.

En la Figura 4.6 se puede ver el diagrama a bloques del sistema PMSG con el control óptimo y las transformaciones  $dq0$ .

Se muestran las ganancias  $Q$  y  $R$  del control óptimo simulado dando prioridad a los estado  $x_1$  y  $x_2$  para lograr controlar la velocidad  $\omega$ .

$$Q = \begin{bmatrix} 150 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} .1 & 0 \\ 0 & .1 \end{bmatrix}.$$

#### 4.2.1. Emulador de turbina para el PMSG

A nivel simulación se propone una turbina horizontal adecuada para el generador por lo cual se toma una turbina con los parámetros de la Tabla 4.2.

De entrada se usó un perfil de viento variable como se muestra en la Figura 4.7. Esto da a la salida de la turbina un par mecánico, el cual es la entrada al generador, el par debe tener signo negativo para que funcione en modo generador y no en modo motor. En la simulación se utilizó un viento aleatorio comenzando en  $10m/s$  con variación de  $3m/s$  con cambio cada segundo, se realizara en trabajos futuros con un perfil real de viento obteniéndolo

Tabla 4.2: Parámetros de Turbina

VARIABLES	Valor
$\rho$	$1.2 \frac{Kg}{m^3}$
$A$	$2m^2$
$v$	10 m/s
$C_p$	0.3876

del estación meteorológica. A continuación se muestra en la Figura 4.7 resultados a nivel simulación de la turbina eólica.

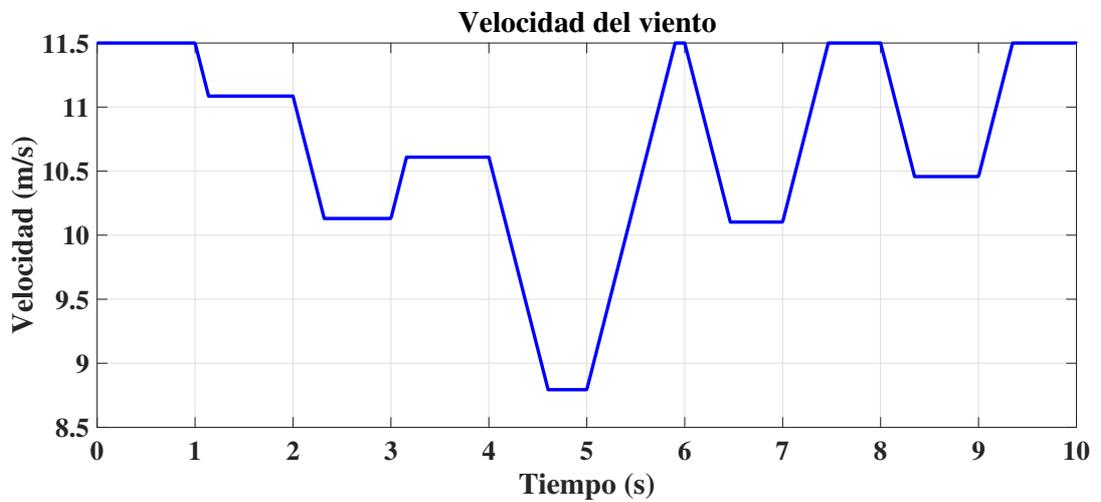


Figura 4.7: Perfil de viento para la turbina.

En la Figura 4.8 se puede apreciar la extracción de potencia con el MPPT TSR, donde la línea punteada roja es la potencia entregada por la turbina y la línea continua azul es la potencia a la salida del rectificador trifásico controlado, teniendo en cuenta que hay pérdidas por diferentes factores como la fricción del rotor, por calentamiento entre otras (aproximadamente de 30 a 40 watts).

En en la Figura 4.9 se muestra el perfil de viento utilizando el MPPT TSR, donde la línea punteada muestra la velocidad de referencia que da el MPPT al sistema, y la línea continua es la velocidad real de la máquina PMSG, donde se ve claramente que el control óptimo está cumpliendo con el seguimiento de trayectorias, ya que una de las variables a

controlar fue la velocidad.

En la Figura 4.10 se ve la velocidad del PMSG, con un MPPT distinto, el P&O, en este algoritmo se aprecia que el control responde con el seguimiento de trayectorias, aunque se puede observar que es mucho más inestable la señal que en la Figura 4.9 ya que en el MPPT TRS está utilizando la medición directa del viento esto bajo condiciones iniciales ideales sin ruido en el sensado al medir la velocidad del viento, a lo que se traduce que utiliza un sensor para medir la velocidad del viento (anemómetro) y en el caso del MPPT *P&O*, solo se utilizan mediciones de potencia (sensor de corriente y voltaje) y velocidad angular (encoder).

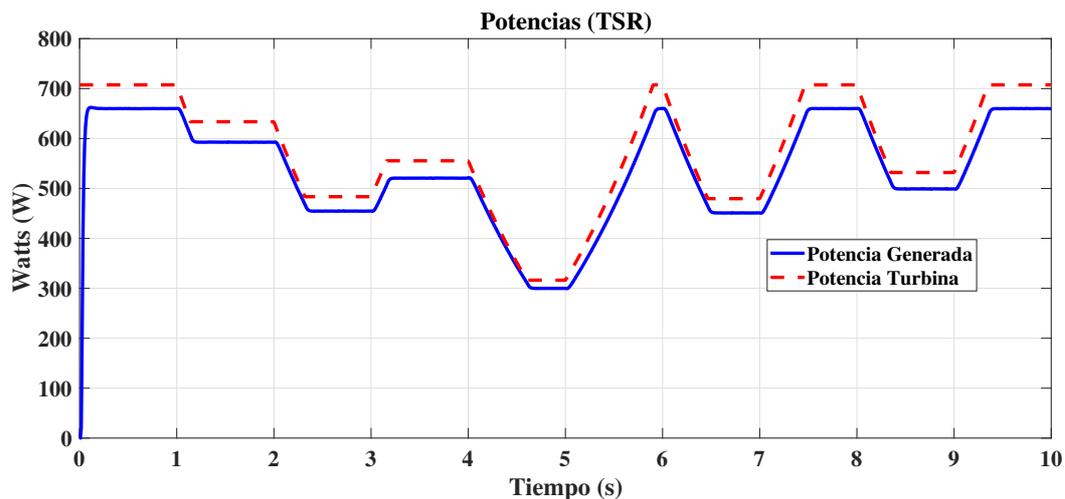


Figura 4.8: Potencia extraída del PMSG.

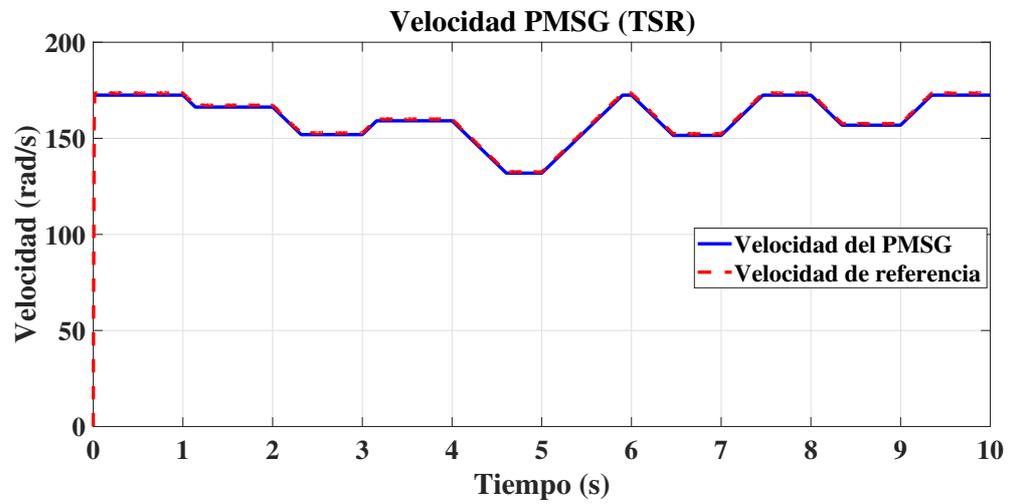


Figura 4.9: Velocidad del PMSG y referencia.

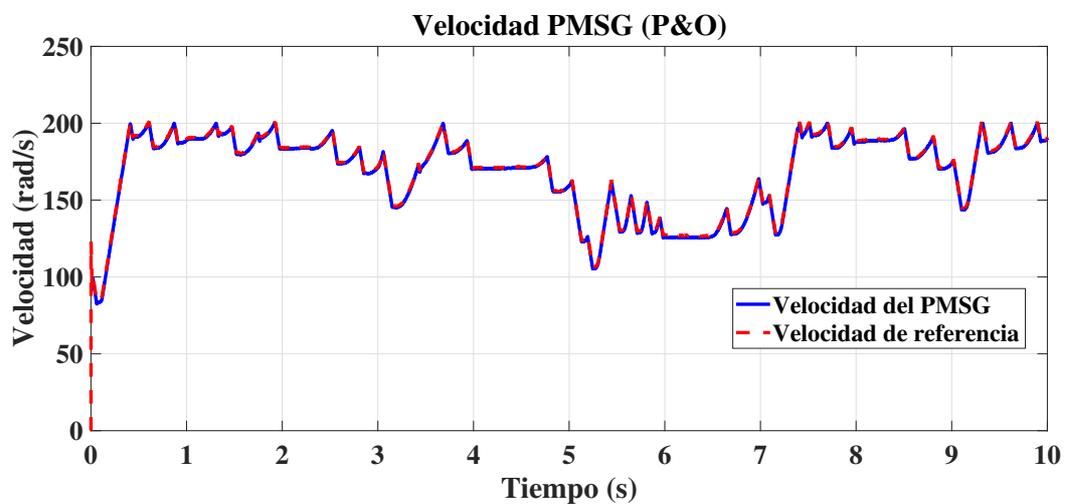


Figura 4.10: Velocidad del PMSG con referencias del P&amp;O.

En la Figura 4.11 la potencia extraída con el MPPT P&O, para fines comparativos con el MPPT TSR.

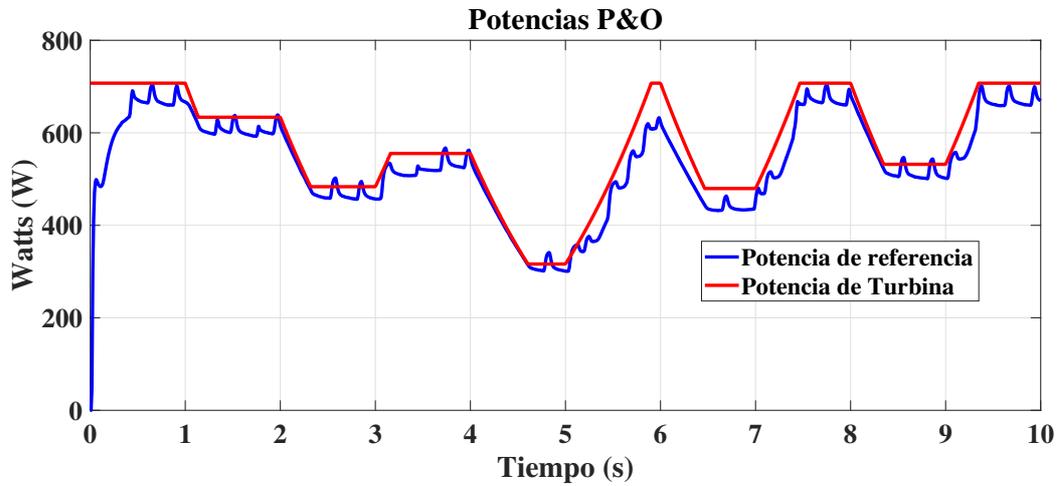


Figura 4.11: Potencia extraída del PMSG usando P&O.

Se aprecia una potencia muy parecida entre los dos MPPTs, aunque con el *P&O* es muy variable y esto podría afectar la máxima extracción. A continuación, en la Figura 4.12, se muestra el coeficiente de potencia  $C_P$  de la máquina con *P&O*, donde se puede ver que se mantiene en el punto óptimo de la turbina, lo cual permite saber que el sistema está funcionando óptimamente.

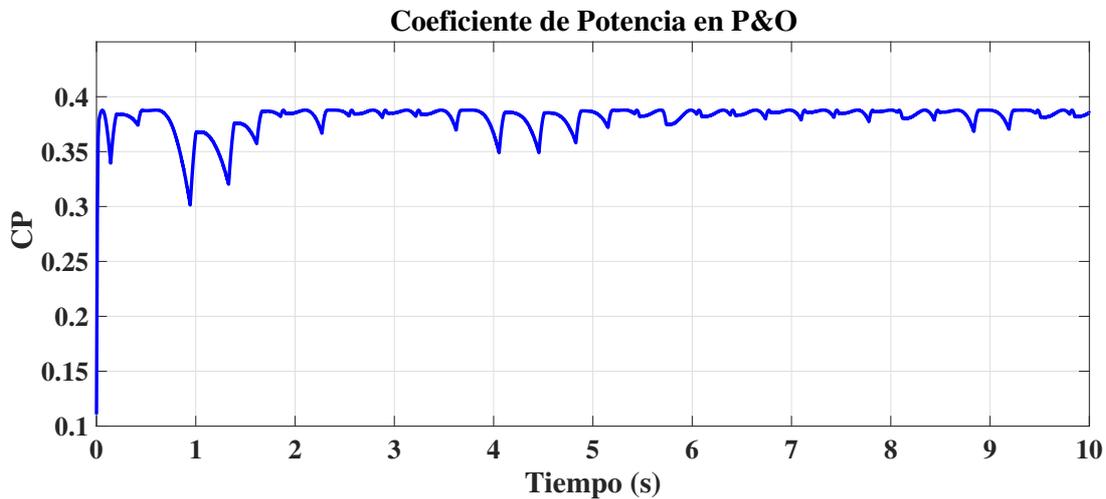


Figura 4.12: Coeficiente de Potencia del MPPT P&O.

La Figura 4.13 muestra el  $C_P$  del MPPT TSR donde se ve claramente una señal mu-

cho más estable, ya que este MPPT cuenta con el sensor de velocidad del viento (anemómetro) y de esta manera tiene un mejor comportamiento que el *P&O*, y manteniéndose en el punto óptimo de la turbina.

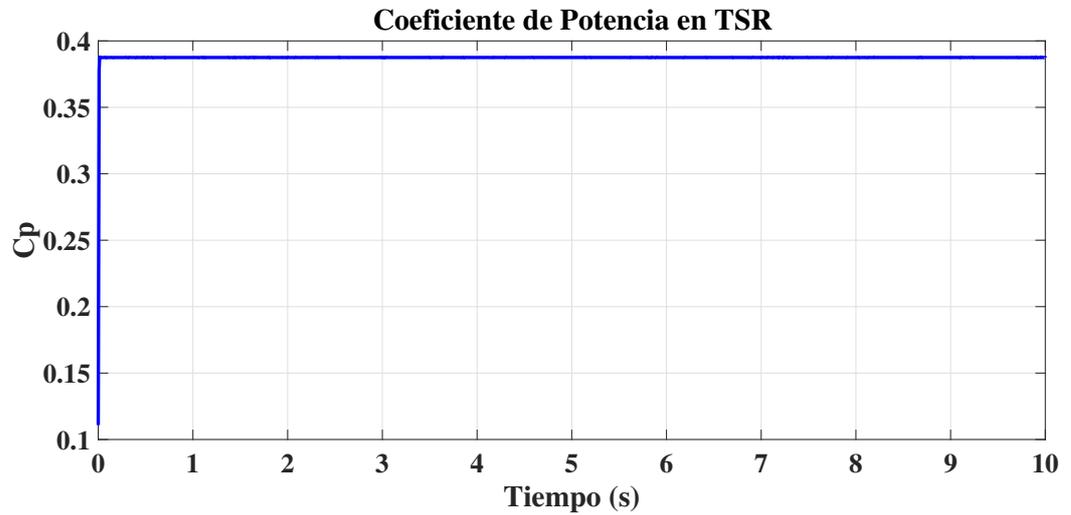


Figura 4.13: Coeficiente de Potencia del MPPT TSR.

En la Figura 4.14 se muestra la corriente  $i_q$ , donde se observan los cambios que tiene correspondiendo a los de la velocidad (en la Figura 4.9).

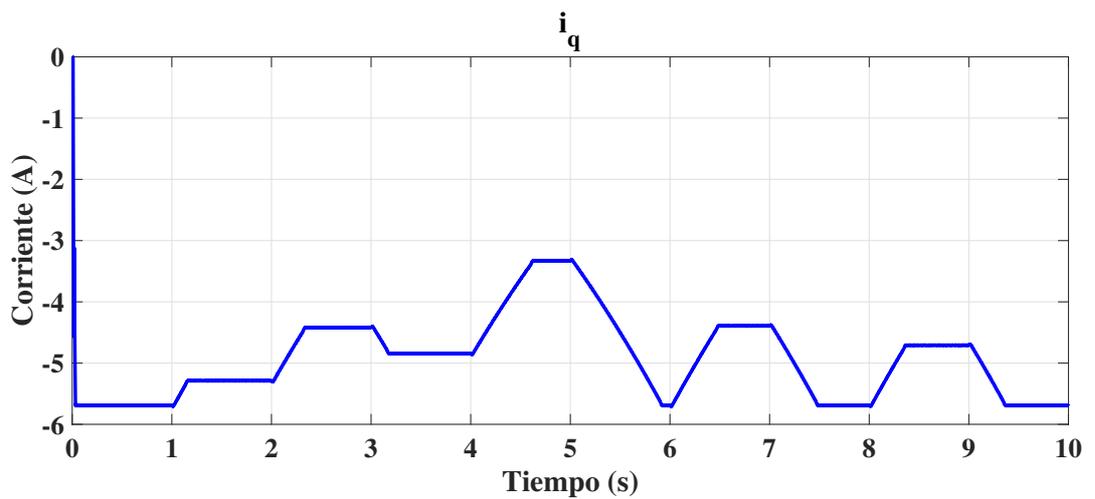


Figura 4.14: Estado  $i_q$  con control óptimo.

El estado  $i_d$  que se muestra en la Figura 4.15 es una corriente en la cual se está aplicando control óptimo con referencia 0, esto para perder la menor cantidad de potencia y extraer la máxima del generador, y para mantener un mejor control en la velocidad por la relación del torque electromagnético  $T_e$ .

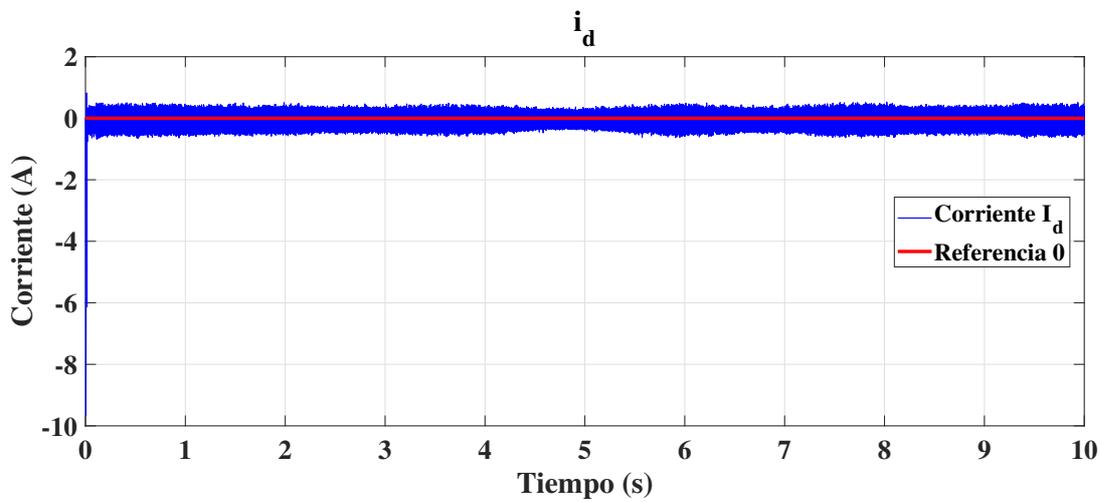


Figura 4.15: Estado  $i_d$  mostrando el control sobre una referencia 0.

En esta configuración del PMSG en la que las inductancias son iguales no es muy necesario el control en esta variable ya que la corriente  $i_q$  queda relacionada directamente con la velocidad  $\omega$ , en el caso de la configuración del PMSG de polos salientes donde no son iguales las inductancias es muy importante mantener en 0 la corriente  $i_d$ .

En la Figura 4.16 está el estado  $x_4$  del sistema, esto es el voltaje en el capacitor, donde se ven los cambios de voltaje directamente relacionados con la velocidad del viento.

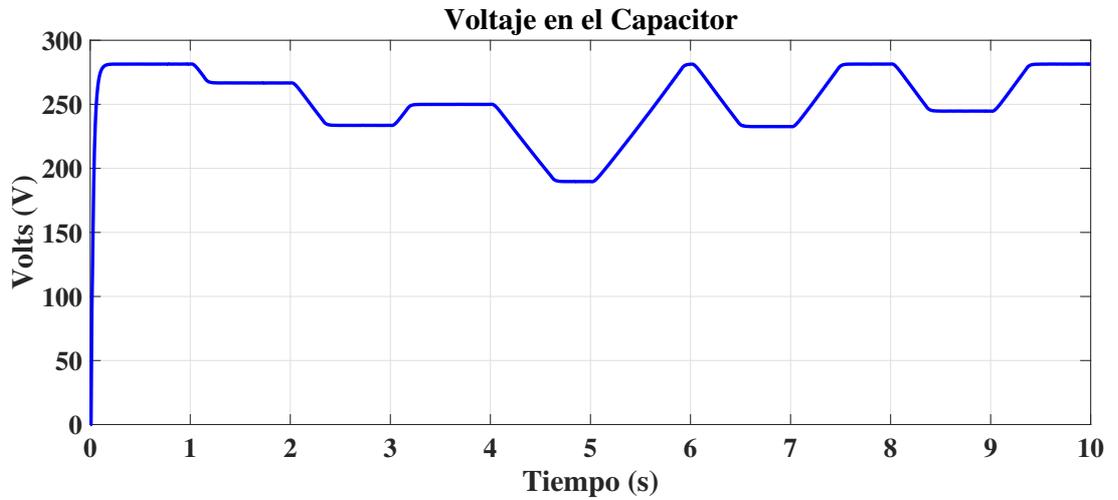


Figura 4.16: Estado  $V_c$  voltaje del capacitor comportamiento con control óptimo.

Para poder utilizar el PWM es necesario transformar las señales de control  $V_d$  y  $V_q$  en el marco  $abc$ , como se puede apreciar en la Figura 4.17.

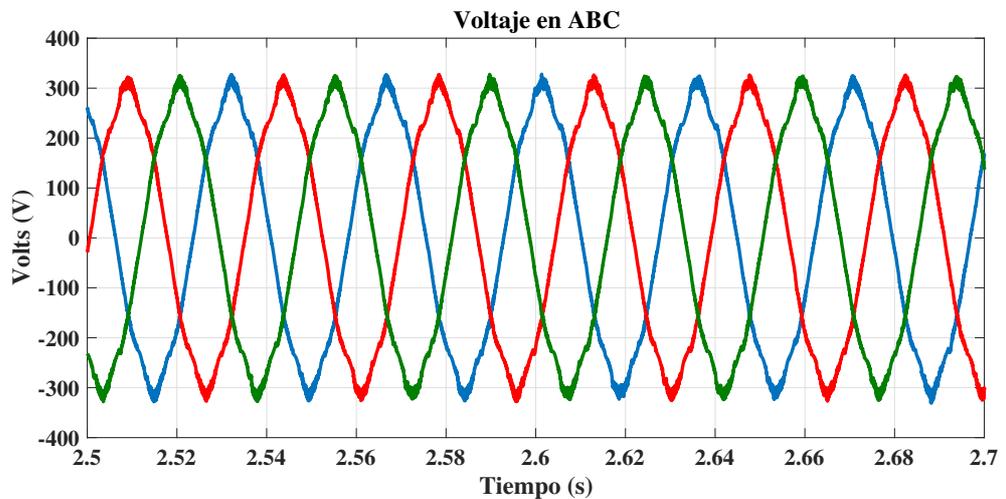


Figura 4.17: Voltajes de control  $V_d$  y  $V_q$ , después de la transformación al marco  $abc$ .

En la Figura 4.18 se muestra la posición del rotor, que es una señal de diente de sierra, en la cual cada pico es una vuelta del rotor ( $2\pi/rad$ ), donde se necesita saber la posición para poder sincronizar y hacer las transformaciones a  $dq0$  ya que el modelo matemático del PMSG está diseñado para el marco  $dq0$ .

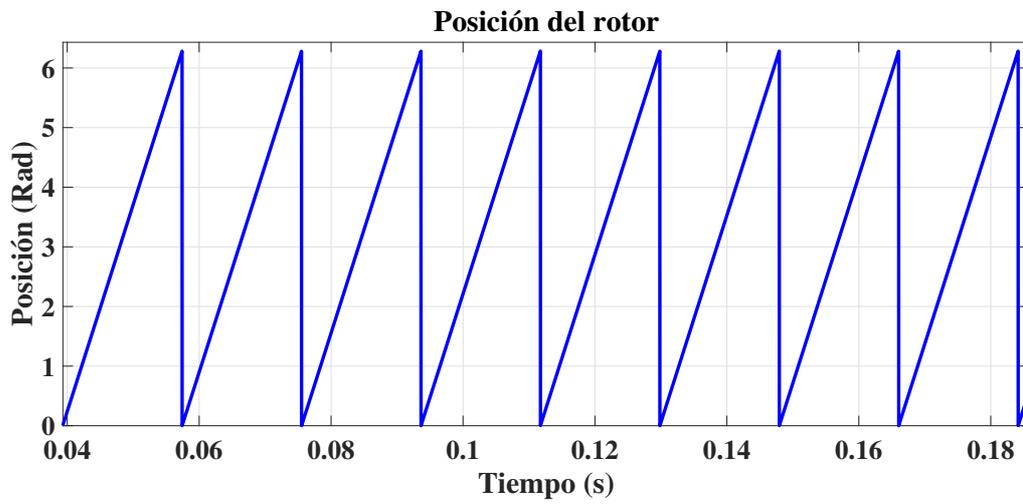


Figura 4.18: Posición del rotor respecto al tiempo.

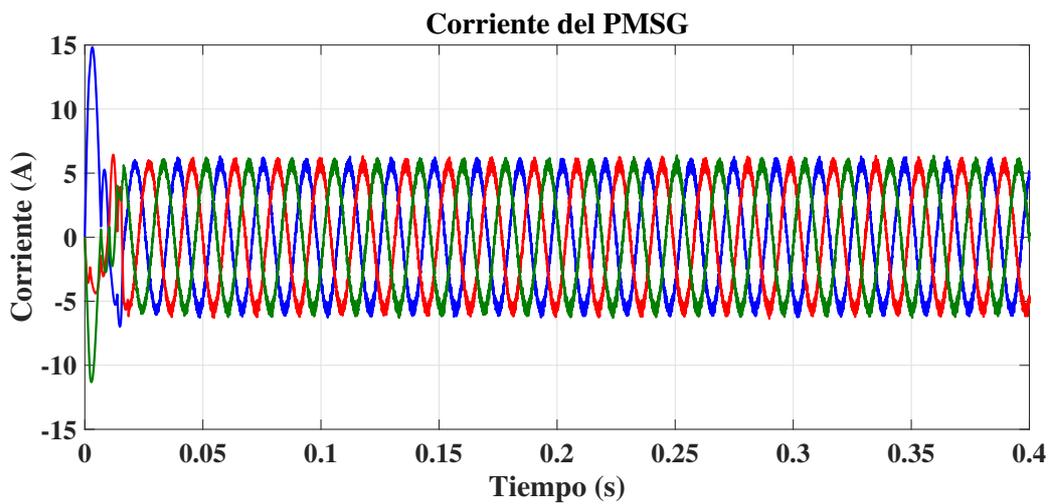


Figura 4.19: Corrientes del PMSG.

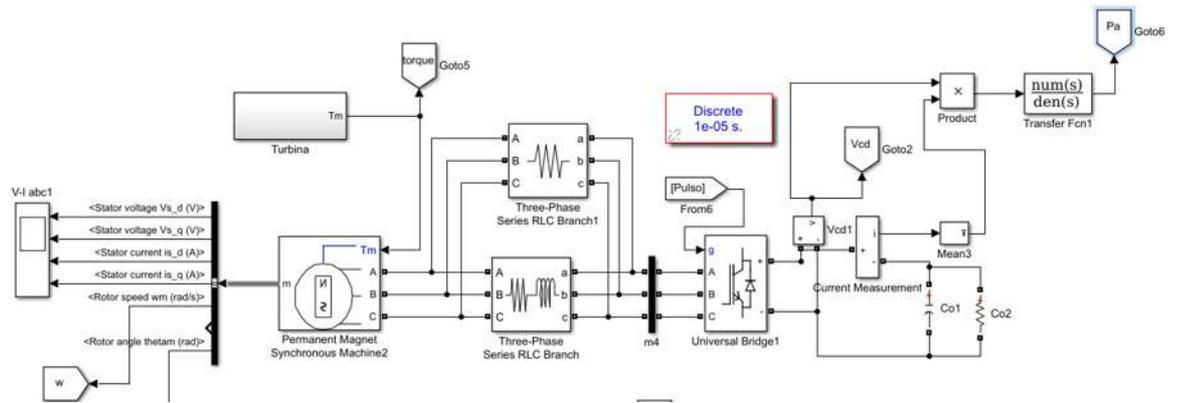


Figura 4.20: Diagrama de simulación en Matlab/Simulink parte 1 se muestra el bloque del PMSG y el rectificador.

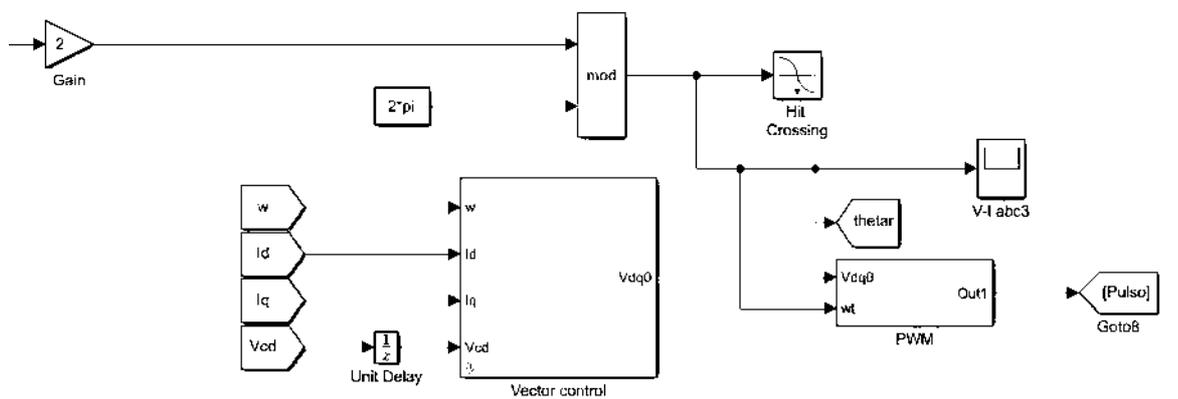


Figura 4.21: Diagrama de simulación en Matlab/Simulink parte 2 se muestra el control y el PWM.

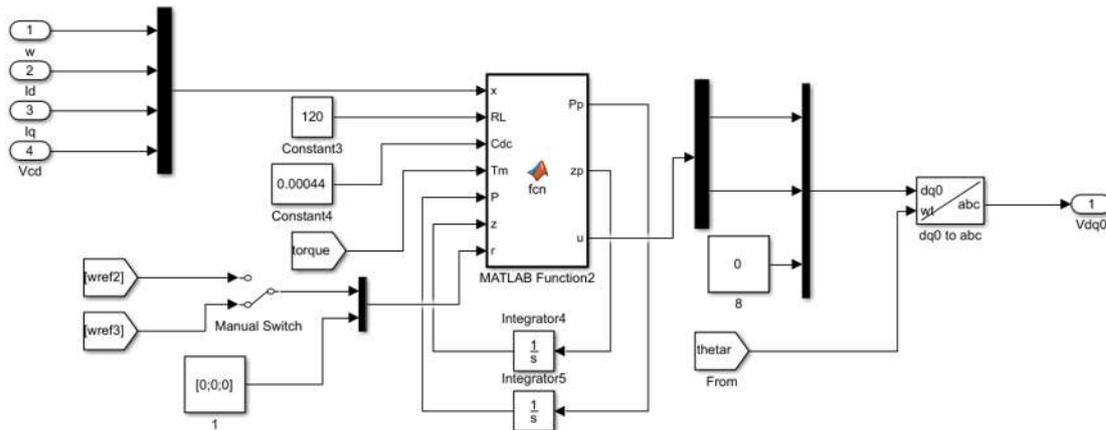


Figura 4.22: Diagrama de simulación en Matlab/Simulink parte 3 se muestra la parte interna del bloque vector control y se encuentra el control óptimo.

La corriente del PMSG cuando inicia su operación se muestra en la Figura 4.19, donde se ven las tres fases claramente.

Todo este trabajo fue realizando utilizando el software Matlab/Simulink, utilizando el bloque PMSG (Permanet Magnet Synchronous Machine) de Matlab. En las Figuras ??32)-4.22 se muestran los diagramas de simulación del sistema y sus etapas de control correspondientes.

### 4.3. Resultados experimentales de Control óptimo para el PMSG.

En el experimento se utilizó la tarjeta dSPACE para procesar toda la información, un driver ABB, sensores de voltaje y corriente, un encoder y sensores de Compaq RIO de National Instruments.

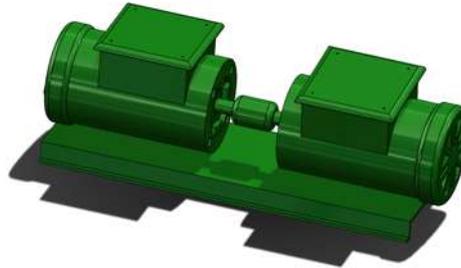


Figura 4.23: Esquema del motor de inducción y PMSG

En la Figura 4.23 se ve el acople de los dos motores: el de la izquierda es de inducción mismo que emula la turbina de viento para mover al segundo motor, que es usado como PMSG, donde se pretende controlar corriente  $I_d$  y  $\omega$ .

Se muestran las ganancias  $Q$  y  $R$  del control óptimo en el experimento físico dando prioridad a los estado  $x_1$  y  $x_2$  para lograr controlar la velocidad  $\omega$ .

$$Q = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & .1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Las ganancias del controlador proporcional integral son:

PI de  $i_d$   $K_P=11$ ,  $K_i=100$

PI de  $\omega$   $K_P=6$ ,  $K_i=20$

PI de  $i_q$   $K_P=11$ ,  $K_i=100$

#### 4.3.1. Descripción del experimento PMSG

Se muestran los resultados experimentales que fueron obtenidos de la aplicación del controlador óptimo robusto no lineal diseñado, en un prototipo de un rectificador trifásico

controlado conectado a un PMSG. Se presenta también una comparación entre el control óptimo y un controlador proporcional integral (PI). En la Figura 4.24 se muestra una imagen del prototipo del rectificador trifásico controlado conectado al PMSG. Todos los dispositivos utilizados serán descritos a detalle, a continuación.



Figura 4.24: Experimento del control óptimo del PMSG.

1. (**Baldor CSPM3546T**) Generador trifásico de imanes permanentes 1800 RPM, 230/460 volts, 206/1.2 Amp.
2. (**cRIO-9024**) Controlador embebido en tiempo real, para aplicaciones avanzadas de monitoreo y control. Presenta un procesador industrial en tiempo real Freescale de 800 MHz, contiene una memoria RAM de 512 MB DDR2, y 4 GB de almacenamiento. Con este controlador se realiza la adquisición de datos en el prototipo.
3. (**dSPACE 1103**) es una tarjeta controladora usada para implementación de algoritmos de control. Su capacidad de procesamiento rápido entrada/salida son adecuados para aplicaciones que involucran numerosos sensores y actuadores. Totalmente programable desde el entorno de diagramas de bloques de Matlab/Simulink.
4. (**SEMISTACK-IGBT**) Módulo convertidor de potencia, utilizado para el rectificador controlado de onda completa disparando los seis IGBTs, cuenta con diferentes

aplicaciones como un inversor, buck o boost converter.

5. **(Carga Lab-Volt)** Una resistencia de potencia para disipar la energía generada de 250 Watts.
6. **(Fuente MATRIX)** Para la alimentación de todos los circuitos del sistema.
7. **(Driver ABB)** Módulo para arrancar el motor de inducción y poder controlarlo en modo par.
8. **(Focos)** Cargas que se agregan al sistema para disipar potencia.
9. **(Convertidores de Nivel)** Circuito impreso elaborado para eleva los pulsos de la dSPACE con esto el SEMISTACK-IGBT puede operar correctamente.

Es importante destacar que se realizó la conexión física del PMSG y control óptimo obteniendo resultados y validando los resultados simulados. Resaltando que se tiene la primera etapa de rectificación trabajando correctamente y dejando en proceso la inversión, filtrado y conexión a la red eléctrica.

#### 4.4. Resultados Experimentales.

Se muestra a continuación los resultados de la implementación física del control óptimo del PMSG, se compara el resultado del control óptimo con los resultados obtenidos de un controlador proporcional integral (PI). En el experimento se le da una referencia de velocidad al PMSG que debe de seguir ya que controlamos la velocidad  $\omega$  de la máquina modificando el estado  $x_3$ , y con una referencia de 0 para controlar el estado  $x_2$  la corriente  $i_d$ .

A continuación se muestra una de las partes mas importantes de todo el trabajo, el seguimiento de trayectoria del control óptimo y se observa el control sobre la velocidad  $\omega$  del PMSG.

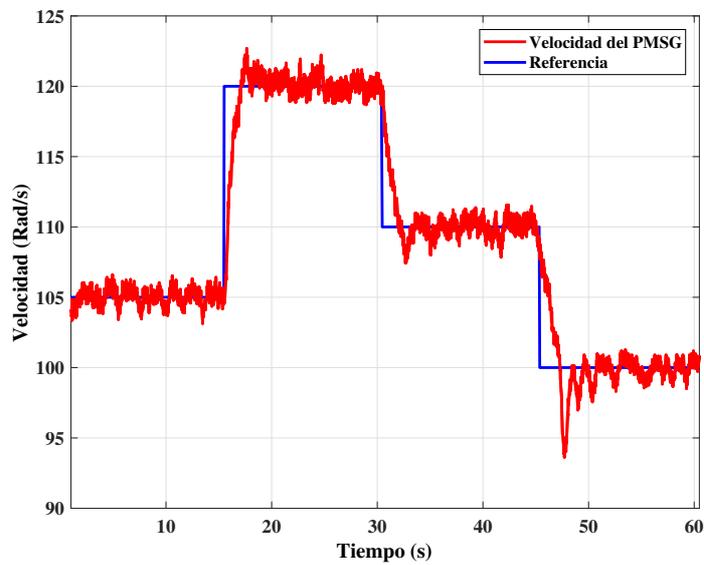


Figura 4.25: Seguimiento de trayectoria velocidad del PMSG.

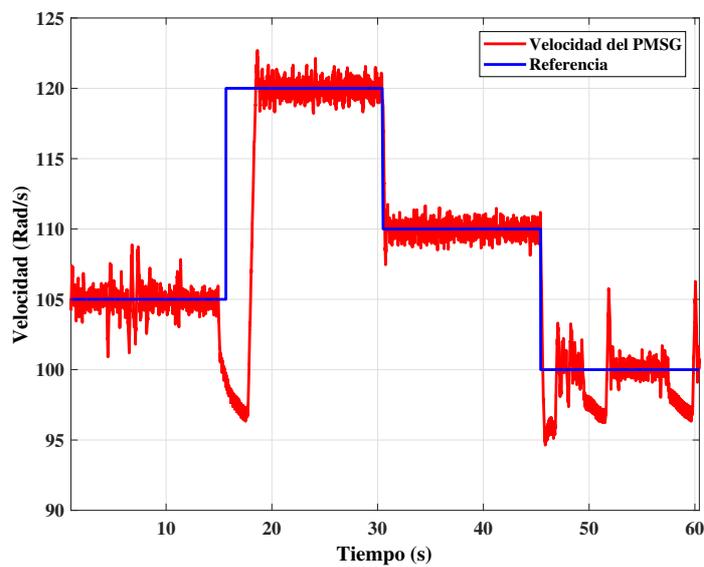


Figura 4.26: Seguimiento de trayectoria con PI de la velocidad del PMSG.

En la Figura 4.25 se muestra el valor de referencia (línea azul) que cambia progresivamente y la velocidad del PMSG (línea roja) que debe seguir en tiempo real los valores de

referencia. En la Figura 4.25 se muestran los resultados cuando se utiliza el control óptimo no lineal y en 4.26 se presentan los resultados obtenidos con un controlador proporcional integral (PI); se aprecia un mejor comportamiento con el control óptimo ya que es robusto y cuenta con el modelo matemático del sistema. Por otro lado el controlador PI es bueno su desempeño ya que no necesita el modelo matemático y sigue la referencia.

En la Figuras 4.27 y 4.28 se muestran las corrientes y voltajes del PMSG en el marco  $abc$ . Fueron extraídas del experimento mientras se controlaba la velocidad del PMSG. Por otro

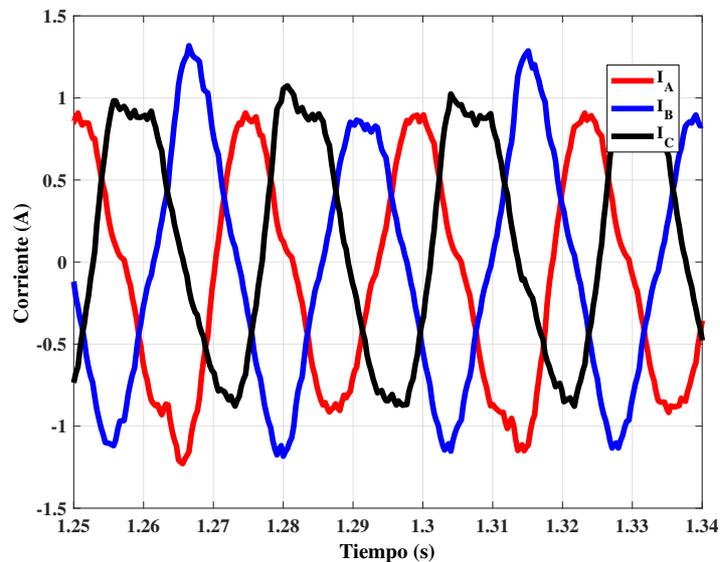
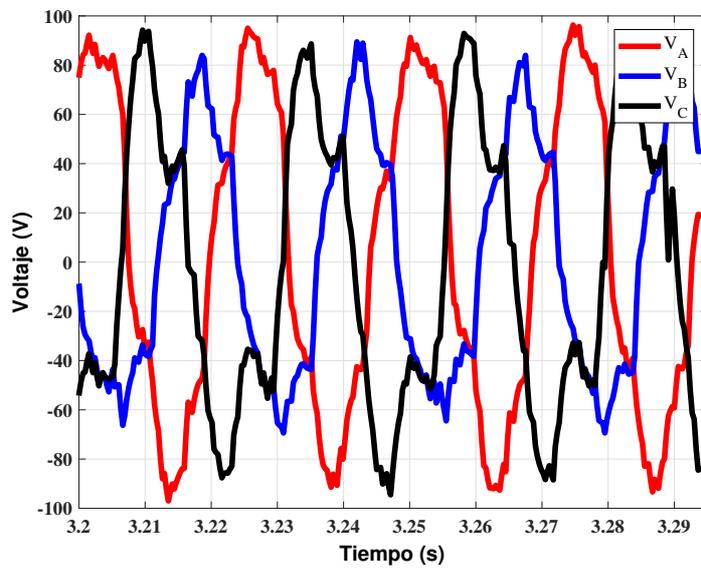
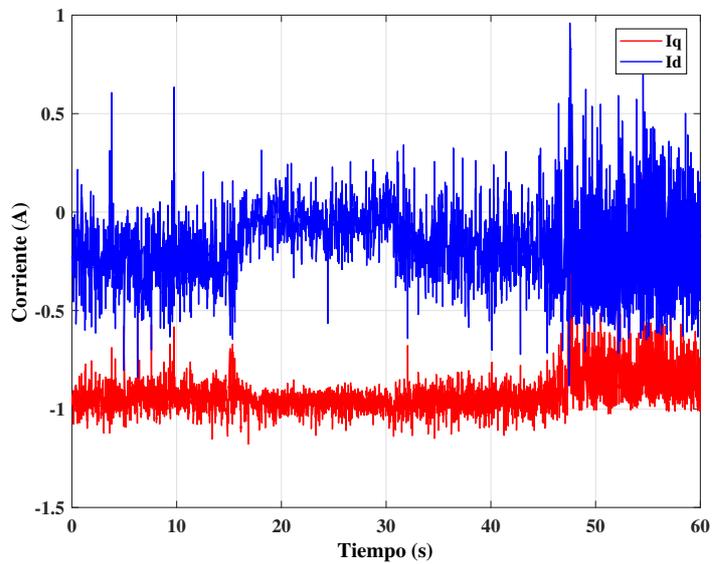
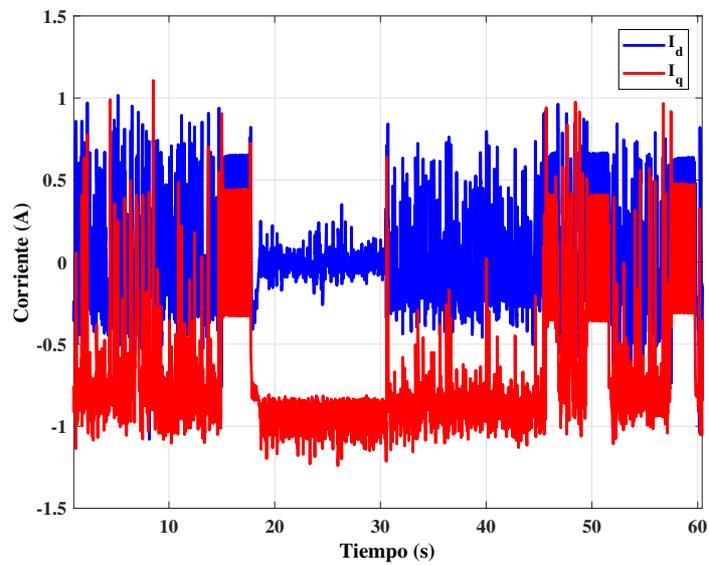


Figura 4.27: Corrientes en  $abc$  del PMSG.

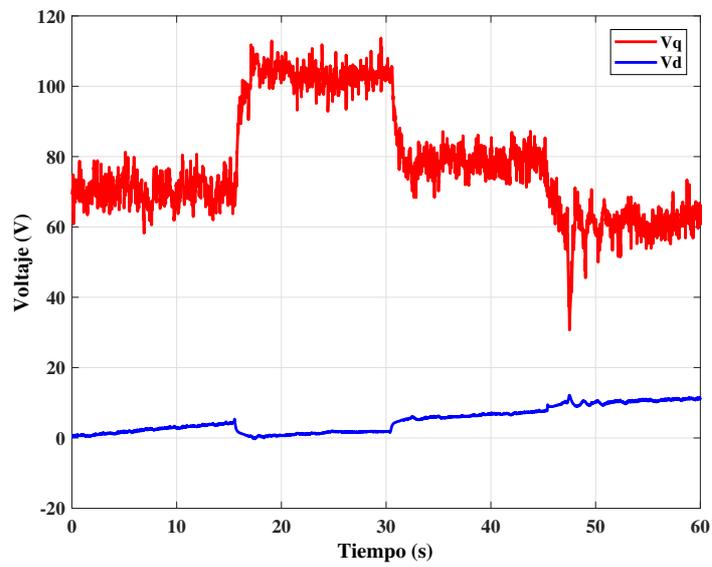
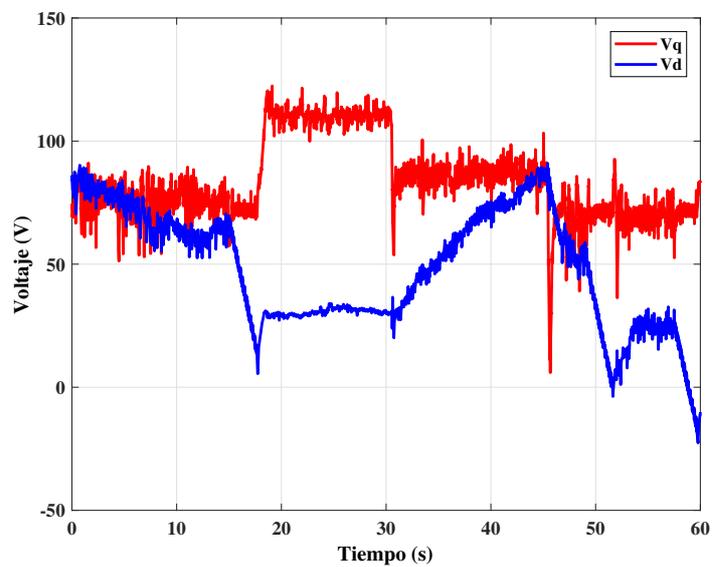
lado se muestran las transformaciones de corrientes en  $dq0$  en las Figuras 4.29 y 4.30 con los dos controladores, en la Figura 4.29 son señales con el control óptimo y en la Figura 4.30 con control PI.

Figura 4.28: Voltaje en  $abc$  del PMSG.Figura 4.29: Corrientes en  $dq0$  control óptimo.

Figura 4.30: Corrientes en  $dq0$  PI.

Se puede ver en la Figura 4.29 el comportamiento de la corriente  $i_d$  muy próxima a cero y la corriente  $i_q$  de manera estable.

En cambio en la Figura 4.30 las corrientes  $i_d$  e  $i_q$  tiene un comportamiento un poco más oscilatorio dando como resultado en la comparación de corrientes  $dq0$  que el control óptimo opera mejor el comportamiento de corrientes en el PMSG. A continuación se presentan los voltajes en  $dq0$  comparándose el control óptimo Figura 4.31 y el PI Figura 4.32 dando como resultado un mejor comportamiento con el control óptimo ya que uno de los objetivos es mantener al estado  $x_2$  en cero y el voltaje  $v_d$  contribuye mucho a esta acción, en la Figura 4.31 se observa que esta muy cerca de cero, confirmándose que el control óptimo tiene un mejor desempeño.

Figura 4.31: Voltaje  $dq0$  controlador óptimo del PMSG.Figura 4.32: Voltaje  $dq0$  controlador PI del PMSG.

Por último se presentan las Figuras 4.31 control óptimo y 4.32 control PI, donde se muestra el voltaje en el capacitor el estado  $x_4$ , esta variable debe dar un voltaje en

corriente directa de acuerdo a los cambios de la velocidad en la Figura 4.33. El control óptimo garantiza un voltaje mucho más constante que el PI.

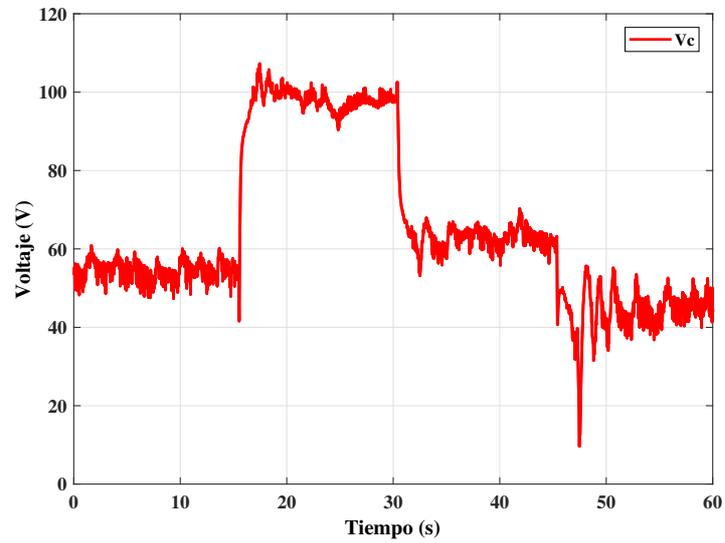


Figura 4.33: Voltaje del PMSG con control óptimo.

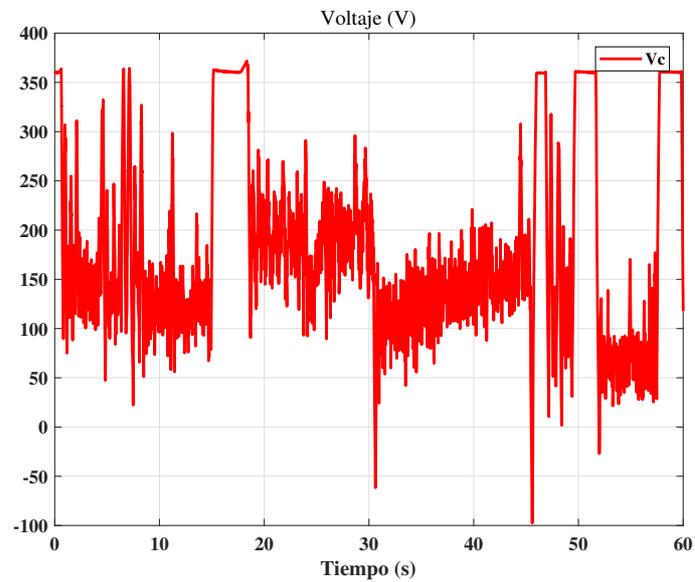


Figura 4.34: Voltaje del capacitor con el controlador PI del PMSG.

#### **4.4.1. Conclusiones del capítulo**

En este capítulo se verificó la eficacia del control óptimo para seguimiento de trayectorias demostrando a nivel simulación y mediante un experimento en el laboratorio de control, donde se comparó su desempeño con el controlador PI. Los resultados reflejan el buen comportamiento del control óptimo.

La parte de distorsión armónica en resultados no afecta ya que tiene que pasar por otras etapas y en esta tesis no se llega a conexión a la red eléctrica.

## Capítulo 5

# Conclusiones

### 5.1. Conclusiones generales

En esta tesis se presentó un algoritmo de control óptimo para seguimiento de trayectorias variantes en el tiempo para sistemas no lineales factorizables en coeficientes dependientes del estado. El sistema a controlar fue un generador de imanes permanentes. Se obtuvo el modelo matemático y los parámetros del generador para aplicar la técnica de control. El modelo fue validado con una simulación en Matlab/Simulink utilizando el bloque de Matlab PMSG. El controlador fue probado a nivel simulación, y se implementaron dos métodos para obtener MPPT, el P&O y TSR para obtener referencias al controlador. Se observó que existen varias técnicas de MPPT llegando a la conclusión que el P&O es uno de los más económicos y funcionales para sistemas de generación eólica, ya que el TSR necesita un sensor más sofisticado para medir la velocidad del viento; Por otro lado la técnica TSR mostró mejores resultados en extracción de máxima potencia.

Posteriormente se diseñó un experimento para probar el algoritmo de control óptimo, donde se contaba con un motor de inducción emulando la turbina, ya que está acoplado con el PMSG. El experimento fue diseñado para proporcionarle un par mecánico  $T_m$  a dicho motor de inducción y controlar la velocidad en el PMSG con el algoritmo de control óptimo. Fue necesario un driver ABB para mandar un par al motor de inducción, una tarjeta dSPACE donde se procesaba todas las señales y generaba los pulsos PWM para disparar los IGBTs

del rectificador controlado, una compaq RIO para el sensado de corrientes y voltajes en AC y DC, un módulo para elevar el voltaje de la dSPACE ya que los IGBTs necesitan 15V como mínimo para poder disparar y hacer correcta la conmutación, se colocaron tres focos entre el PMSG y la etapa de rectificación y por último se tenía una carga a la salida del rectificador para disipar la potencia generada y poder trabajar con el par mecánico  $T_m$  del motor de inducción. Una vez implementado toda la instrumentación del experimento se controló con el control óptimo y un PI para hacer la comparación del seguimiento de trayectorias y algunas otras señales que afectan la generación de energía eléctrica.

En la tesis fue desarrollada la primera etapa del convertidor back-to-back la etapa de rectificación, más adelante se podrá seguir con este trabajo para implementar la etapa de inversión, filtrado y conexión a la red eléctrica. La aportación más grande es la implementación física del control óptimo validando los resultados obtenidos en simulación.

## 5.2. Trabajos futuros

1. Continuar con la etapa de inversión y filtrado para conectarse a la red eléctrica.
2. Calcular un Filtro LCL para los 745 Watts del PMSG.
3. Introducir perfiles de viento de la estación meteorológica vía remota al Driver ABB para operar con vientos reales e implementar el MPPT TSR.
4. Diseñar los controles para el Modelo de inversión con el filtro y poder tener un sistema espalda a espalda (back to back).
5. Implementar el MPPT TSR en la instrumentación para dar referencias reales.

# Referencias

- [Ackermann05] Ackermann, T. *Wind power in power systems*. Chichester, UK: John Wiley., 2005.
- [Amandola07] Amandola, C. y Gonzaga, D. Fuzzy-logic control system of a variable-speed variable-pitch wind-turbine and a double-fed induction generator. *En Intelligent Systems Design and Applications. ISDA. Seventh International Conference on*, págs. 252–257. Malaysia, Malaysia, 2007.
- [Anderson89] Anderson, B. y Moore, J. *Optimal control: Linear quadratic methods*. Englewood Cliffs, Mineola, Nueva York, 1989.
- [Antsaklis07] Antsaklis, P. J. y Michel, A. N. *A linear systems primer*. Birkhäuser Boston, 2007.
- [Athans13] Athans, M. y Falb, P. L. *Optimal control: an introduction to the theory and its applications*. Courier Corporation, Mineola, Nueva York, 2013.
- [Bellman62] Bellman, R. y Dreyfus, S. *Applied dynamic programming*, Princeton university press. Princeton, Nueva York, 1962.
- [Benelghali10] Benelghali, S., Benbouzid, M. E. H., Charpentier, J. F., Ahmed-Ali, T., y Munteanu, I. Experimental validation of a marine current turbine simulator: Application to a permanent magnet synchronous generator-based system second-order sliding mode control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1):118–126, 2010.

- [Carlson12] Carlson, D. A., Haurie, A. B., y Leizarowitz, A. *Infinite horizon optimal control: deterministic and stochastic systems*. Springer Science & Business Media, Paris, Francia, 2012.
- [Chen03] Chen, Z., Tomita, M., Doki, S., y Okuma, S. An extended electromotive force model for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous motors. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, Changwon, Korea*, 50(2):288–295, 2003.
- [Cimen10] Cimen, T. Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the state-dependent riccati equation method. *Annual Reviews in control, U.S*, 34(1):32–51, 2010.
- [Cloutier97] Cloutier, J. R. State-dependent riccati equation techniques: an overview. *En IEEE American Control Conference, Moscow, Rusia*, págs. 932–936. 1997.
- [Datta03] Datta, R. y Ranganathan, V. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 18(1):163–168, 2003.
- [Espejo Marín12] Espejo Marín, C. y García Marín, R. La energía eólica en la producción de electricidad en españa. *Revista de Geografía Norte Grande*, (51):115–136, 2012.
- [Friedland12] Friedland, B. *Control system design: an introduction to state-space methods*. Courier Corporation, Mineola, Nueva york, 2012.
- [Frutos Martínez12] Frutos Martínez, J. Á., Cortes Gutiérrez, S., Carranza Castillo, O., y Ortega Gonzalez, R. Estudio comparativo de algoritmos de búsqueda del punto de máxima potencia en sistemas de generación eólica. 2012.
- [Gómez16] Gómez, M., Ribeiro, E., Estima, J., Boccaletti, C., y Cardoso, A. J. M. Development of an effective mppt method suitable to a stand-alone,

- low-cost wind turbine system. *En Industrial Electronics Society, IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE*, págs. 5550–5555. IEEE, 2016.
- [González08] González, A. M. Estado del arte del control de la potencia en generadores eólicos. *Revista Investigaciones Aplicadas. Universidad Pontificia Bolivariana*, 2008.
- [Hammett98] Hammett, K. D., Hall, C. D., y Ridgely, D. B. Controllability issues in nonlinear state-dependent riccati equation control. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 21(5):767–773, 1998.
- [Heier08] Heier, S. Wind power [a review of grid integration of wind energy conversion systems (s. heier; 2006); book review]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 6(3):95–97, 2008.
- [Kalman60] Kalman, R. E. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1):35–45, 1960.
- [Kraan93] Kraan, I. y Bongers, P. M. Control of a wind turbine using several linear robust controllers. *En Decision and Control, 1993., Proceedings of the 32nd IEEE Conference on*, págs. 1928–1929. IEEE, 1993.
- [Labidi17] Labidi, Z. R., Schulte, H., y Mami, A. Modeling and optimal torque control of small wind turbines with permanent magnet synchronous generators. *En 2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, págs. 1–6. IEEE, 2017.
- [Ma13] Ma, K., Liserre, M., y Blaabjerg, F. Comparison of multi-mw converters considering the determining factors in wind power application. *En 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, págs. 4754–4761. IEEE, 2013.
- [Mirez11] Mirez, J. Matlabsimulink in renewable energy [jorge mírez]. *Universidad Nacional de Ingenieria del Perú*, 18(04), 2011.

- [Molina08] Molina, M. y Mercado, P. Estrategia de control para maximizar la potencia extraída de aerogeneradores de velocidad variable conectados a la red eléctrica. *Presentado en XXXI Reunión de Trabajo de ASADES, Mendoza, Argentina, 2008.*
- [Moungkhum13] Moungkhum, N. y Subsingha, W. Voltage control by dq frame technique of svpwm ac-dc converter. *Energy Procedia*, 34:341–350, 2013.
- [Muyang Li09] Muyang Li, B. Flux-weakening control for permanent-magnet synchronous motors based on z-source inverters. *Marquette University*, 2009.
- [Nistal Lastra15] Nistal Lastra, J. et al. Modelado y control dinámico de un aerogenerador. 2015.
- [Ornelas-Tellez13] Ornelas-Tellez, F., Rico-Melgoza, J. J., y Sanchez, E. N. Optimal tracking for a class of nonlinear systems based on the state-dependent riccati equation. *En Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE), 2013 10th International Conference on*, págs. 42–47. IEEE, 2013.
- [Ornelas-Tellez17] Ornelas-Tellez, F., Rico-Melgoza, J. J., Espinosa-Juarez, E., y Sanchez, E. N. Optimal and robust control in dc microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(6):5543–5553, 2017.
- [Pontryagin18] Pontryagin, L. S. *Mathematical theory of optimal processes*. Routledge, 2018.
- [Primbs99] Primbs, J. A., Nevistić, V., y Doyle, J. C. Nonlinear optimal control: A control lyapunov function and receding horizon perspective. *Asian Journal of Control*, 1(1):14–24, 1999.
- [Ruiz Salamanca17] Ruiz Salamanca, J. A., Cholo Acevedo, C. A., et al. Evaluación de métodos de seguimiento del punto de máxima transferencia de poten-

- cia utilizando lógica difusa comparado con un algoritmo convencional aplicado en aerogeneradores de baja y mediana potencia. 2017.
- [Sakamoto04] Sakamoto, R., Senjyu, T., Kinjo, T., Urasaki, N., y Funabashi, T. Output power leveling of wind turbine generator by pitch angle control using adaptive control method. *En Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on*, tomo 1, págs. 834–839. IEEE, 2004.
- [Shamma03] Shamma, J. S. y Cloutier, J. R. Existence of sdre stabilizing feedback. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 48(3):513–517, 2003.
- [Sirouni18] Sirouni, Y., El Hani, S., Naseri, N., Aghmadi, A., y El Harouri, K. Design and control of a small scale wind turbine emulator with a dc motor. *En 2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, págs. 1–6. IEEE, 2018.
- [Slavov18] Slavov, T. P. T. Lqr power control of wind generator. *IEEE*, págs. pp.1–6, 2018.
- [Song00] Song, Y., Dhinakaran, B., y Bao, X. Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3):293–308, 2000.
- [Song03] Song, W.-Y., Sohn, E. J., Martinoia, E., Lee, Y. J., Yang, Y.-Y., Jasinski, M., Forestier, C., Hwang, I., y Lee, Y. Engineering tolerance and accumulation of lead and cadmium in transgenic plants. *Nature biotechnology*, 21(8):914, 2003.
- [Tan04] Tan, K. y Islam, S. Optimum control strategies in energy conversion of pmsg wind turbine system without mechanical sensors. *IEEE transactions on energy conversion*, 19(2):392–399, 2004.
- [Thongam11] Thongam, J. S. y Ouhrouche, M. Mppt control methods in wind energy

conversion systems. *En Fundamental and advanced topics in wind power*. InTech, 2011.

[Wernli75] Wernli, A. y Cook, G. Suboptimal control for the nonlinear quadratic regulator problem. *Automatica*, 11(1):75–84, 1975.

[Yaramasu17] Yaramasu, V. y Wu, B. Modeling of wind generators for model predictive control. 2017.