

**Control Robusto LMI Para un Generador Síncrono de Imanes
Permanentes Asociado a la Regulación de Potencia de una
Turbina Eólica**

Proyecto de Grado

Juan Sebastian Pedraza Murcia



**Control Robusto LMI Para un Generador Síncrono de Imanes
Permanentes Asociado a la Regulación de Potencia de una
Turbina Eólica**

Juan Sebastian Pedraza Murcia

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Electrónico

Director

Ing. Carlos Andrés Torres Pinzón, PhD.

Facultad de Ingeniería Electrónica

División de Ingenierías

Universidad Santo Tomás

Bogotá, D.C.

2018

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, por ayudarme a culminar este trabajo, brindándome la sabiduría, entendimiento y la fé suficiente en momentos difíciles.

A mis padres y mis hermanos que han sido un pilar fundamental en mi formación como profesional y como persona, por sus sabias palabras de fortaleza, en darme el apoyo para lograr mis objetivos, en nunca desfallecer y por ayudarme en la formación en buenos valores y principios.

A mi director Carlos Torres por sus conocimientos, experiencia y paciencia en este trabajo, por brindarme su confianza, consejos y recursos para lograr ese gran objetivo en mi vida.

A mis compañeros universitarios especialmente a Vanessa Sanchez y AnaMaria Ramírez, por sus consejos, apoyo y colaboración en esta etapa final en mi formación como profesional.

Mil gracias a todos.

Índice general

1	Introducción	1
1.1	Resumen	1
1.2	Planteamiento del Problema	2
1.3	Justificación	3
1.4	Objetivos	4
1.4.1	Objetivo General	4
1.4.2	Objetivos Específicos	4
1.5	Antecedentes	4
2	Modelo de la Turbina Eólica	8
2.1	Introducción	8
2.2	Modelo matemático	10
2.3	Aerodinámica de las palas en turbinas de eje horizontal	13
2.3.1	Velocidad específica	14
2.3.2	Fuerza de sustentación	15
2.3.3	Ángulos de incidencias en la operación de la turbina eólica	16
2.3.4	Estrategias para el control de potencia en turbinas eólicas	17
2.4	Modelo del Actuador hidráulico	19
3	Modelo del Generador Eólico	21
3.1	Introducción	21
3.2	Modelo matemático PMSG	21
3.3	Convertidor back to back	26
3.3.1	Rectificador trifásico	28
3.3.2	Inversor trifásico	29

3.4 Carga eléctrica	31
4 Control Robusto basado en las Desigualdades Matriciales Lineales	33
4.1 Modelo en Variables de Estado	34
4.1.1 Formas canónicas controlables	35
4.2 Control LMI	37
4.3 Antecedentes de las LMIs	37
4.4 Algunos problemas definibles con LMIs	38
4.5 Modelo en Parámetros Inciertos	39
4.6 Formulación de restricciones en LMI's	43
4.6.1 Restricción LMI para el diseño de control H_∞	43
4.6.2 Restricción LMI para ubicación de polos	44
4.6.3 Restricción LMI para la entrada de control	45
4.7 Control PI clásico	48
5 Analisis y resultados	51
6 Conclusiones del proyecto y futuras investigaciones	57
6.1 Contribuciones del proyecto	57
6.2 Futuras líneas de investigación	58
Bibliografía	60

Índice de figuras

2-1	Tipos de turbinas eólicas de eje horizontal y eje vertical [17].	9
2-2	Componentes de una Turbina Eólica [18].	10
2-3	Relación de la potencia de salida de la turbina con respecto a la velocidad [Autor].	12
2-4	Sistema del Modelo de la Turbina Eólica de paso variable [Autor].	13
2-5	Velocidades que interactúan sobre la turbina eólica [23].	14
2-6	Fuerzas que interactúan sobre la turbina eólica [24].	15
2-7	Ángulos que inciden sobre una pala de turbina eólica [24].	17
2-8	Potencia generada en una turbina eólica en función de la velocidad del viento [25].	18
2-9	Respuesta del actuador hidraulico a un escalon unitario [Autor]	20
3-1	Relación de sistema de referencia (abc) con el sistema de referencia (dq0) [30].	22
3-2	Circuito equivalente del PMSG en el marco de referencia rotatorio ortogonal síncrono [22].	23
3-3	Representación del aerogenerador conectado a la red eléctrica [Autor].	25
3-4	Modelo del PMSG en MatLab/Simulink [Autor].	26
3-5	Rectificador Trifásico no controlado [Autor].	28
3-6	Parámetros Rectificador Trifásico no controlado [Autor].	29
3-7	Inversor Trifásico [Autor].	30
3-8	Inversor Trifásico en MatLab/Simulink [Autor].	31
3-9	Filtro en MatLab/Simulink [Autor].	31
3-10	Bloque de Carga eléctrica en MatLab/Simulink [Autor].	32
4-1	Sistema en lazo abierto y en lazo cerrado.	33

4-2	Lineas de contorno de la función ϕ , las cuales dan una aproximación suave de la forma del conjunto factible X [44].	39
4-3	Representación grafica de la incertidumbre politópica [15].	41
4-4	Representación esquemática de un sistema descrito en variables de estado [15].	42
4-5	Representación de control por realimentación de variables de estado [15]. . . .	42
4-6	Ubicación de polos con el control LMI-robusto	48
4-7	Bloque de control PI	49
4-8	Modelo del control PI clásico en MatLab/Simulink	50
4-9	Ubicación de polos con el control Proporcional-Integral	50
5-1	Simulación del sistema de generación eólica en lazo abierto [Autor]	52
5-2	Simulación del sistema de generación eólica con control [Autor]	52
5-3	Comparación de la potencia eléctrica del aerogenerador eólico [Autor]	53
5-4	Comparación de la velocidad angular del aerogenerador eólico [Autor]	54
5-5	Comparación del voltaje en el Condensador [Autor]	55
5-6	Comparación del ángulo de las palas de la turbina eólica [Autor]	55
5-7	Comparación de la señal de control P-I vs señal de control LMI-robusto [Autor]	56

Índice de tablas

2.1 Parámetros de la turbina eólica [Autor].	13
3.1 Parámetros del PMSG [Autor].	26
3.2 Ventajas y Desventajas de algunos tipos de convertidores back to back [Autor].	28
3.3 Parámetros del Rectificador [Autor].	29
3.4 Parámetros de la Carga Eléctrica [Autor].	32
4.1 Parámetros del actuador hidráulico.	47
4.2 Parámetros del controlador del actuador hidráulico.	47

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presenta: el resumen , el planteamiento del problema, la justificación y los objetivos del proyecto. Además se registran algunos antecedentes del generador síncrono de imanes permanentes y la técnica de control utilizada.

1.1. Resumen

La necesidad actualmente de cuidar y proteger el medio ambiente, hacer que la energía eléctrica llegue a sitios remotos y zonas no interconectadas al sistema eléctrico, de garantizar el suministro de energía por el aumento de la demanda energética y otras razones; nace la necesidad de buscar fuentes alternativas de generación que reduzcan la producción de toneladas de gases de efecto invernadero y que a su vez sean eficientes y confiables. En este grupo de energías renovables, se encuentran varios sistemas de generación de energías como son las celdas o paneles fotoeléctricos, energía a partir de la biomasa, energía geotérmica, energía marina y por último la energía eólica, la cual aprovecha la energía presente en el viento para producir energía eléctrica, siendo este el objetivo de estudio en esta monografía.

Por las cualidades de no generar residuos contaminantes para el planeta, se despierta un gran interés por el estudio e implementación de este tipo de sistemas, buscando una mejor eficiencia y desempeño de esta manera maximizar las ventajas utilizando la generación eólica para producir energía, con respecto a los sistemas de generación de energía convencionales.

Queriendo aportar al desarrollo de la energía eólica y cuidando el medio ambiente para el futuro, esta monografía provee el diseño para regular la potencia eléctrica usando la técnica de las Desigualdades Lineales Matriciales (LMI). Con el fin de comprobar los resultados

del control planteado con respecto a una técnica de control clásica la cual también ha sido diseñada.

1.2. Planteamiento del Problema

Actualmente varios países utilizan sistemas eléctricos y métodos convencionales de generación de energía procedentes de centrales generadoras, principalmente hidroeléctricas y termoeléctricas, las cuales han demostrado ser muy costosas y ambientalmente insostenibles, debido a la quema descontrolada de combustibles derivados de fuente fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo, además de la deforestación ocasionada por la creación de represas y embalses [1]. Paralelo a esta situación, las fuentes de energías no convencionales han dejado de ser una novedad y se han convertido en una solución para ayudar a la demanda de energía eléctrica del ser humano y ser una fuente de energía amigable y no contaminante para el planeta. Otro de los grandes beneficios en la búsqueda de fuentes alternativas de energía en provecho de la humanidad que ayudaría a varias de las generaciones futuras en reducir el impacto ambiental generado [2].

Dado los beneficios demostrados por las fuentes no convencionales, en las últimas dos décadas ha nacido la necesidad de investigar en diferentes tipos de fuentes de energía primaria, que sean cada vez más óptimas, eficientes y confiables para la demanda energética de la humanidad. Una de éstas fuentes de energía primaria son los generadores eólicos, los cuales hacen parte del selecto grupo de las energías alternativas que ha evolucionado fuertemente y que aún se encuentra en la búsqueda de ser un sistema más eficiente, debido a la variabilidad y al comportamiento no lineal del viento, el cual varía geográficamente y temporalmente. Actualmente, se han desarrollado diferentes estrategias de control de potencia eléctrica que tienen por objetivo aprovechar al máximo el potencial energético del viento para producir energía eléctrica, a partir del desarrollo del modelado dinámico de las turbinas eólicas [3]. Uno de los principales problemas de los generadores eólicos es su eficiencia, la cual depende de la variación del viento que cambia constantemente y de forma abrupta, según las condiciones atmosféricas y climáticas de la zona donde se encuentre instalada [4]. En la actualidad existen varias técnicas y métodos de control para mejorar la regulación de la potencia, sin

embargo en esta monografía se estudiará y se analizará el comportamiento de la técnica de control de las Desigualdades Matriciales Lineales (LMI) en la regulación de la potencia en un sistema de generación eólica, cuando se realicen comparativos con otras técnicas de control y simulaciones relacionadas con los cambios de la velocidad del viento.

1.3. Justificación

El principal fenómeno físico y en el cual se da la generación de la energía eólica es a partir de las corrientes de aire presentes en la atmósfera de la tierra. Dichas corrientes de aire son capaces de mover las aspas de una turbina que están acopladas a un generador que convierte el movimiento en electricidad. Debido a la gran cantidad de consumo de los recursos naturales del planeta, el calentamiento global y las formas convencionales de generación de energía, las cuales tienen cada vez más un impacto negativo en los ecosistemas, es necesario realizar investigaciones en el campo de las fuentes renovables de energía, ya que existen varias razones políticas, económicas y ambientales para fomentar el uso este tipo de generación de energía renovable en países desarrollados y en vía de desarrollo.

En este proyecto se pretende realizar un control robusto a través de la técnica de desigualdades matriciales lineales (LMI), ya que es un método de control avanzado, eficiente, robusto y de optimización, donde se utiliza el álgebra lineal y el espacio de estados para modelar el control deseado, que en este caso es para controlar la regulación de potencia eléctrica asociada a un sistema de generación eólica. De esta forma se puede contribuir en la investigación de las fuentes de energías renovables y contribuir para que estos generadores eólicos sean cada vez más eficientes, cooperar para que en generaciones futuras el impacto ambiental sea mínimo y las fuentes convencionales de energía no sean la principal forma de generar la energía eléctrica para satisfacer la demanda de la humanidad.

En Colombia donde la generación eléctrica es principalmente hidráulica con el 69,9 %, seguida del gas natural con el 24,8 % y el carbón con el 4,9 % es necesaria la investigación en las fuentes eólicas ya que hasta el momento representan tan solo el 0,1 % de la generación eléctrica del país para el año 2015 [5], además de ser un tema novedoso en la región y una rama para profundizar, motivando la utilización de estas fuentes de generación de energía

a través del viento para la instalación de parques eólicos y así satisfacer la demanda de electricidad en Colombia.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar un control robusto asociado a la regulación de potencia de un sistema de generación eólica a través de la técnica de las desigualdades matriciales lineales

1.4.2. Objetivos Específicos

- Estudiar y aplicar el modelo matemático presente en la literatura del conjunto eólico correspondiente a la turbina eólica y el generador síncrono de imanes permanentes (PMSG)
- Simular a través del software MatLab/Simulink el sistema de generación eólica y el sistema de control
- Obtener el modelo de parámetros inciertos del sistema, el cual es la base y el punto de partida para lograr aplicar la técnica de control LMI
- Diseñar, analizar e implementar por medio de simulación un control robusto LMI para la regulación de potencia del sistema de generación eólico
- Analizar los resultados obtenidos de una manera comparativa con respecto a la técnica clásica de un control PI

1.5. Antecedentes

Hoy en día se registran en la literatura, diferentes estrategias de control para la regulación de la potencia de los PMSG instalados en los sistemas de generación eólicos. Los objetivos de estos métodos de control en relación con la potencia y la variación del viento son básicamente dos: relacionado con maximización de energía y control de velocidad. El primero consiste en maximizar la extracción de energía eólica donde las velocidades del viento son bajas y

las cargas estructurales son relativamente pequeñas. El segundo método es sensible a las velocidades de viento altas y con un crecimiento drástico de las cargas estructurales y por lo cual hay que limitar dichas cargas manteniendo la extracción de potencia eléctrica [3].

Anterior a los dos métodos mencionados, las primeras investigaciones sobre las técnicas de control en los generadores eólicos estaban orientadas al desarrollo de un control no lineal que variaba continuamente, de tal forma que el controlador siempre será el apropiado para la regulación de la potencia. Se demostró a través de simulaciones que este control era robusto y arrojaron como resultado un mejor desempeño frente a controladores tipo Proporcional Integral (PI) y controladores clásicos lineales. En este aporte se hace notoria la reducción del tiempo de espera en niveles de potencia altos y como consecuencia una disminución de las cargas del sistema de transmisión mecánico [6].

En cuanto al control por lógica difusa, se asemeja a la forma en que un ser humano toma decisiones para controlar un proceso a través de una serie de reglas. En el año de 1997, se diseñó un sistema de control basado en tres controladores difusos, cada uno con un objetivo diferente. El primero, era seguir la potencia del generador con la velocidad del viento para extraer la máxima potencia. El segundo, programaba el flujo de la máquina para el mejoramiento de la eficiencia con cargas ligeras. El tercero entrega un control de regulación de potencia robusto contra las ráfagas de viento extremas y el torque oscilatorio de la turbina [7].

Otra de las soluciones para el control de la regulación de la potencia de generadores eólicos ha sido basada en la técnica del diseño de un control difuso con el objetivo de mejorar el control de la potencia y la extracción de energía de una turbina eólica de 800 kW. El controlador difuso fue diseñado para el control del ángulo de paso y el torque. También posee como entradas el error de la velocidad y la medida de la velocidad del rotor y como salidas tiene el ángulo de paso de referencia y el torque eléctrico de referencia. Las simulaciones realizadas demostraron la robustez del controlador difuso y se observó que puede mejorar el desempeño de la turbina eólica en diferentes velocidades de viento [8].

En el año 2003, se utilizó la estrategia de control a través de H infinito (H_∞). Esta técnica es orientada a un control multi-variable que tiene como variables manipuladas el ángulo de paso y el torque del generador, con el fin de obtener la máxima eficiencia de conversión de

energía eólica reduciendo las cargas dinámicas [9].

En el 2005, propusieron una estrategia de control no lineal en cascada para un sistema de generación de energía eólica en la regulación de potencia y ángulo de paso constante. El lazo interno es el lazo de velocidad, el cual era la entrada y éste controlada por el lazo externo que en este caso es el lazo de potencia que consiste en el seguimiento de una potencia de referencia deseada. Esta estrategia de control fue validada en un simulador de turbina eólica con resultados satisfactorios [10]]. En el mismo año se propuso un control de ganancia programada a través de un sistema de variante de parámetros lineales (LPV, por sus siglas en inglés Linear Parameter Varying). Esta estrategia fue aplicada a un sistema de generación eólica por regulación de potencia donde los objetivos principales fueron la maximización de la eficiencia de la conversión de energía eólica, la operación segura, el amortiguamiento de modos resonantes, la estabilidad y la robustez [11].

En recientes aplicaciones se presentó el desarrollo de un control H_∞ para un sistema de generación de energía eólica por regulación de potencia y ángulo de paso ajustable con un modelo indeterminado para trabajar en la zona de producción de potencia constante. Los resultados de las simulaciones comprobaron que esta técnica mantiene la estabilidad y tiene gran robustez [12].

En cuanto al control difuso se tenía como objetivo obtener la máxima transferencia de potencia y mantener la frecuencia constante con velocidad variable por medio del control de la potencia del generador y alcanzar la máxima relación de potencia de punta en velocidades de viento bajas [13].

Otra solución desarrollada es el control backsteeping. La idea básica de este tipo de control es hacer que los sistemas de lazo cerrado equivalentes a los subsistemas de bajo orden en cascada sean iguales y la estabilidad global del sistema se mantenga. En otras palabras, es un método de múltiples pasos, en el cual se pretende hacer un control virtual para asegurar la convergencia del sistema a su estado de equilibrio [2].

Una de las últimas soluciones se presentó en un diseño de un controlador para mantener constante el nivel de la potencia de salida de un sistema de generación de energía eólica por encima de la velocidad del viento nominal. Este control basado en la técnica de H_∞ , fue diseñado por el método de Desigualdades Matrices Lineales y presentó un muy buen

desempeño y robustez en las simulaciones [14].

Por última para la técnica LMI en el 2012 se utilizó la técnica de las Desigualdades Matrices Lineales para realiza un control robusto para convertidores conmutados de CC/CC, donde se formuló la técnica para el diseño a través de la retroalimentación de estados, control por H_∞ y control difuso, en la cual las simulaciones comprobaron la optimización y robustez de los controladores planteados [15].

Capítulo 2

Modelo de la Turbina Eólica

2.1. Introducción

Las turbinas eólicas o aerogeneradores son dispositivos mecánicos que, mediante su rotación, convierten la energía cinética del viento en energía eléctrica. Estas se pueden clasificar según el tipo de fuerza aerodinámica que provoca el giro del rotor, de este modo aparecen turbinas que son impulsadas por el arrastre aerodinámico y otras por la fuerza de sustentación aerodinámica. Las primeras se caracterizan por su operación con un elevado par aerodinámico y bajas velocidades. Por otro lado, las turbinas de altas velocidades están impulsadas por las fuerzas de sustentación aerodinámica, y tiene el mismo principio de funcionamiento que los perfiles de las alas de los aviones. Las turbinas generadoras de energía modernas están basadas en este último tipo de turbina principalmente por su mayor eficiencia [16].

Además de la clasificación de las turbinas eólicas respecto a su fuerza y velocidades, estas suelen ser clasificadas también de acuerdo a la posición de su eje de rotación como se observa en la figura 2-1. Las más comunes y usadas son las turbinas eólicas de eje horizontal que constan de una, dos o tres palas. Tienen la ventaja de que las palas están situadas a elevada altura, con lo cual la velocidad media del viento es mayor, y la intensidad de la turbulencia es menor, que a niveles cerca del suelo. También están las turbinas de eje vertical, estas tienen la ventaja que no requieren mecanismos de orientación del viento y su generador y caja de engranajes se encuentran en el suelo lo que facilita el montaje y mantenimiento. Sin embargo, tiene una gran desventaja con respecto al par aerodinámico

el cual varía fuertemente con la posición de las palas, aun con viento constante afectando seriamente la calidad de la potencia suministrada.

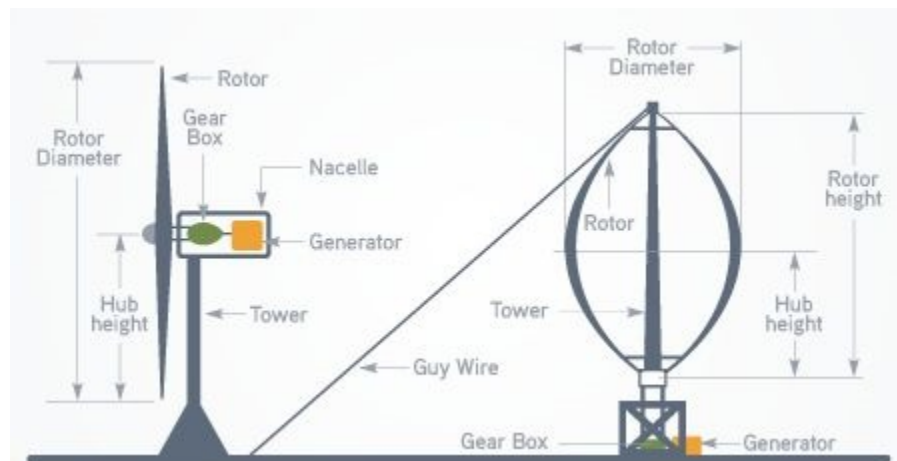


Figura 2-1: Tipos de turbinas eólicas de eje horizontal y eje vertical [17].

Los procedentes directos de las turbinas eólicas son los molinos de vientos que se empleaban antiguamente para moler y triturar el trigo para la obtención de harina. En este caso, para la energía eólica, la energía presente en el movimiento del viento, mueves las aspas y a través de un sistema mecánico de engranajes, hace girar un generador trifásico, que convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica. Los aerogeneradores se agrupan en parques eólicos distanciados unos de otros, en función del impacto ambiental y de las turbulencias generadas por el movimiento de los aspas.

Para aportar energía de la mejor y más eficiente manera a la red eléctrica, los aerogeneradores deben estar dotados de un sofisticado sistema de sincronización y control de potencia y frecuencia para que se mantenga perfectamente sincronizada con la red.

Las turbinas eólicas se diseñan para trabajar dentro de ciertas velocidades del viento dependiendo del sitio de instalación, las velocidades más bajas, llamadas velocidad de corte inferior se generan de 4 a 5 m/s, pues por debajo de estas velocidades el viento no posee la energía suficiente para superar las pérdidas del sistema. Las velocidades de corte superior es determinada por la capacidad del aerogenerador de soportar fuertes vientos, la velocidad nominal es la velocidad del viento en la cual, el aerogenerador alcanza su máximo punto de potencia nominal. Por arriba de estas velocidades, se cuenta con mecanismos de control

que mantiene la potencia de salida en un valor constante con el aumento de la velocidad del viento.

Las partes y elementos principales que conforman una turbina eólica de eje horizontal son el rotor, las palas, la caja de engranajes, un generador y un equipo de control como se observa en la figura 2-2.

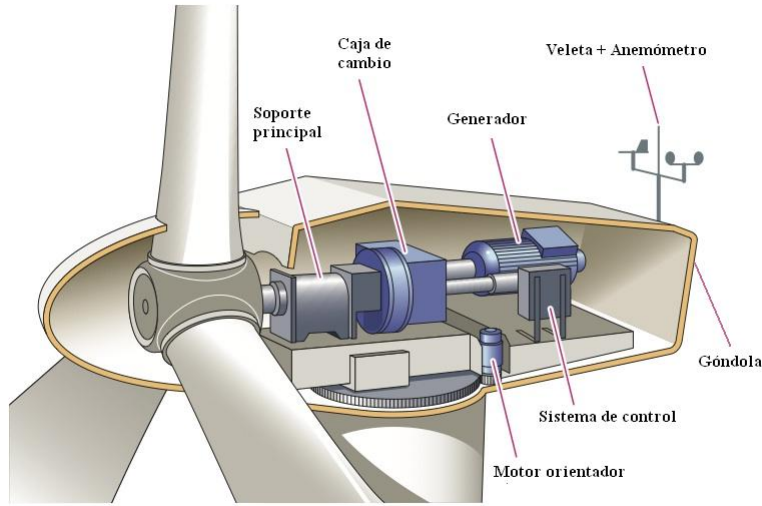


Figura 2-2: Componentes de una Turbina Eólica [18].

2.2. Modelo matemático

La turbina es el elemento clave del aerogenerador para comprender el proceso de conversión de la energía del viento, en potencia mecánica en el rotor y a partir de allí finalmente obtener la potencia requerida, es por eso que se debe tener claro el modelo dinámico y estático de la turbina eólica para que a partir de este modelo, estudiar la estrategia de control planteada para cumplir con un nivel de potencia eléctrica adecuada.

El modelo está definido por la potencia aerodinámica obtenida en la energía cinética del flujo del aire y la potencia que pasa por un área con una velocidad de viento determinada [19]:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2.1)$$

Donde $\rho = 1.2 \text{ Kg/m}^3$ a nivel del mar. Las corrientes de aire tienen dirección axial a

través de la turbina eólica, por lo que A es el área de barrido circular de la turbina y ν^3 es la velocidad del viento.

La potencia útil obtenida por la turbina es aquella potencia que es transferida por el viento al rotor, sin embargo, la energía cinética del aire no puede ser convertida en energía mecánica en su totalidad debido a que en las etapas de conversión de energía por la turbina, hay pérdidas y el aire es frenado. En una turbina eólica ideal, la velocidad del viento se reduce según la ley de Betz, la cual indica que solo es posible convertir el 0.59 o 59 % de la energía cinética del viento en energía mecánica [20].

$$P_{maxima} = \left(\frac{16}{27}\right) * \left(\frac{1}{2}\rho A \nu^3\right) \quad (2.2)$$

Como se puede inferir en la ecuación (2.2), la potencia transferida al rotor de la turbina se reduce a un producto entre la potencia obtenida del viento y un coeficiente; este valor es llamado coeficiente de potencia o C_p [21]. Y se puede interpretar como el rendimiento que presenta la turbina eólica y depende fundamentalmente de la velocidad del viento, el ángulo de paso de las palas y la velocidad angular de la turbina.

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right) e^{\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \quad (2.3)$$

Donde β es el ángulo de paso de las palas y λ_i se puede calcular al través de la siguiente ecuación [21]:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (2.4)$$

Donde λ se calcula a través de la siguiente ecuación [19]:

$$\lambda = \frac{R * \omega_\theta}{\nu} \quad (2.5)$$

Donde R es el radio y ω_θ es la velocidad angular de la turbina.

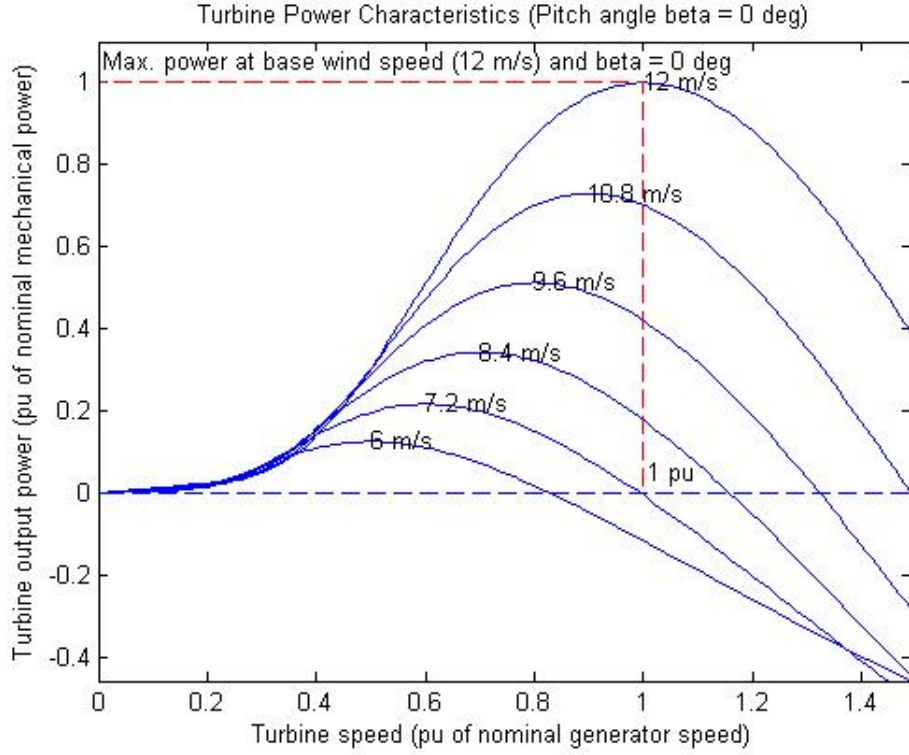


Figura 2-3: Relación de la potencia de salida de la turbina con respecto a la velocidad [Autor].

A medida que el ángulo de paso β aumenta, el coeficiente de potencia disminuye como se observa en la Figura 2-3, y afecta la potencia que la turbina extrae del viento. En consecuencia la potencia generada por la turbina eólica queda de la siguiente manera [21]:

$$P_{turbina} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (2.6)$$

Para conectar la turbina eólica con el generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) se debe tener en cuenta el torque electromagnético generado por la turbina, el cual es una relación entre la potencia entregada por la turbina y la velocidad angular [22].

$$T_{turbina} = \frac{P_{turbina}}{\omega_{\theta}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(\lambda, \beta)}{\omega_{\theta}} \quad (2.7)$$

El eje de una turbina de tres palas de grandes dimensiones operan normalmente en un rango de velocidades entre 6 y 10 revoluciones por minuto (rpm) lo cual es mucho más

lento que las velocidades de un generador estándar de 2 o 3 polos que giran dentro de un margen de alrededor de 1200 a 1500 rpm. Es por esto que se hace necesario el uso de una caja multiplicadora o de transmisión que acople los dos elementos, la turbina eólica (eje bajas velocidades) y el generador PMSG (eje altas velocidades). Sin el uso de esta caja de transmisión, se tendría que usar un generador con un elevado número de polos (30 a 35 polos), por lo que se hace ineficiente por su elevado costo y mantenimiento.

Para el proyecto se utilizó el modelo presente en MatLab/Simulink de la turbina eólica "Wind Turbine" donde se representa un modelo de una turbina eólica de paso variable 2-4.

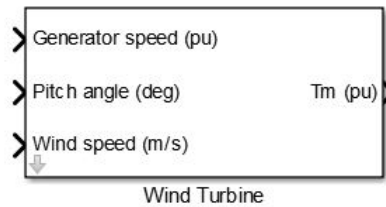


Figura 2-4: Sistema del Modelo de la Turbina Eólica de paso variable [Autor].

Generator speed (pu): velocidad del PMSG (por unidad)

Pitch angle(deg): ángulo de ataque de las palas de la turbina eólica (grados)

Wind speed (m/s): la velocidad del viento (metros por segundos)

Tm (pu): torque mecánico del generador (por unidad)

Componente	Valor
Potencia (W)	2 MW
Velocidad del viento base	12 m/s
Angulo Pitch (β)	0°

Tabla 2.1: Parámetros de la turbina eólica [Autor].

2.3. Aerodinámica de las palas en turbinas de eje horizontal

La aerodinámica de las palas en una turbina eólica aportan un conocimiento relevante para entender el principio del funcionamiento tanto del aerogenerador, como del control

aplicado, en el cual están ligados conceptos fundamentales sobre los que se hablará a continuación como son la fuerza, la sustentación, la velocidad específica y el ángulo de paso.

2.3.1. Velocidad específica

La velocidad específica (ψ), se define como la relación entre la velocidad tangencial en el extremo de la pala (U) y la velocidad del viento sobre las aspas (V), como se observa en la ecuación 2.8:

$$\psi = \frac{U}{V} = \frac{\omega * R}{V} \quad (2.8)$$

Donde:

R : Radio de la turbina eólica (m).

ω : Velocidad angular de rotación (rad/seg)

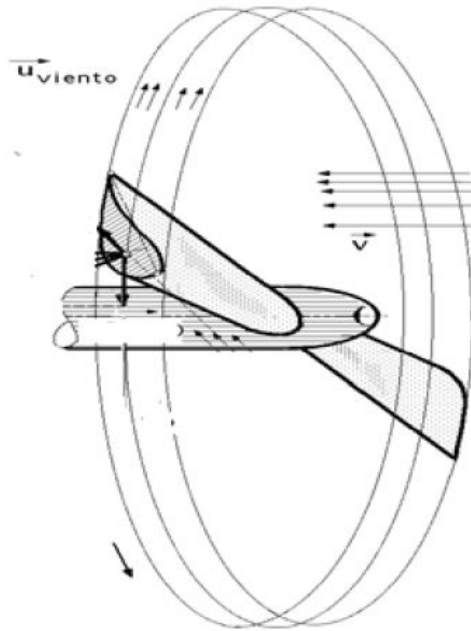


Figura 2-5: Velocidades que interactúan sobre la turbina eólica [23].

2.3.2. Fuerza de sustentación

Las aspas de las turbinas eólicas son diseñadas con una geometría y especificaciones particulares con el fin de producir, en presencia del viento, una diferencia de presiones entre la parte superior e inferior de la pala, de la misma manera como se comportan las alas de los aviones [24], teniendo como resultado una fuerza de sustentación como se observa en la figura 2-6.

La fuerza de sustentación es la responsable de provocar la rotación característica de las turbinas de eje horizontal, incidiendo directamente sobre el rotor de la máquina. Lograr mantener una posición en las palas, tal que permita una fuerza de sustentación acorde a la velocidad nominal requerida por el generador para producir la potencia máxima es el reto de control en este proyecto.

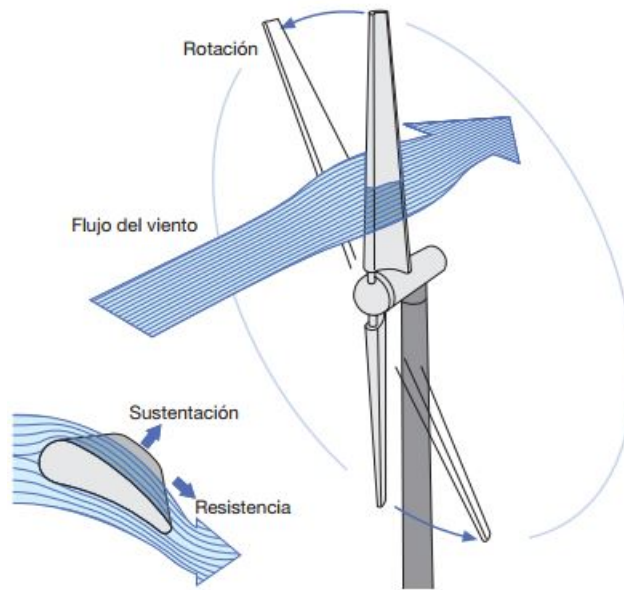


Figura 2-6: Fuerzas que interactúan sobre la turbina eólica [24].

La fuerza de sustentación esta dada por la ecuación 2.9:

$$F = 1/2 * \rho * S * C_L * v^2 \quad (2.9)$$

Donde:

ρ : Densidad del viento.

ν : Velocidad del viento.

S: Área de referencia del cuerpo o superficie alar.

C_L : coeficiente de sustentación (Depende directamente del ángulo de ataque del viento)

De acuerdo a la ecuación 2.9, si se incrementa el ángulo de ataque del viento sobre las aspas de la turbina, se obtendrá una menor fuerza de sustentación y menor rotación, de aquí la importancia de manipular el ángulo de la pala o ángulo de pitch para la potencia máxima extraída por el generador. En este caso si el ángulo de ataque de las palas es de 0° grados, se obtendrá la mayor rotación y la mayor extracción de energía presente en el viento, si el ángulo de ataque supera los 20° grados la sustentación de la palas es mínima y por consiguiente la turbina se va a detener, sin la posibilidad de generar rotación suficiente para el PMSG.

2.3.3. Ángulos de incidencias en la operación de la turbina eólica

En la figura 2-7 se presenta los ángulos de interés en la aerodinámica de la turbina eólica, estos ángulos influyen directamente en la velocidad de rotación que tiene la turbina eólica y por ende en la potencia generada por el PMSG.

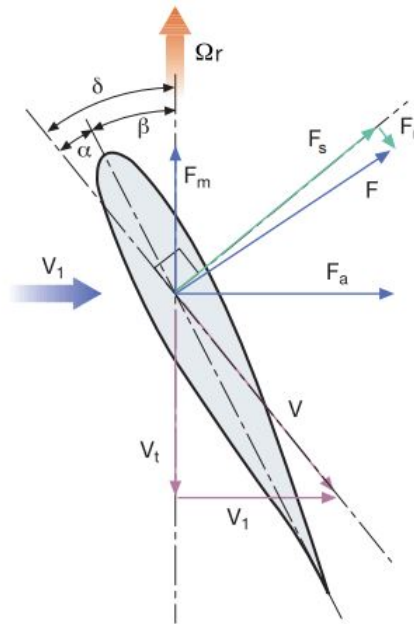


Figura 2-7: Ángulos que inciden sobre una pala de turbina eólica [24].

Donde:

β : Ángulo que forma una cuerda del perfil con el plano de rotación (ángulo de paso)

α : Ángulo que forma la cuerda de perfil con la velocidad aparente del viento (ángulo de ataque)

δ : Ángulo que forma el plano de rotación con la dirección aparente del viento que pasa por el borde de ataque (ángulo aparente del viento).

$$\delta = \beta + \alpha \quad (2.10)$$

2.3.4. Estrategias para el control de potencia en turbinas eólicas

El desarrollo de un sistema de control para turbinas eólicas puede ser dividido en unos pasos claros. Con base a la propuesta o técnica de control planteada, el primer paso corresponde a establecer los objetivos del control. El segundo paso es la selección de las estrategias adecuadas para desarrollar los objetivos del control y por último un tercer paso de como se llevará a cabo dicha propuesta.

Los principales objetivos para el control de potencia en aerogeneradores deben ser los

siguientes.

- Captura de energía proveniente del viento: Maximizar la captura de energía considerando las restricciones de operación como potencia nominal, velocidad nominal entre otras variables.
- Cargas mecánicas: Prevenir las cargas mecánicas excesivas sobre la turbina eólica producto de fluctuaciones bruscas sobre el sistema.
- Calidad de potencia: Condicionar y adecuar la potencia generada para control con los estándares de interconexión con la red o carga presente.

Para este proyecto, el objetivo de control estará enfocado en la regulación de potencia, es por ello que es importante conocer que una turbina eólica sigue la curva de potencia como se observa en la figura 2-8, la cual es característica de cada aerogenerador y es obtenida por los fabricantes en laboratorios con condiciones especiales para su elaboración, las cuales están normalizadas por la IEC-61400

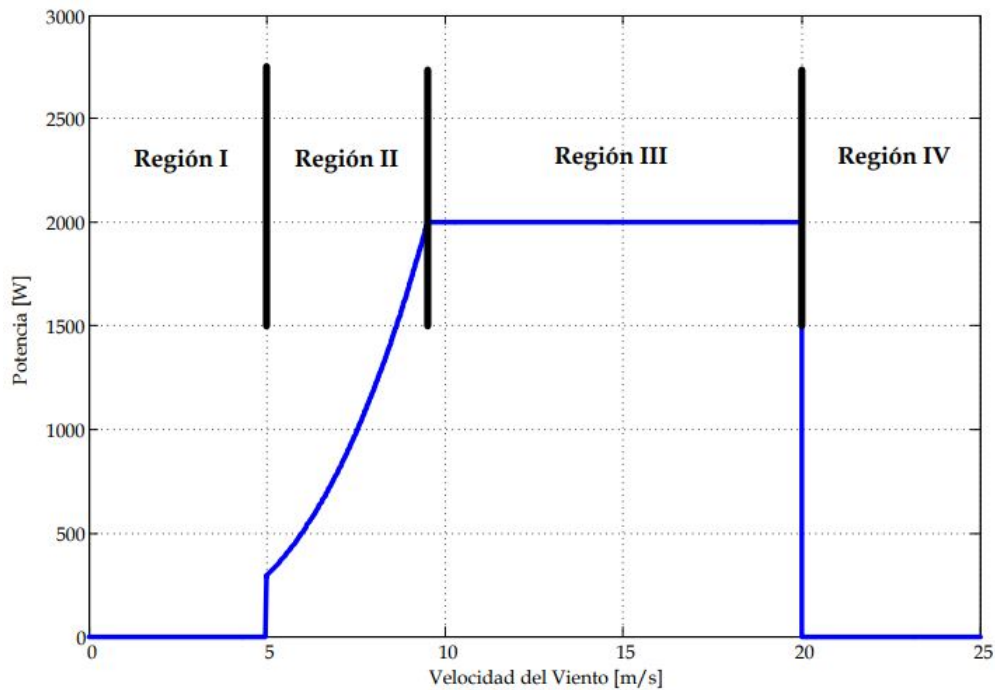


Figura 2-8: Potencia generada en una turbina eólica en función de la velocidad del viento [25].

De acuerdo a la figura 2-8, el primer objetivo sobre la captura de energía proveniente del viento, se encuentra en la región 2 de la curva de potencia, que corresponde a maximizar la extracción de energía eólica donde las velocidades del viento son bajas y las cargas estructurales son relativamente pequeñas. El segundo objetivo sobre las cargas mecánicas, está presente en la región 3, donde las velocidades del viento son altas y un crecimiento drástico de las cargas estructurales en el sistema, donde la idea es limitar dichas cargas pero manteniendo la extracción de la potencia eléctrica, por lo que es necesario limitar la potencia a un valor nominal y óptimo. Si se superan las velocidades de viento de la región 3, el sistema deberá hacer un paro forzado en la rotación de la turbina eólica, protegiéndola de cargas aerodinámicas excesivamente altas que puedan generar daño a los equipos [25].

2.4. Modelo del Actuador hidráulico

Un actuador hidráulico es un dispositivo capaz de efectuar acciones físicas, determinadas, precisas y controladas, el cual utiliza un fluido a presión, normalmente un tipo de aceite el cual permite obtener operaciones de gran precisión.

En este proyecto lo que se logrará será controlar el actuador hidráulico, de esta manera modificar el ángulo de ataque de las palas de la turbina eólica y así cambiar su velocidad y la velocidad del generador síncrono de imanes permanentes regulando la potencia entregada a la red eléctrica.

El modelo del actuador hidráulico se puede representar como un sistema de segundo orden con un tiempo alto de respuesta a un escalón unitario [26].

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{P}{A's^2 + Vs + P} \quad (2.11)$$

Donde:

A' es la aceleración del actuador.

V es la velocidad del actuador.

P es la posición del actuador.

Y es el ángulo de salida para las palas de la turbina eólica

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{0.2s^2 + 0.8s + 1} \quad (2.12)$$

De esta manera la respuesta del actuador hidráulico a un escalón unitario, se presenta de la siguiente manera 2-9:

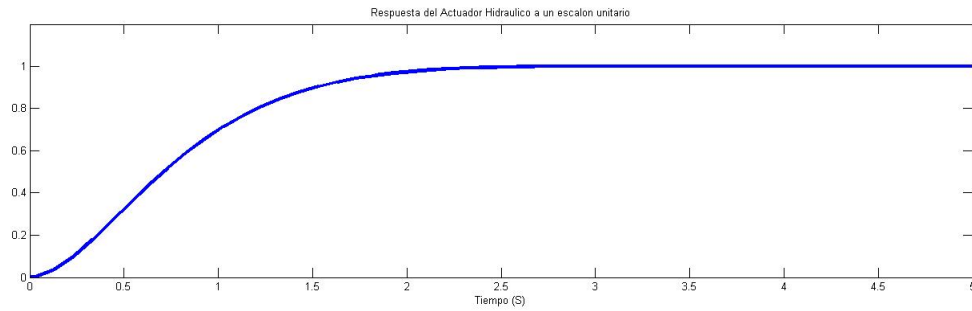


Figura 2-9: Respuesta del actuador hidraulico a un escalon unitario [Autor]

Capítulo 3

Modelo del Generador Eólico

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta el modelo matemático del Generador Síncrono de Imanes Permanentes, las ecuaciones de relación entre la turbina eólica, la caja multiplicadora y el PMSG, convertidor back to back con el análisis del rectificador y el inversor trifásico, algunas ventajas y desventajas de los diferentes tipos de convertidores y por último el filtro LC de salida y la carga eléctrica aplicada al aerogenerador.

3.2. Modelo matemático PMSG

El Generador Síncrono de Imanes Permanentes o PMSG por sus siglas en inglés, es un generador síncrono en el cual se ha reemplazado el bobinado de excitación del rotor, por un sistema compuesto por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante. Los principales usos de este tipo de generadores es en aquellos casos en los cuales no importa que la tensión caiga repentinamente, también se utilizan para alimentar los reguladores que actúan en la excitación de grandes generadores síncronos ya que cuando hay un cortocircuito en el gran generador síncrono son capaces de suministrar la energía necesaria al regulador para que esté sobreexcite al generador y poder mantener la tensión el tiempo suficiente para que salten las protecciones. El otro gran uso es en el área de las energías renovables en la generación eólica ya que se eliminan las escobillas y los sistemas

reductores, con lo que se ahorra en mantenimiento y espacio. Una de las mayores ventajas de los PMSG es que no necesitan un sistema para su excitación. Al eliminar la excitación se puede llegar a ahorrar un 20 % de energía. Al ser una fuente de energía independiente del generador, puede servir para suministrar energía a sistemas auxiliares del generador principal [29], una de sus mayores desventajas es su elevado costo por la fabricación de los imanes permanentes, los cuales están hechos de materiales ferrosos, níquel y elementos pesados.

El modelo matemático del generador síncrono de imanes permanentes se deriva del marco de referencia rotatorio ortogonal síncrono donde la principal idea es la de convertir los valores de las variables dependientes del tiempo a unas nuevas variables ubicadas sobre dos ejes de un nuevo sistema de referencia (dq) más una tercera variable (0) que será el promedio de los tres valores [30]. En la figura 3-1 se aprecian en color negro los tres ejes abc, de momento fijos en el espacio, donde estarán representadas las tres variables origen (abc), mientras que en color rojo están representados los ejes ortogonales (dq), que giran a una velocidad angular ω que es, en principio, cualquier función del tiempo. Entre el eje a y el eje q se forma un ángulo θ que, al ser el sistema qd giratorio, será función del tiempo.

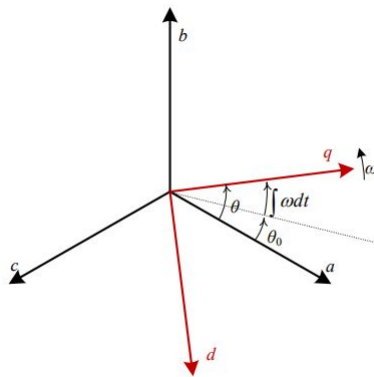


Figura 3-1: Relación de sistema de referencia (abc) con el sistema de referencia (dq0) [30].

El modelo eléctrico de Generador Síncrono de Imanes Permanentes en el marco de referencia rotatorio ortogonal síncrono se da en la ecuación 3.1 [22].

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}(p\omega_r i_q) \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}(p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q}) \end{cases} \quad (3.1)$$

Donde:

L_q , L_d : Inductancias de los ejes q y d respectivamente

v_q , v_d : Voltajes de los ejes q y d respectivamente

i_q , i_d : Corriente de los ejes q y d respectivamente

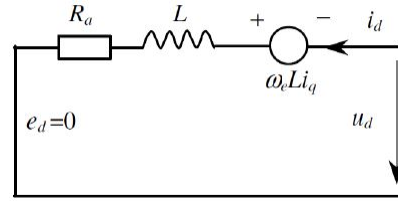
R: Resistencia del estator del generador

ω_r : Velocidad angular del rotor

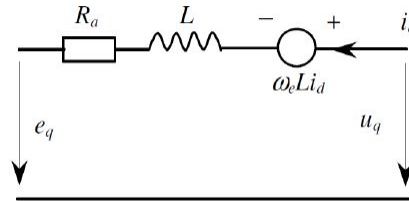
λ : Amplitud del flujo electromagnético del generador.

p: Número de pares de polos

El circuito equivalente en el marco de referencia síncrono se da en la figura 3-2.



a). Circuito equivalente del eje d



b). Circuito equivalente del eje q

Figura 3-2: Circuito equivalente del PMSG en el marco de referencia rotatorio ortogonal síncrono [22].

Para poder trabajar mejor el modelo dinámico del generador síncrono de imanes permanentes y de una forma ideal, las inductancias de los ejes d y q se trabajan iguales, de esta forma $L_d = L_q = L$, por tal razón la ecuación 3.1 se reescribe como [22]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L}v_d - \frac{R}{L}i_d + p\omega_r i_q \\ \frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L}v_q - \frac{R}{L}i_q - p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q} \end{cases} \quad (3.2)$$

El torque electromagnético que une la caja multiplicadora con el PMSG se da por la siguiente ecuación 3.3 [31]:

$$T_e = 1.5 * p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3.3)$$

Dado que las inductancias del eje d y eje q se consideran iguales, la ecuación 3.3 se puede reescribir y ser regulada solo por i_q como:

$$T_e = 1.5 * p * \lambda i_q \quad (3.4)$$

Para poder unir la turbina eólica, la caja multiplicadora de velocidad y el PMSG se utiliza el modelo de transmisión, el cual consta de cuatro partes, el eje de bajas velocidades, el multiplicador, el eje de altas velocidades y el generador. En el análisis, las otras partes de la turbina como la torre, las palas y otros elementos pueden ser despreciados, cuando el interés de estudio varía, la complejidad de la transmisión cambia según dicho estudio. Para este estudio es necesario utilizar el modelo mecánico del PMSG el cual es esencial para poner conectar la turbina eólica, la caja reductora o multiplicadora de velocidad y el generador síncrono, este modelo depende de la velocidad angular del rotor, el torque y la inercia presente en el generador.

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - T_f - F * \omega_r - T_m) * N \\ \frac{d}{dt}\theta = \omega_r \end{cases} \quad (3.5)$$

Donde

J: Combinación de la inercia del rotor y la carga.

F: Combinación de la fricción viscosa del rotor y la carga.

θ : Posición angular del rotor.

T_m : Torque mecánico.

T_f : Torque de fricción estática

N: Valor de la caja multiplicadora

Si el modelo mecánico se considera ideal, la fricción y el torque creado por la fricción pueden ser considerados como cero, de esta manera la ecuación 3.5 se reescribe como:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\omega_r = \frac{1}{J}(T_e - T_m) * N \\ \frac{d}{dt}\theta = \omega_r \end{cases} \quad (3.6)$$

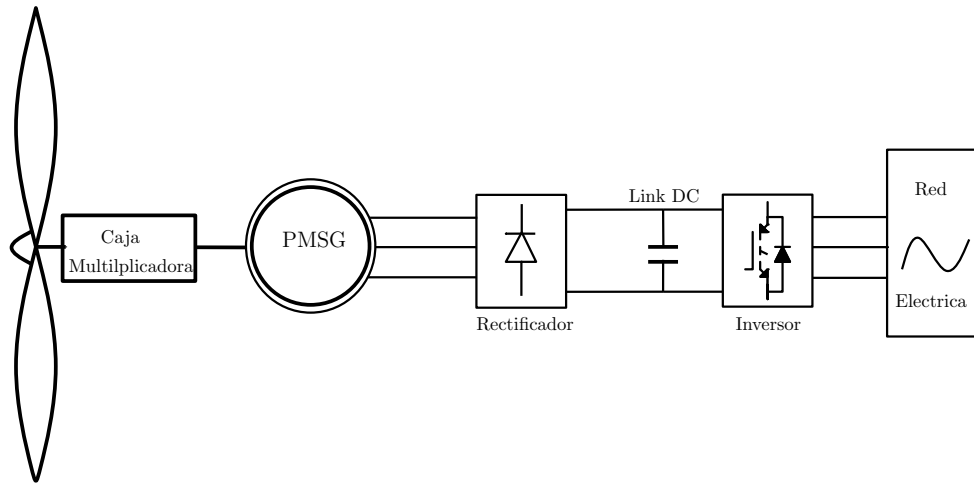


Figura 3-3: Representación del aerogenerador conectado a la red eléctrica [Autor].

Para el proyecto se utilizó el modelo dinámico de una máquina síncrona de imanes permanentes trifásico presente en MatLab/Simulink, en la cual se representa un modelo de una PMSG, la operación del bloque está determinada por el signo de entrada del torque mecánico, de este modo si se desea usar el dispositivo en el modo de motor el signo debe ser positivo y si se desea usar el dispositivo en modo de generador el signo de entrada debe ser negativo.

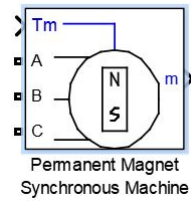


Figura 3-4: Modelo del PMSG en MatLab/Simulink [Autor].

Componente	Valor
Número de Fases	3
Tipo de onda	Sinusoidal
Entrada	Torque
Resistencia del estator (Ω)	0.425
Inductancia (H)	0.000835
Flujo Electromagnético (V*s)	0.433
Torque (N*m)	3.2475

Tabla 3.1: Parámetros del PMSG [Autor].

3.3. Convertidor back to back

La gestión y eficiencia del flujo de potencia en aplicaciones que interconectan dos sistemas de corriente alterna (CA) es un tema que ha cobrado relevancia en los últimos años, especialmente en el campo de las energías renovables, ya que estos nuevos sistemas han impuesto nuevos retos a los esquemas del pasado o convencionales para el manejo del flujo de potencia [32], en donde las redes podían controlar con sistemas relativamente simples, los flujos de potencia eran exclusivamente unidireccionales y los sistemas operaban dentro de los límites establecidos. Pero, en las últimas décadas, la creciente investigación e implementación de generación distribuida, asociada principalmente a las energías renovables, y la aparición de los flujos bidireccionales, han desencadenado un proceso de cambio casi total de las redes eléctricas, por lo que ha sido necesario instalar múltiples dispositivos de medición y de control con el objetivo de mejorar el rendimiento y eficiencia de las redes,

reducir pérdidas y dotar de una mayor flexibilidad al sistema de transporte de energía para mantener su seguridad y confiabilidad de operación dentro de los rangos deseados.

De esta forma actualmente existen diferentes formas de conexión para los convertidores de potencia, la mas empleada gracias a sus ventajas de construcción y operación que favorecen a los diferentes equipos involucrados y mejora la eficiencia de conversión es la configuración conocida como convertidor back-to-back, el cual incluye diferentes etapas de filtrado, inversión y rectificación en un solo equipo.

La expresión *Back-to-Back* hace referencia a la posición anti-paralela de las etapas de rectificación e inversión, donde se encuentran un único posible enlace, el cual es un condensador llamado "DC link". Esta configuración presenta un inconveniente presente en la etapa entre el rectificador y el inversor denominado el canal o bus de continua. Una de las propiedades mas importantes de este tipo de convertidores es proporcionar un control rápido y eficaz del flujo de potencia para la carga o red presente, ya que un flujo uniforme y contante permite al condensador operar a una tensión invariable dentro de las temperaturas y valores de diseño calculados, y de esta manera poder alargar la vida útil de todos los componentes involucrados en este análisis de este proyecto.

Se puede encontrar tres tipos de configuraciones posibles para los convertidores back to back, como se observa en la tabla 3.2 , el mas común es el tipo matricial, el cual es el utilizado en este proyecto.

Topología	Ventajas	Inconvenientes
Matricial	Los interruptores operan bajo las mismas condiciones por lo tanto se da menos estrés térmico y no necesitan condensador	La tensión de salida esta limitada a un 86.6 % la de entrada y no tener condensador puede distorsionar la señal de salida.
Multi-nivel	La frecuencia de conmutación se reduce hasta un 25 % y aumenta la eficiencia global	Desequilibrios entre las tensiones de continua y estrés térmico en los diodos y en los IGBT's.
Resonante	Menos perdidas de conmutación en los IGBT's	Mayor control para mantener la resonancia y desequilibrio de tensiones en continua.

Tabla 3.2: Ventajas y Desventajas de algunos tipos de convertidores back to back [Autor].

3.3.1. Rectificador trifásico

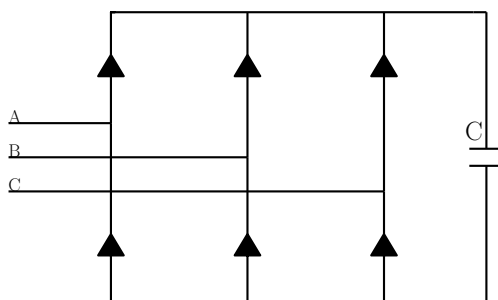


Figura 3-5: Rectificador Trifásico no controlado [Autor].

El modelo del rectificador trifásico de la figura 3-5 está dado por el bloque Universal Bridge de MatLab/Simulink, en cual es un bloque de puente universal con dispositivos de diodos convencionales, donde la red snubber que va en paralelo con los diodos es despreciable y la resistencia interna en los diodos es aproximadamente 0Ω , en la figura 3-6 se observa los parámetros propuestos para el rectificador trifásico aplicado al sistema de generación eólica

Universal Bridge (mask) (link)

This block implement a bridge of selected power electronics devices. Series RC snubber circuits are connected in parallel with each switch device. Press Help for suggested snubber values when the model is discretized. For most applications the internal inductance L_{on} of diodes and thyristors should be set to zero

Parameters

Number of bridge arms: 3

Snubber resistance R_s (Ohms)

1e5

Snubber capacitance C_s (F)

inf

Power Electronic device Diodes

R_{on} (Ohms)

1e-5

L_{on} (H)

0

Forward voltage V_f (V)

0

Figura 3-6: Parámetros Rectificador Trifásico no controlado [Autor].

Componente	Valor
Resistencia red Snubber (Ω)	100k
Dispositivos	Diodos
Resistencia (Ω)	0.00001
Inductancia (H)	0

Tabla 3.3: Parámetros del Rectificador [Autor].

3.3.2. Inversor trifásico

El inversor trifásico es el encargado de convertir la energía en corriente continua (CC) almacenada en el condensador, en corriente alterna (AC), actualmente hay dos tipos de inversores los CSI (Current Source Inverter), la cual representa que la intensidad suministrada por la fuente de corriente continua es constante, y la VSI (Voltage Source Inverter), en la cual tenemos un comportamiento análogo y la parte constante es el voltaje suministrado por la

fuente continua.

El funcionamiento de un inversor está basado en la apertura y cierre sincronizado de semiconductores de potencia con el objetivo de que la señal de salida tenga la forma deseada. De esta manera podemos encontrar salidas como trenes de señales escalón, pero estas señales cuadradas introducen demasiadas perturbaciones sobre las cargas que el inversor alimenta. Una de las principales ventajas de hacer un inversor con más de una etapa o nivel es la reducción de perturbaciones sobre la carga tanto en tensión como en corriente [33]. Una manera de conseguir que la salida se aproxime a una señal sinusoidal y con tan solo una etapa, es actuando directamente sobre el control de los semiconductores, que en una vista general serán transistores y se comportaran idealmente a interruptores. Esta señal de control de los semiconductores se da gracias a la técnica del PWM (Pulse Width Modulation), donde se consigue a partir de una sucesión sincrónica de pulsos, activar y desactivar los semiconductores y de esta manera conseguir que la señal en voltaje que se entrega a la carga sea idealmente una señal sinusoidal.

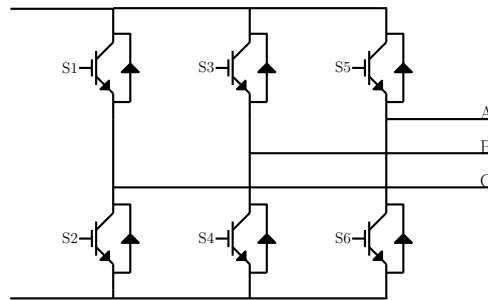


Figura 3-7: Inversor Trifásico [Autor].

Para el proyecto, el modelo del inversor trifásico de la figura 3-7 está dado por seis semiconductores IGBT's, donde se aprecia que a cada terminal g del bloque del semiconductor IGBT se conecta una señal proveniente del generador de pulsos o PWM, el cual esta compuesto por un generador de señales, una señal portadora triangular de alta frecuencia (50000 Hz) y las comparaciones y negaciones correspondientes a cada señal de pulso para el correcto funcionamiento y sincronización de las señales que van a conmutar los IGBT's del inversor trifásico.

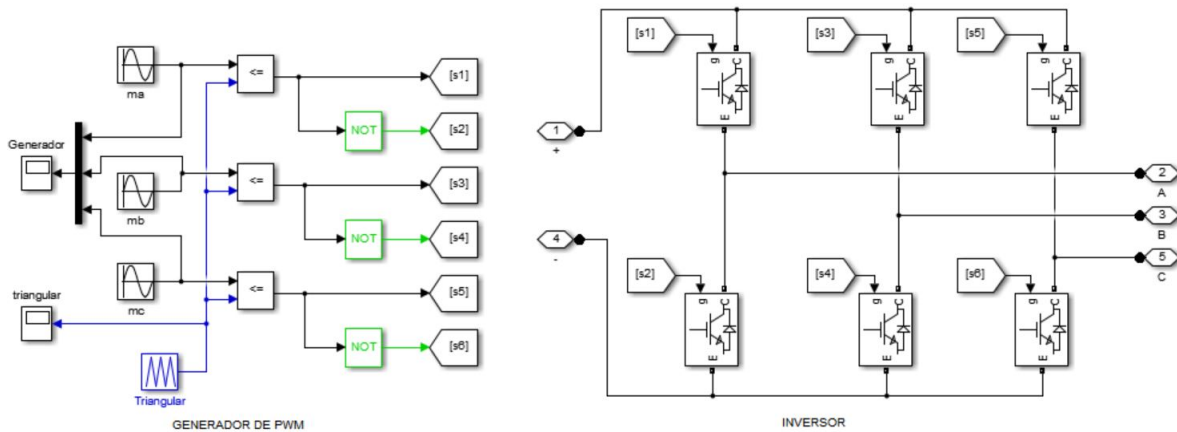


Figura 3-8: Inversor Trifásico en MatLab/Simulink [Autor].

Otro aspecto que se debe tener en cuenta para las formas de ondas sinusoidales que se van a entregar a la carga eléctrica, es el hecho de que las formas de onda en la salida del inversor trifásico no son realmente sinusoidales. Es por esto, que debe existir una forma de hacer que las tensiones de salida de este convertidor sea señales sinusoidales, ya que es un aspecto importante el contenido armónico en la calidad de servicio de la energía eléctrica que se genera.

Para solucionar y corregir la señal, se agrega en serie a la salida del inversor un filtro L-C trifásico, diseñado para obtener las tensiones sinusoidales deseadas que van hacia la carga.

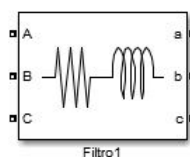


Figura 3-9: Filtro en MatLab/Simulink [Autor].

3.4. Carga eléctrica

Para determinar la carga eléctrica es importante conocer la potencia activa y reactiva que esta consume, para el análisis de funcionamiento dinámico y de estado estable del sistema, pero el modelado exacto de la carga es difícil, debido a la naturaleza compleja y cambiante de los consumidores y la dificultad de obtener datos exactos de sus características. El modelo

que se selecciona para la carga representa tanto la potencia reactiva como la potencia activa, por tal razón se utilizó una carga tipo resistivo-inductivo trifásico [33].

De acuerdo a lo anterior, para modelar la carga eléctrica se utilizó los elementos que representan el consumo de energía (resistencia y bobina). Para tal fin, se empleo el tipo de bloque que representa inductancias, resistencias o condensadores trifásicos *Three-phase Parallel RLC Load* como se observa en la figura 3-10, configurado en una conexión Y o estrella.

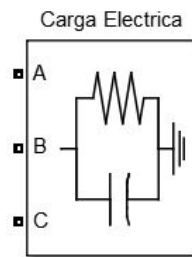


Figura 3-10: Bloque de Carga eléctrica en MatLab/Simulink [Autor].

Componente	Valor
Frecuencia Nominal (Hz)	60
Inductancia Reactiva (QL)	0
Capacitancia Reactiva (Qc)	100kQc

Tabla 3.4: Parámetros de la Carga Eléctrica [Autor].

Capítulo 4

Control Robusto basado en las Desigualdades Matriciales Lineales

En este capítulo se hace una breve revisión del modelo a través de las variable de estado que son el punto de partida para realizar la técnica de control a través de LMI y una revisión general de las desigualdades matriciales lineales, las técnicas de optimización convexa asociadas y las restricciones de control, las cuales son la base para el análisis y síntesis de los controladores con LMI.

En la figura 4-1, se presenta en diagramas de bloques el sistema completo en lazo abierto y en lazo cerrado con sus respectivas variables de entrada y de salida para el sistema.

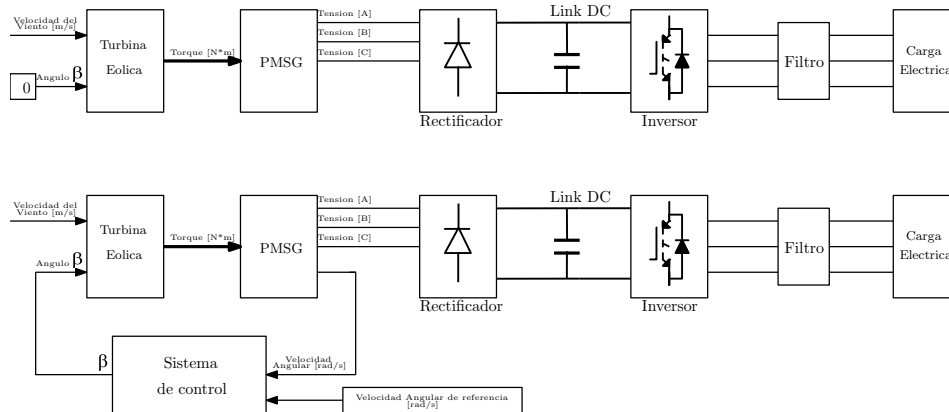


Figura 4-1: Sistema en lazo abierto y en lazo cerrado.

4.1. Modelo en Variables de Estado

La representación en las variables de estado ofrece un modelo de los sistemas físicos en forma compacta y organizada, el cual describe los sistemas dinámicos mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden. A diferencia de la teoría por el método clásico, el cual utiliza la función de transferencia. La teoría por variable de estados se basa en el modelo de espacio de estado en el dominio del tiempo de cada sistema.

Un modelo matemático se puede definir como la descripción matemática del comportamiento del sistema, varios sistemas dinámicos, independientemente de que tipo sean, se pueden caracterizar por ecuaciones diferenciales, las cuales se obtienen con base a las leyes físicas. Los modelos matemáticos se pueden representar de dos formas: mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales de primer orden, conocidas como ecuaciones de estado, cuya solución se puede considerar como una trayectoria en el espacio o mediante una ecuación diferencial de n-ésimo orden. Sin embargo, este último método queda restringido a sistemas de una sola entrada y una sola salida [34].

Entre las ventajas más significativas de esta teoría, está la capacidad de ser aplicable a sistemas que son variantes e invariantes en el tiempo, multivariantes y no lineales. Además es de gran utilidad para analizar y estudiar mediante simulaciones los comportamientos en régimen permanente y transitorio de los sistemas dinámicos los cuales pueden ser representados en la forma general del modelo en variables de estado dada por la siguiente ecuación [15]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_w w(t) + B_u u(t) \\ z(t) = C_z x(t) + D_{zw} w(t) + D_{zu} u(t) \\ y(t) = C_y x(t) + D_{yw} w(t) + D_{yu} u(t) \end{cases} \quad (4.1)$$

donde $x(t)$ es el vector de las variables de estado $\in \mathbb{R}^n$, $w(t)$ es el vector de entradas de perturbación $\in \mathbb{R}^l$, $u(t)$ es el vector de entrada $\in \mathbb{R}^m$, $z(t)$ es el vector de salidas controladas $\in \mathbb{R}^q$ y $y(t)$ es el vector de salidas medibles $\in \mathbb{R}^r$. Las dimensiones del sistema de matrices se define como $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B_w \in \mathbb{R}^{n \times l}$, $B_u \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $C_z \in \mathbb{R}^{q \times n}$, $D_{zw} \in \mathbb{R}^{q \times l}$, $D_{zu} \in \mathbb{R}^{q \times m}$, $C_y \in \mathbb{R}^{r \times n}$, $D_{yw} \in \mathbb{R}^{r \times l}$, $D_{yu} \in \mathbb{R}^{r \times m}$. Para el proyecto, el vector de salidas controladas $z(t)$ no es de interés por lo cual se omite.

4.1.1. Formas canónicas controlables

Existen varias técnicas para obtener las variables de estado de un sistema, el cual está definido por su función de transferencia, una de estas técnicas es a través de la forma canónica controlable, la cual es representada a través de la siguiente ecuación [34]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_n & -a_{n-1} & -a_{n-2} & \cdots & -a_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ \\ y(t) = \begin{bmatrix} b_n & -a_n b_0 & \cdots & b_{n-1} - a_{n-1} b_0 & b_1 - a_1 b_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_n(t) \end{bmatrix} + b_0 u(t) \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Para el proyecto se trabajo con la función de transferencia del actuador hidráulico, el cual según el ángulo aplicado, cambia la orientación de las palas y de esta forma variar la velocidad angular del generador, y así cambiar la potencia entregada a la carga eléctrica como se explicó en el capítulo 2. El comportamiento del actuador hidráulico del aerogenerador se aproxima a un sistema de segundo orden 2.11.

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{P}{A's^2 + Vs + P} \quad (4.3)$$

Para poder aplicar la forma canónica controlable, es necesario, primero definir las variables de estado aplicadas al sistema y segundo que el valor de s^2 quede en valor unitario, de esta forma la ecuación 4.5 representa las variable de estado definidas y la ecuación 4.3 queda representada de la siguiente manera:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{P}{A'}}{s^2 + \frac{V}{A'}s + \frac{P}{A'}} \quad (4.4)$$

Se definen las variables de estado:

$$x_1 = \ddot{y}(t) \quad x_2 = \dot{y}(t) \quad x_3 = y(t) \quad (4.5)$$

$$[s^2 + \frac{V}{A'}s + \frac{P}{A'}]Y(s) = -\frac{P}{A'}U(s) \quad (4.6)$$

$$s^2Y(s) + \frac{V}{A'}sY(s) + \frac{P}{A'}Y(s) = -\frac{P}{A'}U(s) \quad (4.7)$$

$$\ddot{y}(t) + \frac{V}{A'}\dot{y}(t) + \frac{P}{A'}y(t) = -\frac{P}{A'}u(t) \quad (4.8)$$

Usando las ecuaciones 4.5 y 4.7 se reescribe la ecuación 4.8 de la siguiente manera:

$$\dot{x}_3 + \frac{V}{A'}x_3 + \frac{P}{A'}x_2 = -\frac{P}{A'}u(t) \quad (4.9)$$

Obteniendo el siguiente sistema de variables de estado.

$$\left\{ \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -\frac{P}{A'} & -\frac{V}{A'} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} \frac{P}{A'} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \right. \quad (4.10)$$

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y = Cx(t) + D \end{cases} \quad (4.11)$$

4.2. Control LMI

La técnica de control basado en Desigualdades Matriciales Lineales consiste en la elección de varios requerimientos de diseño expresados como restricciones que se deben cumplir, y de esta forma, como una función de optimización se asegure un buen desempeño dinámico en una planta. Además dicha metodología permite fácilmente la existencia de incertidumbres lo que conlleva a la obtención de una ley de control robusta. Gracias al progreso de potentes herramientas computacionales y técnicas de optimización convexa, varios problemas de control que no tenían solución analítica, hoy en día pueden ser resueltos numéricamente [35].

El control basado en LMIs, es una alternativa potente y atractiva en el ámbito de las energías renovables, ya que permite satisfacer requerimientos dinámicos en la regulación de potencia y en la eficiencia obtenida, tales como: nivel de rechazo a perturbaciones y estabilidad robusta del sistema. Este enfoque puede ser aplicado a sistemas con entrada de control simples o múltiples a partir de su representación en las variables de estado.

4.3. Antecedentes de las LMIs

El uso y las aplicaciones de las Desigualdades Matriciales Lineales en el análisis de los sistemas dinámicos se remontan al año de 1890 [36], cuando Lyapunov (6 de julio de 1897 - 3 de noviembre de 1918) publicó su trabajo en el cual se formula el estudio de la estabilidad de sistemas dinámicos a través de una desigualdad matricial. Luego en la década de los años 40's, Lur'e, Postnikov y otros investigadores aplican el método publicado por Lyapunov para formular a través de esta técnica algunos problemas prácticos de la ingeniería, especialmente problemas de estabilidad de ciertos sistemas dinámicos no lineales [37]. Estas desigualdades permitían estudiar y analizar la estabilidad de un sistema de forma analítica lo que restringía la aplicación de esta técnica solo a sistemas de orden limitado. Luego en los años 60's, Yakubovich [38], Popov [39], Kalman [40], lograron encontrar una solución de las LMIs que surgieron en el problema de Lur'e a simples criterios gráficos, usando lo que se conoce como lema real positivo (PR) del álgebra multi-lineal. Estas investigaciones pueden ser aplicadas a sistemas de alto orden, pero desafortunadamente no puede extenderse a sistemas con más de una no linealidad.

Posteriormente en los años 70's, se descubrió que la LMI del lema real positivo se podía también resolver a través de la solución de una ecuación de Riccati. De esta manera los investigadores de la época contaban ya con varios métodos para resolver tipos especiales de LMIs entre los que se encontraban: métodos directos solo aplicables a sistemas de bajo orden, métodos gráficos y métodos basados en resolver ecuaciones lineales de Lyapunov y Riccati [36]. Un gran avance ocurrió años después, cuando esta técnica fue formulada como problemas de optimización convexa, este hecho permitió resolver varias LMIs de manera fiable facilitando así el diseño a partir de dicho enfoque. Varios autores como Pyatnitskii y Skorodinskii [41], fueron algunos de los primeros investigadores en formular la búsqueda de una función de Lyapunov como un problema de optimización convexa. Un paso importante que permitió avanzar en la resolución eficiente de LMIs, fue la aparición de métodos de punto interior a raíz del trabajo realizado por Karmarkar [42], del mismo modo fue Nesterov [43], quien llevó el algoritmo de punto interior para la optimización lineal y optimización convexa.

Actualmente, muchos problemas de control robusto de sistemas lineales pueden ser formulados como problemas de optimización convexa mediante LMIs. Varios de estos problemas de optimización pueden ser solucionados efectivamente a través de potentes algoritmos implementados en varios toolbox de MatLab. Recientemente esta técnica es usada en la electrónica de potencia para resolver varios problemas tales como: las especificaciones transitorias, nivel de rechazo a perturbaciones y estabilidad robusta en los convertidores conmutados [15]

4.4. Algunos problemas definibles con LMIs

Una desigualdad lineal matricial (LMI), es una restricción convexa [44], expresada usualmente en la ecuación 4.12

$$F(x) = F_0 + \sum_{i=1}^m x_i F_i > 0 \quad (4.12)$$

Donde $x \in R^m$ es la variable de decisión o variable a optimizar y $F_i = F_i^T \in R^{n \times n}$ son las matrices simétricas conocidas. El símbolo de desigualdad " $>$ " indica la condición que todos los valores de $F(x)$ son positivos. Es fácil ver que una LMI define un conjunto convexo, es decir, el conjunto $X = \{x | F(x) > 0\}$ es convexo; además, no necesariamente tiene

una frontera suave.

$$\phi(x) = \begin{cases} \text{Indet } F(x)^{-1} & x \in X \\ \infty & x \notin X \end{cases} \quad (4.13)$$

La función descrita en la ecuación 4.13, tiene la propiedad de ser finita únicamente en X y de tender a infinito cuando se acerca a su frontera. Las curvas de nivel de la función ϕ dan una aproximación suave de la forma del conjunto factible X . Esta aproximación por líneas de contorno se observa en la figura 4-2.

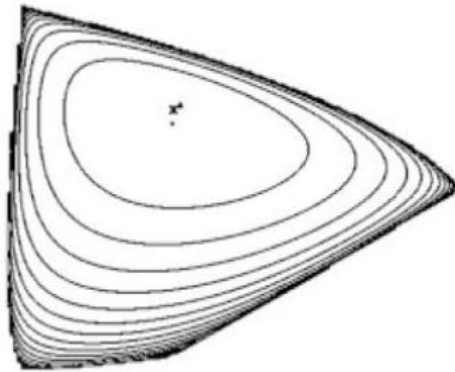


Figura 4-2: Líneas de contorno de la función ϕ , las cuales dan una aproximación suave de la forma del conjunto factible X [44].

4.5. Modelo en Parámetros Inciertos

El control robusto se basa en el análisis de sistemas controlados bajo la presencia de incertidumbres y señales de perturbación. Estas técnicas para el diseño de este tipo de controladores depende del tipo de incertidumbre en los sistemas. Algunas de las causas por las cuales se genera incertidumbre en los sistemas se encuentran en los siguientes factores:

- Modificación en el punto de trabajo de la planta o en el modelo lineal del sistema
- Dinámica no lineal.
- Dinámica en alta frecuencia.

- Imprecisiones en los parámetros.

De acuerdo a los factores anteriormente mencionados, las incertidumbres se pueden clasificar en estructurales y no estructurales. Las incertidumbres estructurales modelan las variables de los parámetros durante el funcionamiento del sistema, mientras que las incertidumbres no estructuradas consisten en componentes dinámicos omitidos en el modelo lineal o en variaciones en el modelo dinámico durante el funcionamiento del sistema.

La representación de este tipo de sistemas puede ser vista como una extensión de los sistemas LTIs 4.1 con matrices dependientes linealmente de parámetros inciertos como se observa en la ecuación 4.14 :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(\rho)x(t) + B_w(\rho)w(t) + B_u(\rho)u(t) \\ z(t) = C_z(\rho)x(t) + D_{zw}(\rho)w(t) + D_{zu}(\rho)u(t) \\ y(t) = C_y(\rho)x(t) + D_{yw}(\rho)w(t) + D_{yu}(\rho)u(t) \end{cases} \quad (4.14)$$

donde $\rho = (\rho_1, \dots, \rho_{n_\rho})$ es el vector de agrupación de n_ρ parámetros inciertos del sistema. cada uno de estos parámetros inciertos ρ se encuentran limitados entre un valor mínimo y un valor máximo $[\rho_{min}, \rho_{max}]$. Las posibles combinaciones de los valores mínimos y máximos del vector ρ define un polítopo convexo con 2^{n_ρ} vértices $v_1, \dots, v_L$, que puede ser representado mediante la siguiente combinación convexa.

$$\rho \in C_0(v_1, \dots, v_L) = \left\{ \sum_{i=1}^L \vartheta_i v_i, \quad \vartheta_i > 0, \sum_{i=1}^L \vartheta_i = 1 \right\} \quad (4.15)$$

donde C_0 es la envolvente convexa del conjunto de vértices $\in \mathbb{R}^{n_\rho}$.

Cuando la dependencia es lineal sobre ρ , el sistema de matrices $S(\rho)$ se puede representar mediante el siguiente polítopo convexo

$$S(\rho) \in C_0(\zeta_1, \dots, \zeta_L) = \left\{ \sum_{i=1}^L \vartheta_i \zeta_i, \quad \vartheta_i > 0, \sum_{i=1}^L \vartheta_i = 1 \right\} \quad (4.16)$$

Siendo $S(\rho)$

$$S(\rho) = \begin{bmatrix} A(\rho) & B_w(\rho) & B_u(\rho) \\ C_z(\rho) & D_{zw}(\rho) & D_{zu}(\rho) \\ C_y(\rho) & D_{yw}(\rho) & D_{yu}(\rho) \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

donde los vértices ζ_i corresponde a la imagen ϑ_i , es decir, $\zeta_i = S(\vartheta_i)$. La representación gráfica de un sistema politopico se observa en la figura 4-3

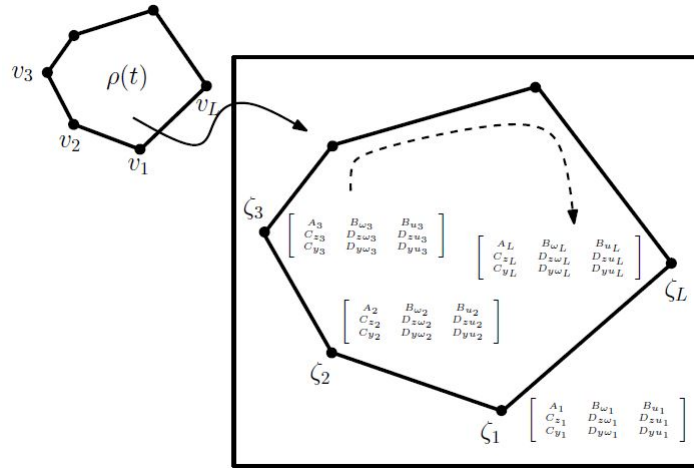


Figura 4-3: Representación grafica de la incertidumbre politópica [15].

La representación por variables de estado general 4.1, no solo permite observar las variables de entrada $u(t)$ y de salida $y(t)$, sino también un conjunto de variables que indican toda la información dinámica del sistema, es decir $x(t)$. Además en este modelo se consideran variables como es el vector de perturbaciones $w(t)$, el vector de salidas controladas $z(t)$ y el vector de salidas medibles $y(t)$. Una representación esquemática de un sistema mediante variables de estado, donde no se considera $z(t)$ ni $w(t)$ y el cual es el esquema usado en el proyecto se observa en la siguiente figura:

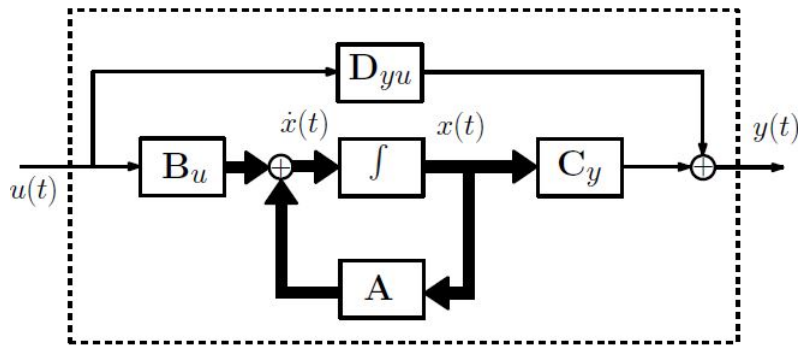


Figura 4-4: Representación esquemática de un sistema descrito en variables de estado [15].

Considerando que todas las variables de estado son medibles y que están disponibles para realimentación, la ley de control queda de la siguiente forma

$$u(t) = \mathbf{F}x(t) \quad (4.18)$$

donde $\mathbf{F}$ es el vector de ganancias de realimentación que ponderan cada una de las variables de estado. Mediante el control por realimentación de estado se podrán colocar los polos del sistema en cualquier lugar del plano complejo sin restricciones. La Figura 4-5 muestra el esquema de control a través de la realimentación de estado.

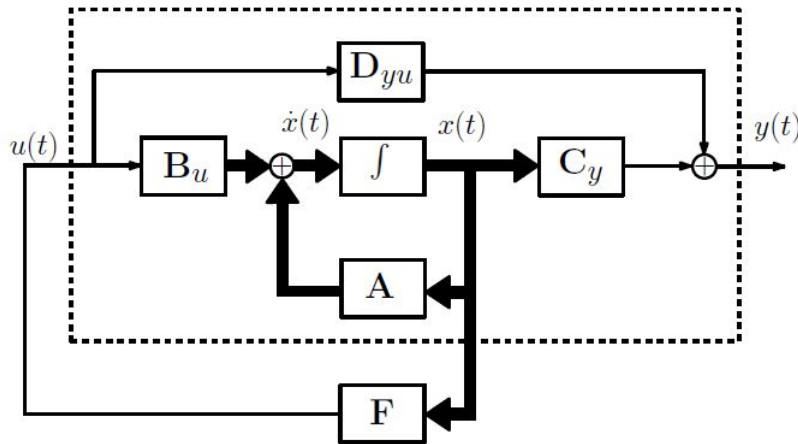


Figura 4-5: Representación de control por realimentación de variables de estado [15].

de esta manera, si sustituimos la ley de control 4.18 en el modelo descrito en 4.1, el comportamiento dinámico del sistema en lazo cerrado se describe por la siguiente ecuación:

$$\dot{x}(t) = (A + B_u \mathbf{F})x(t) \quad (4.19)$$

4.6. Formulación de restricciones en LMI's

Una condición suficiente para que el sistema definido por Además de la estabilidad, hay restricciones como tales como el rechazo a perturbaciones, ubicación de los polos en lazo cerrado y limitaciones en el esfuerzo del control, las cuales, se pueden tener en cuenta para el diseño de ganancia de realimentación $\mathbf{F}$, estas restricciones para asegurar un buen comportamiento dinámico de sistema, son estudiadas a continuación:

4.6.1. Restricción LMI para el diseño de control H_∞

Considerando el sistema 4.1 en lazo cerrado

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + B_u \mathbf{F})x(t) + B_w w(t) \\ z(t) = (C_z + D_{zu} \mathbf{F}x(t)) + D_{zw} w(t) \end{cases} \quad (4.20)$$

Para lograr y asegurar un mínimo nivel de atenuación de una perturbación externa $w(t)$ sobre la salida controlada $z(t)$, se logra determinando la máxima ganancia RMS (Root Mean Square) o norma H_∞ de la función de transferencia del sistema realimentado $H(s)$ de $w(t)$ a $z(t)$

De esta manera el sistema definido por 4.20 es asintóticamente estable para algunas ganancias de realimentación $\mathbf{F}$ y $\frac{\|z\|_2}{\|w\|_2} < \gamma$ si existe una matriz simétrica definida positiva $\mathbf{W}$ tal que

$$\begin{bmatrix} A\mathbf{W} + \mathbf{W}A^T + B_u \mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T B_u^T & B_w & \mathbf{W}C_z^T + \mathbf{Y}^T D_{zu}^T \\ B_w^T & -\gamma & 0 \\ C_z \mathbf{W} + D_{zu} \mathbf{Y} & 0 & -\gamma \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Donde $\mathbf{W}$ es una matriz simétrica definida positiva

$$\mathbf{F} = \mathbf{Y}\mathbf{W}^{-1}$$

A es la matriz de estado.

B_u es la matriz de entrada.

B_z es la matriz de entrada con el vector de salida controladas que para el proyecto es igual a cero.

C es la matriz de salida.

D_{zu} es la matriz de transición directa con el vector de salida controladas que para el proyecto es igual a cero.

$\gamma > 0$

4.6.2. Restricción LMI para ubicación de polos

Considerando el sistema LMI 4.1 en lazo cerrado

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A + B_u \mathbf{F})x(t) + B_w w(t) \\ z(t) = (C_z + D_{zu} \mathbf{F})x(t) + D_{zw} w(t) \end{cases} \quad (4.22)$$

La ubicación de los polos en lazo cerrado es importante para el buen funcionamiento transitorio de sistemas dinámicos. Esta formulación consiste en forzar la ubicación de los polos en una región del plano complejo $(x \pm jy)$, que asegure una mínima tasa de decaimiento α , un mínimo factor de amortiguamiento $\zeta = \cos(\theta)$ y una máxima frecuencia natural $\omega_0 = r \sin(\theta)$. Por lo tanto, la región $S(\alpha, \theta, r)$ limita el sobrepaso máximo, el tiempo de elevación y el tiempo de establecimiento del sistema.

Los polos en lazo cerrado del sistema 4.22, se ubican en la región $S(\alpha, \theta, r)$ si existe una matriz simétrica definida positiva $\mathbf{W}$ tal que:

- Restricción para la tasa de decaimiento α

$$A\mathbf{W} + \mathbf{W}A^T + B_u \mathbf{Y} + \mathbf{Y}^T B_u^T + 2\alpha \mathbf{W} < 0 \quad (4.23)$$

- Restricción para la limitación del factor de amortiguamiento ζ

$$\begin{bmatrix} \cos\theta(A\mathbf{W} + \mathbf{W}A^T + B_u\mathbf{Y} + \mathbf{Y}^TB_u^T) & \sin\theta(A\mathbf{W} - \mathbf{W}A^T + B_u\mathbf{Y} - \mathbf{Y}^TB_u^T) \\ \sin\theta(-A\mathbf{W} + \mathbf{W}A^T - B_u\mathbf{Y} + \mathbf{Y}^TB_u^T) & \cos\theta(A\mathbf{W} + \mathbf{W}A^T + B_u\mathbf{Y} + \mathbf{Y}^TB_u^T) \end{bmatrix} < 0 \quad (4.24)$$

- Restricción para la limitación de la frecuencia natural ω_0

$$\begin{bmatrix} -r\mathbf{W} & \mathbf{W}A^T + \mathbf{Y}^TB_u^T \\ A\mathbf{W} + B_u\mathbf{Y} & -r\mathbf{W} \end{bmatrix} < 0 \quad (4.25)$$

Siendo $\mathbf{F} = \mathbf{Y}\mathbf{W}^{-1}$

4.6.3. Restricción LMI para la entrada de control

En el diseño de controladores, generalmente no se tienen en cuenta condiciones que limiten los valores de la señal de entrada. Para el caso del control por realimentación de estados, un valor excesivo de los componentes de $\mathbf{F}$ podría saturar la entrada de control, afectando las formulaciones anteriormente mencionadas y las prestaciones de funcionamiento previstas del sistema. Por esta razón, se introduce y una nueva restricción LMI que restringe el esfuerzo de control, es decir, $\|u(t)\|_2 \leq \mu$ a lo largo de una trayectoria para alguna condición desde $x(0)$ la cual es conocida. De la siguiente manera la restricción para el esfuerzo de control es aplicada en todo tiempo $t \geq 0$ si existe una matriz simétrica definida positiva $\mathbf{W}$ tal que satisfaga las siguientes LMIs:

$$\begin{bmatrix} 1 & x(0)^T \\ x(0) & \mathbf{W} \end{bmatrix} \geq 0 \quad \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{Y}^T \\ \mathbf{Y} & \mu^2\mathbf{I} \end{bmatrix} \geq 0 \quad (4.26)$$

donde $\mathbf{W} = P^{-1}$ y $\mathbf{Y} = \mathbf{F}\mathbf{W}$

Dadas las restricciones y condiciones de las Desigualdades Matriciales Lineales mencionadas anteriormente, el procedimiento de la síntesis de control robusto consiste en encontrar la ganancia de realimentación $\mathbf{F}$ tal que el valor de nivel de atenuación entre la perturbación de entrada y salida sea mínimo, el decir, minimizado el valor de γ en la condición 4.21, satisfaciendo las restricciones para la ubicación de polos en la región $S(\alpha, \theta, r)$ 4.23 4.24 4.25

y la restricción para el esfuerzo de control 4.26, para cada vértice ζ_1 de la representación politópica del modelo 4.22. De esta manera, el procedimiento de control se puede expresar mediante el siguiente algoritmo de optimización:

minimizar γ sujeto a
W, Y

$$(4.21), (4.23), (4.24), (4.25), (4.26) \\ \forall \{\zeta_i\}, i = 1, \dots, L \quad (4.27)$$

Como algunos parámetros del actuador hidráulico son inciertos y con el objetivo de asegurar que los requerimientos y restricciones de control sean obtenidos para algún valor de parámetros, se define un vector ρ que reúna los términos inciertos de manera que las matrices A , B_u , tengan una dependencia lineal respecto a estos parámetros ρ . Después, se define un polígono convexo que contenga todos los posibles valores de las matrices dinámicas $A(\rho)$, $B_u(\rho)$.

Con relación a lo anterior, se considera que la posición (P), es el parámetro incierto del actuador hidráulico, de esta manera las matrices A , B_u , del modelo son las que dependen del parámetro incierto P . Por lo tanto, el vector de parámetros inciertos ρ se define como:

$$\rho = P \quad (4.28)$$

Por consiguiente, los posibles valores de ρ definen un polígono de $L = 2^1$ vértices $\{v_1, v_2\}$ tal que sus coordenadas son limitadas por:

$$\rho \in [\rho_{min}, \rho_{max}] = \{P_{min}, P_{max}\} \quad (4.29)$$

De esta manera, el sistema de matrices $S(\rho) = [A(\rho), B_u(\rho)]$ está incluido dentro del polígono convexo $C_0\zeta_1$.

Como se explicó anteriormente el objetivo del control es encontrar un vector de ganancias de realimentación $\mathbf{F}$ que minimice la norma H_∞ satisfaciendo así las restricciones en el esfuerzo de control y la ubicación de polos para todos los vértices del modelo politópico. Los

valores del conjunto de parámetros del convertidor se muestran en la tabla 4.1

Parámetro	Valor
Aceleración (A')	0.2 (m/s^2)
Velocidad (V)	0.8 (m/s)
Posición (P)	1

Tabla 4.1: Parámetros del actuador hidráulico.

El valor de la posición del actuador es igual a $P = 5$. los valores de los parámetros (α, θ, r, μ) para el diseño del controlador robusto de acuerdo a las expresiones (4.21), (4.23), (4.24), (4.25), (4.26), se especifican en la siguiente tabla 4.2

Parámetro	Valor
α	2
θ	30°
r	$\frac{2\pi f_o}{10}$
μ	0.01

Tabla 4.2: Parámetros del controlador del actuador hidráulico.

Una vez se establecen los valores de (α, θ, r, μ) , se obtiene el controlador robusto LMI resolviendo el algoritmo de optimización 4.27 para el modelo politópico 4.28, a través del toolbox LMI de MatLab-Simulink. Obteniendo el siguiente vector para la retroalimentación **F**

$$\mathbf{F} = [0.1834 \quad -3.7405 \quad -3.9239] \quad (4.30)$$

A partir del vector de ganancias obtenido en 4.30 se cumple con la asignación de polos en la restricción de ubicación de polos establecida en la sección 4.6.2 con un θ de 30° .

$$\left\{ \begin{array}{l} polos = eig(A + Bu * F) \\ polos = \\ \quad -1.0000 + 0.0000i \\ \quad -1.4619 + 1.6369i \\ \quad -1.4619 - 1.6369i \end{array} \right. \quad (4.31)$$

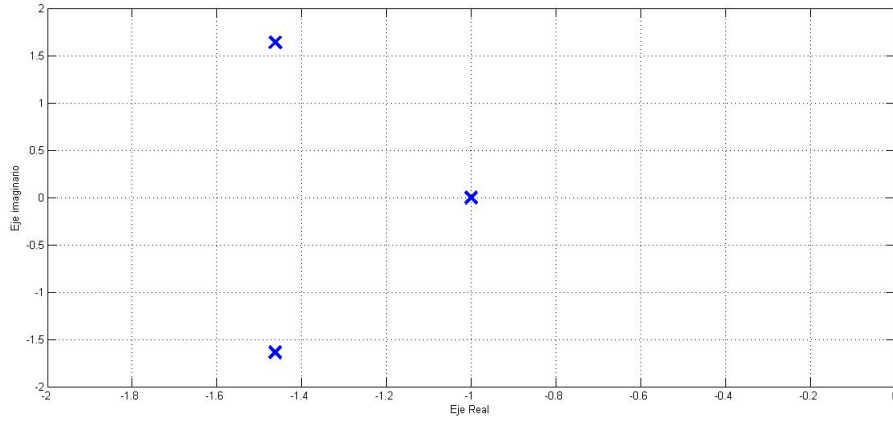


Figura 4-6: Ubicación de polos con el control LMI-robusto

4.7. Control PI clásico

Para el control PI (Proporcional - Integral) a través de la técnica clásica, a partir de la función de transferencia de la ecuación 4.3. Se modelo la función de transferencia del control a partir de la siguiente ecuación 4.32 [34]

$$G_c = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4.32)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional y T_i se denomina al tiempo de acción integral. Ambos valores son ajustables. El tiempo integral regula la velocidad de acción del control, mientras que el K_p , afecta tanto a la parte integral como a la parte proporcional del control.

La ganancia proporcional y el tiempo de acción integral se ajusta según la gráfica obtenida por la respuesta del actuador hidráulico en la figura 2-9, en el cual $T_i = \frac{1}{0.3}$ y $K_p = 0.9 * \frac{T}{L}$, donde T es el tiempo de máximo estabilidad el cual se estableció en 3 segundos y L es el punto de inflexión de la respuesta del sistema el cual se estableció en 0.6. Obteniendo de esta manera la función de transferencia para el control P-I de la ecuación 4.33 y los polos del sistema para el control P-I en la figura 4-9

$$G_c = \frac{U(s)}{E(s)} = 3.9(1 + \frac{1}{3.2s}) \quad (4.33)$$

En el proyecto se utilizó el bloque *PID controller* 4-7, el cual implementa algoritmos de control PID, PI, PD, P o I en tiempo continuo o discreto.

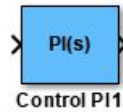


Figura 4-7: Bloque de control PI

La etapa de control posee de entrada la velocidad angular del generador síncrono de imanes permanentes en unidades de PU (por unidad), la cual es comparada con la velocidad angular de referencia, calculando así el error, que ingresa al control PI, el cual calcula el ángulo para el actuador hidráulico el cual es la entrada para el ángulo de la turbina eólica como se observa en la figura 4-8.

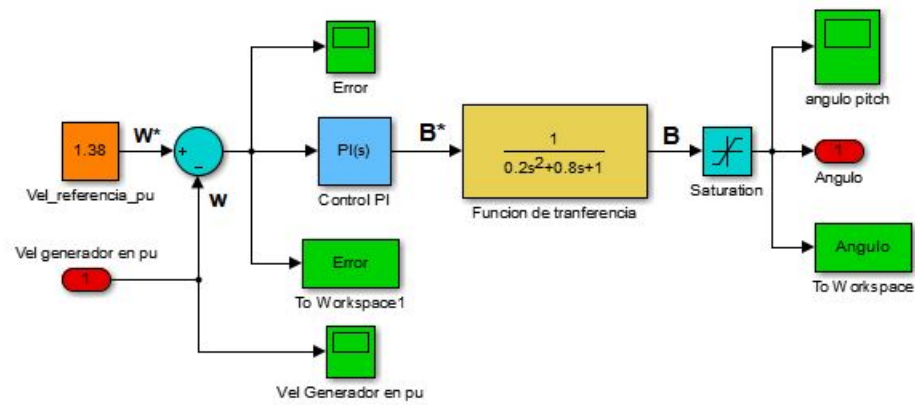


Figura 4-8: Modelo del control PI clásico en MatLab/Simulink

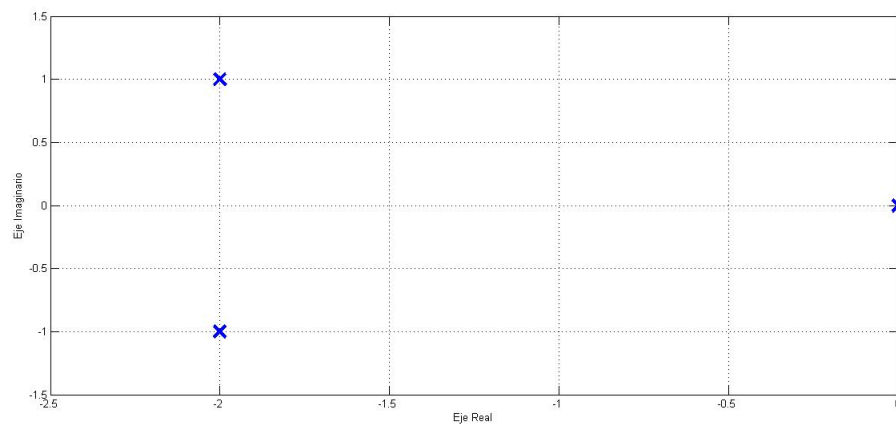


Figura 4-9: Ubicación de polos con el control Proporcional-Integral

Capítulo 5

Analisis y resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas para examinar la estabilidad del sistema de generación eólica, la respuesta del control a las perturbaciones del viento aplicado a la turbina eólica y la comparación respecto al control PI clásico y al sistema en lazo abierto.

En la Figura 5-1, se muestra la simulación realizada sin control o en lazo abierto del sistema de generación eólica, con un ángulo de incidencia de las palas de 0° grados, el cual es el ángulo óptimo y en el cual se logra captar la mayor potencia presente en el viento para el aerogenerador, según el coeficiente de potencia 2-3 presente en el capítulo 2.

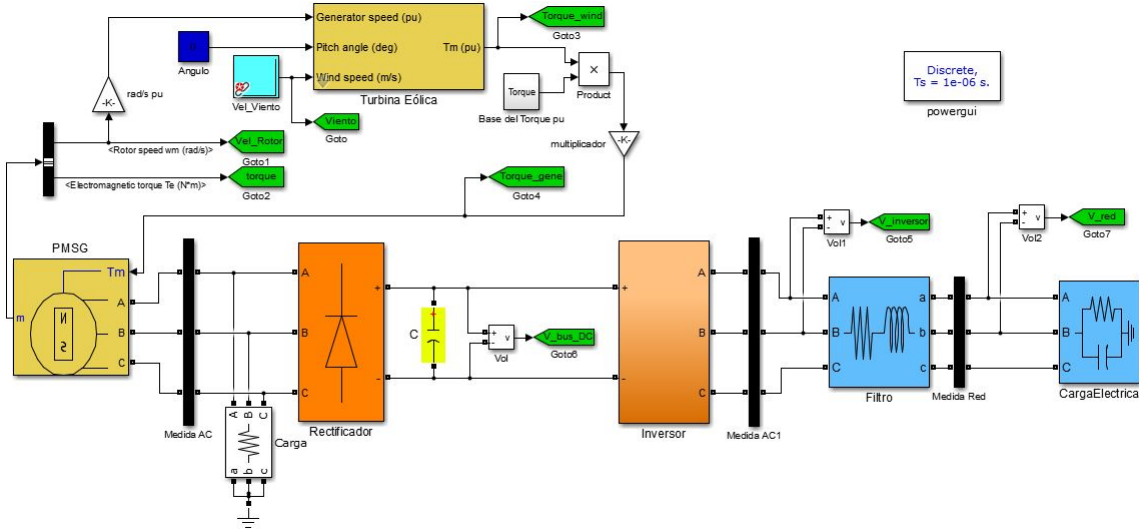


Figura 5-1: Simulación del sistema de generación eólica en lazo abierto [Autor]

En la Figura 5-2, se muestra la simulación del sistema de generación con control, en la cual se da la integración de un actuador hidráulico, el cual se encarga de rotar las palas de la turbina eólica, al ángulo deseado, según las perturbaciones generadas por el cambio en la velocidad del viento, de esta manera regular la velocidad angular del aerogenerador y así regular la potencia eléctrica que se entrega a la carga.

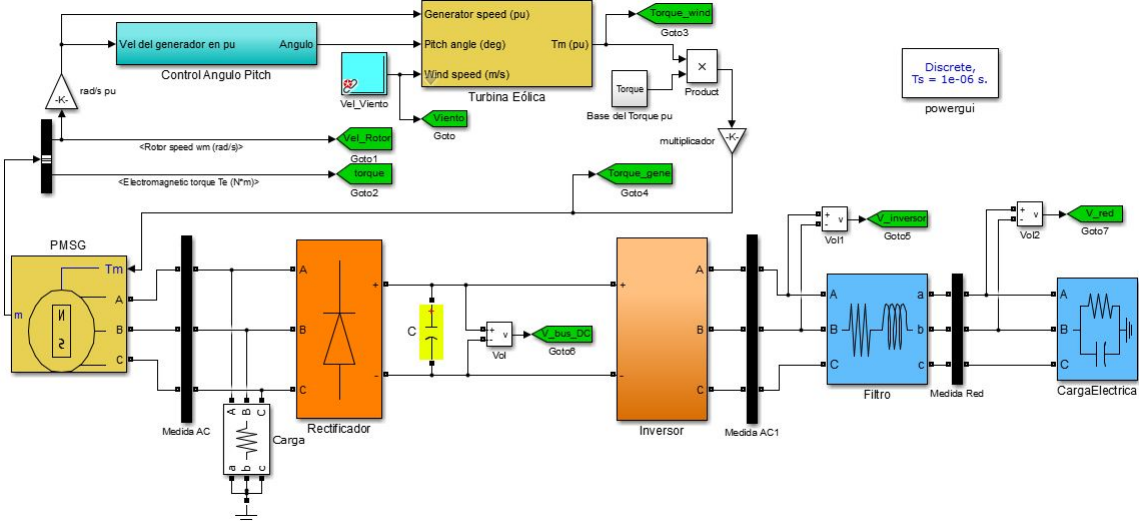


Figura 5-2: Simulación del sistema de generación eólica con control [Autor]

En la Figura 5-3, se muestra la comparación de la Potencia Eléctrica generada por el generador eólico, con los diferentes tipos de control y en lazo abierto, en el tiempo que se aplica una perturbación en el viento, cuando cambia de $12m/s$ a $14m/s$ en $t = 1s$. Puede observarse que la respuesta generada por el control LMI robusto, regula la potencia eléctrica de una forma suave en un corto periodo de tiempo, en comparación al control LMI el cual tiene un periodo de tiempo mas largo en estado transitorio y en comparación con el control P-I clásico el cual tiene una respuesta transitoria abrupta y un periodo en estado transitorio de mucho mas tiempo.

- Color Azul Claro representa la respuesta del Control P-I.
- Color Rojo representa la respuesta sin control o lazo abierto (referencia).
- Color Verde representa la respuesta del control LMI.
- Color Azul Oscuro representa la respuesta del control LMI robusto.

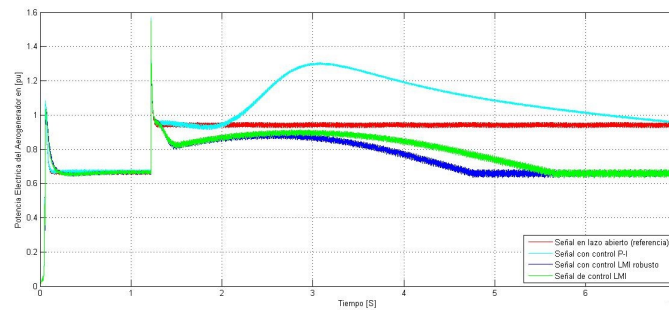


Figura 5-3: Comparación de la potencia eléctrica del aerogenerador eólico [Autor]

En la Figura 5-4, se muestra la comparación de la Velocidad Angular generada por el generador eólico, con los diferentes tipos de control y en lazo abierto, en el momento que se aplica una perturbación en el viento, cuando cambia de $12m/s$ a $14m/s$ en $t = 1s$. Puede observarse que la respuesta generada por el control LMI robusto, regula la velocidad angular de una forma suave en un corto periodo de tiempo, en comparación al control LMI el cual tiene un periodo de tiempo mas largo en estado transitorio y en comparación con el control

P-I clásico el cual tiene una respuesta transitoria abrupta y un periodo en estado transitorio de mucho mas tiempo.

- Color Azul Claro representa la respuesta del Control P-I.
- Color Rojo representa la respuesta sin control o lazo abierto (referencia).
- Color Verde representa la respuesta del control LMI.
- Color Azul Oscuro representa la respuesta del control LMI robusto.

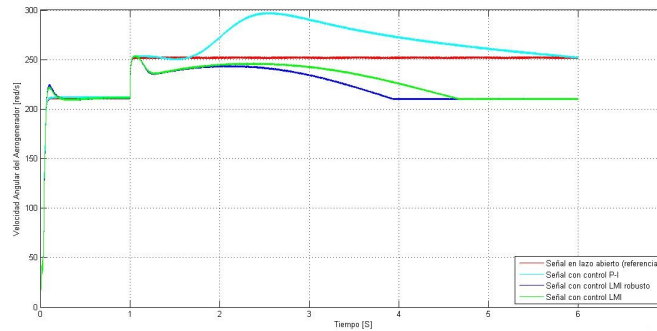


Figura 5-4: Comparación de la velocidad angular del aerogenerador eólico [Autor]

En la Figura 5-5, se muestra la comparación del Voltaje en el Condensador en la parte del back-to-back, con los diferentes tipos de control plateados y en lazo abierto, en el momento que se aplica una perturbación en el viento, cuando cambia de $12m/s$ a $14m/s$ en $t = 1s$. Puede observarse que la respuesta generada por el control LMI robusto, regula el voltaje en un corto periodo de tiempo, sin presentarse ninguna perturbación abrupta en el estado transitorio, en comparación al control LMI el cual tiene un periodo de tiempo mas largo en estado transitorio y en comparación con el control P-I clásico el cual tiene una respuesta transitoria abrupta y un periodo en estado transitorio de mucho mas tiempo.

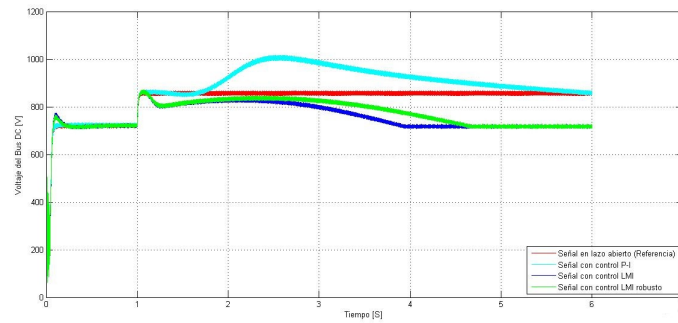


Figura 5-5: Comparación del voltaje en el Condensador [Autor]

En la Figura 5-6, se muestra la comparación del ángulo de las palas de la turbina eólica, con los diferentes tipos de control plateados y en lazo abierto, en el momento que se aplica una perturbación en el viento, cuando cambia de $12m/s$ a $14m/s$ en $t = 1s$. Puede observarse que la respuesta generada por el control LMI robusto, controla el ángulo de una forma eficiente y rápida sin hacer cambios abruptos en el ángulo con respecto al control P-I el cual aumenta el ángulo de forma rápida de 0° a 6° en menos de 6 segundos.

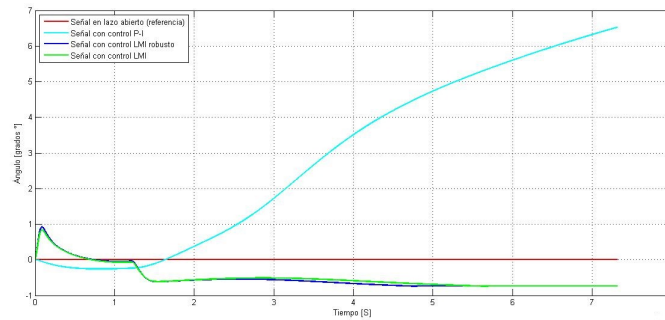


Figura 5-6: Comparación del ángulo de las palas de la turbina eólica [Autor]

En la Figura 5-7, se muestra la comparación entre la señal de control P-I versus la señal de control LMI-robusto, donde se evidencia que la señal de control LMI-robusto se mantiene estable ante la perturbación generada por el cambio en la velocidad del viento, mientras que la señal de control P-I le eleva repentinamente para lograr el control requerido.

- Color Azul Oscuro representa la señal de Control LMI robusto.

- Color Rojo representa la señal de control P-I.

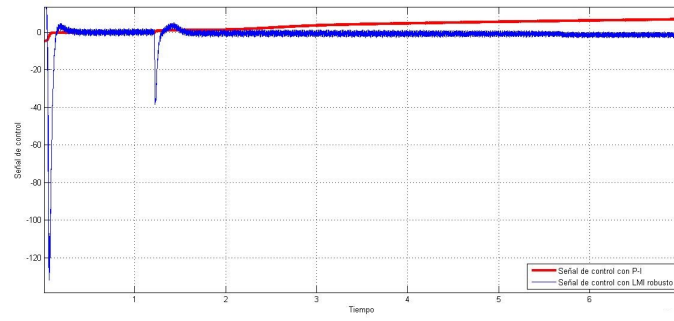


Figura 5-7: Comparación de la señal de control P-I vs señal de control LMI-robusto [Autor]

Capítulo 6

Conclusiones del proyecto y futuras investigaciones

En este último capítulo se presentan los principales resultados que se obtuvieron durante el desarrollo de este proyecto y el direccionamiento a futuras líneas de investigación y exploración.

6.1. Contribuciones del proyecto

En el proyecto se propuso la aplicación de un controlador robusto por realimentación de estados, basado en las desigualdades matriciales lineales y así obtener la mejora dinámica en la regulación de potencia de un aerogenerador eólico, variando de esta forma el ángulo de incidencia de las palas de la turbina eólica ante una perturbación en el viento. Dichas mejoras se observan en la gráfica 5-3 en la cual se realiza un comparativo de la respuesta en la regulación de potencia del control LMI planteado, un control clásico tipo P-I y el sistema en lazo abierto ante una perturbación en la velocidad del viento.

La técnica de control basada en la teoría de las LMI's muestra un gran avance y mejora con respecto a las técnicas de control clásica, la cual, además de optimizar, utiliza y se basa en varias restricciones o formulaciones que la teoría clásica no analiza.

Gracias al modelo en parámetros inciertos del actuador hidráulico, se logró construir un control robusto, óptimo a través de las desigualdades matriciales lineales, el cual mejora en

gran medida y en tiempo la regulación de potencia del aerogenerador eólico y la respuesta del ángulo de las palas de la turbina eólica, al cambio en la velocidad del viento. Dichas mejoras se observan en la gráfica 5-6 en la cual se realizó una comparación gráfica de la respuesta del ángulo de las palas ante la perturbación en la velocidad del viento, obteniendo que el control LMI-robusto no realiza un cambio abrupto del ángulo de las palas en el transcurso del tiempo.

En general el método y técnica de control basado en LMI se aplicó de forma exitosa al modelo de parámetros inciertos del actuador hidráulico, logrando la mejora dinámica esperada y obteniendo una respuesta rápida y robusta en la regulación de potencia entregada a la carga eléctrica, cuando se le aplica una perturbación en el cambio de la velocidad del viento, en comparación con el control PI a través de la técnica clásica, el cual obtuvo una respuesta lenta y poco atractiva, con el mismo tipo de perturbación generado en cambio de la velocidad del viento.

Por último se observó la respuesta del sistema, cuando no se le aplicó ningún tipo de control, obteniendo un sistema en lazo abierto, el cual no regulaba la potencia en interacción a una perturbación en el cambio de la velocidad del viento aplicado a sobre las palas de la turbina eólica.

6.2. Futuras líneas de investigación

Actualmente la técnica basada en las desigualdades matriciales lineales presenta alternativas fiables, factibles y potentes para el cumplimiento de requerimientos dinámicos en las energías renovables, especialmente en la generación eólica y en la regulación de potencia.

Es por esto que se propone como futuras líneas de investigación:

- La aplicación de controles robustos a través de la técnica basada en las desigualdades matriciales lineales para la regulación de potencia en el convertidor Back-to-Back y en otras topologías de regulación de los aerogeneradores eólicos.
- Realizar la implementación y montaje del control robusto LMI planteado en este proyecto para la regulación de potencia en aerogeneradores eólicos y realizar las pruebas

experimentales para observar y analizar el comportamiento del control robusto a diferentes perturbaciones en el viento aplicado a las palas de la turbina eólica.

- Aplicar otras técnicas avanzadas de control robusto para ser aplicadas en la regulación de potencia en los componentes que conforman un aerogeneradores eólicos y en las fuentes de energías renovables y de esta manera aprovechar su máxima potencia.

Bibliografía

- [1] D. Dickson, *Tecnología Alternativa y Políticas del Cambio Tecnológico*, H. Blume Ediciones, Madrid, 1978.
- [2] A. Tahari, S. Hassaine y S. Moreau, *A Robust Control for Permanent Magnet Synchronous Generator Associated with Variable Speed Wind Turbine*, IEEE, 2013.
- [3] A. M. G. L, *ESTADO DEL ARTE DEL CONTROL DE LA POTENCIA EN GENERADORES EÓLICOS*, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2008.
- [4] R. Moragues J, *ENERGIA EÓLICA*, Instituto Argentino de la Energía "General Mosconi", Buenos Aires, 2003.
- [5] M. Macías Parra y J. Andrade, *Estudio de Generación Eléctrica bajo escenario de cambio climático*, Unidad de Planeación Minero Energética, Diciembre 2015.
- [6] W. Leith, *APPLICATION OF NONLINEAR CONTROL TO A HAWT*, IEEE, 1994.
- [7] M. G. Simoes y B. K. Bose, *Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed*, IEEE, 1997.
- [8] M. Prats, *A new fuzzy logic controller to improve the captured wind energy in a real 800 kw variable speed-variable pitch wind turbine*, IEEE, June, 2002.
- [9] L. Filho, *A multivariable hinf control for wind energy conversion system*, IEEE, June, 2003.
- [10] H. Siguerdidjane, *Nonlinear control of variable speed wind turbines without wind speed measurement*, IEEE, 2005.

- [11] F. Bianchi, *Gain scheduling control of variable-speed wind energy conversion systems using quasi-lpv models*, IEEE, 2005.
- [12] Q. Guo, *Hinf control of adjustablepitch wind turbine adjustable-pitch system*, IEEE, 2006.
- [13] Y. J Yang, *Fuzzy adaptive control of novel brushless doubly-fed wind turbine*, IEEE, 2006.
- [14] R. Sakamoto y T. Senjyu, *Output power leveling of wind turbine generator by pitch angle control using hinf control*, IEEE, 2006.
- [15] C. Torres, *Control Robusto de Convertidores conmutados de CC/CC mediante Desigualdades Matriciales Lineales*, UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI, Tarragona 2012.
- [16] N. Jenkins and J. F. Walker, *Energy Engineering: Wind Energy Technology*, UNESCO, June 12, 1997.
- [17] *Energía Eólica - Tipos de Turbinas de Viento*, [En línea] <http://www.gstriatum.com/energiasolar/blog/2015/01/08/energia-eolica-tipos-de-turbinas-de-viento/>, 2015.
- [18] *COMPONENTES DE UN AEROGENERADOR*, [En línea] <http://energiadoblezero.com/energias-renovables/energia-eolica/componentes-de-un-aerogenerador>.
- [19] M. Stiebler, *Wind Energy Systems for Electric Power Generation*, Green Energy and Technology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] L. Diego Felipe, *Regulación de potencia de un aerogenerador de eje horizontal a partir de un sistema de control de velocidad de rotación*, Universidad de la Salle, Bogotá, 2014.
- [21] H. Siegfried, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley y Sons Ltd, ISBN 0-471-97143-X, 1998.

- [22] M. Yin, G. Li, M. Zhou, C. Zhao, *Modeling of the Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator for Integration*, Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE.
- [23] Pedro Fernández Díez, *II. Fundamentos Aerodinámicos De Las Máquinas Eólicas*, Servicio Publicaciones E.T.S.I. Industriales y T, Santander (España) 1993.
- [24] Asea Brown Boveri (ABB), *Cuaderno de aplicaciones técnicas N° 12. Plantas eólicas*, Copyright 2012 ABB. Todos los derechos reservados.
- [25] Castillo Carranza Oscar, *Estudio de técnicas de control de rectificadores Boost Trifásicos con filtro LCL para reducción de la distorsión armónica en corriente, aplicadas al procesado eficiente de energía en aerogeneradores síncronos de imanes permanentes operando a velocidad variable*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería electrónica, 2013.
- [26] José Luis Piero Loli Méndez), *Modelación y Simulación de un Actuador Hidráulico para un Simulador de marcha normal*, Pontificia Universidad Católica del Peru, 2012.
- [27] O. Amaya, U. Cooz & M. Duran, *Modelado del viento para simulaciones Computarizadas de Sistemas de Potencia*, 2007.
- [28] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), *Atlas Interactivo IDEAM*, [En línea] <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>, 2016
- [29] Obeki brake motors, *Generador de Imanes Permanentes*, 2014.
- [30] Biblioteca de ingeniería, *3.Sistemas de referencia*, Universidad de Sevilla, 2010.
- [31] Danna L. Albarracin, *Control de sistemas multivariables aplicado a un generador eólica conectado a un sistema de potencia*, Universidad Tecnología de Pereira, Ingeniería Eléctrica 2013.
- [32] G. Gómez, D Juan, C. Quintero, B. Juan y M. Galeano, *Análisis de Flujos de Potencias Ineficientes Producidos por Convertidores de Potencia*. Inf. tecnol., 25(3), 93-102, 2014.

- [33] L. Armando Paredes, *Modelación y simulación de un sistema de generación diésel de velocidad variable* Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile, 2009.
- [34] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, New Jersey, Prentice-Hall, 1998.
- [35] P. Gahinet, A. Nemirovski, A.J. Laub, and M. Chilali, *LMI Control Toolbox for use with Matlab*, Natick: MathWorks, Inc., 1995.
- [36] S. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron, and V. Balakrishnan, *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory*, ser. *Studies in Applied and Numerical Mathematics*, Philadelphia, PA:SIAM, 1994.
- [37] A.I. Lur'e and V. N. Postnikov, *On the theory of stability of control systems*, *Applied mathematics and mechanics*, vol. 8, no. 3, In Russian, 1944.
- [38] V.A. Yakubovich, *The solution of certain matrix inequalities in automatic control theor*, vol. 3, pp. 620-623, 1962.
- [39] V.M. Popov, *Absolute stability of nonlinear systems of automatic control*, *Automation and Remote Control*, vol. 22, pp. 857-875, 1962.
- [40] R.E. Kalman, *Lyapunov functions for the problem of Lur'e in automatic control*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol. 49, no. 2, pp. 201-205, 1963.
- [41] E.S. Pyatnitskii and V.I. Skorodinskii, *Numerical method of construction of Lyapunov functions and absolute stability criteria in the form of numerical procedures*, *Automation and Remote Control*, vol. 4, no. 11, pp 1427-1437, 1983.
- [42] N. Karmarkar, *A new polynomial time algorithm for linear programming*, *Combinatorica*, vol. 4, no. 4, pp. 373-395, 1984.
- [43] Y. Nesterov and A. Nemirovsky, *A general approach to polynomial-time algorithms design for convex programming. Technical Report, Centr. Econ. y Math. Inst*, USSR Acad. Sci., Moscow, USSR, 1988.

- [44] M. Junca Pelaez, V. H. Grisales Palacio y A. Gauthier Sellier, *Introducción a las Desigualdades Lineales Matriciales y su aplicación en control automático*, IEEE, Bogotá, 2005