



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Alfredo Eduardo Martínez Guerrero

Control en modo deslizante de convertidor boost para su aplicación como MPPT en un sistema autónomo de generación eólica

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería

Valparaíso, 27 de febrero de 2018



Control en modo deslizante de convertidor Boost para su aplicación como MPPT en un sistema autónomo de generación eólica.

Alfredo Eduardo Martínez Guerrero

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Facultad de Ingeniería de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Miguel López González
Profesor Guía

Sr. Werner Jara Montecinos
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 28 de marzo de 2018

“All that we learn this time is carried beyond this life”

Dream Theater

Dedicado a todas las personas que me motivan a ser mejor cada día.

Agradecimientos

El final de una hermosa etapa llena de desafíos, aprendizajes y crecimiento tanto personal como intelectual. Una etapa que puedo cerrar teniendo la satisfacción de haber entregado lo mejor de mí en algo que me apasiona.

En primer lugar quiero agradecer a mis padres Ana María Guerrero Ahumada y Luis Esteban Martínez Loreto, quienes son mi modelo a seguir. Agradecer también su apoyo de forma incondicional y su activa participación durante toda mi formación. A mi hermano Esteban Alonso Martínez Guerrero por ser mi cómplice de locuras y ser una de mis principales motivaciones para ser mejor cada día.

A mi polola Natalie Andrea Vercoutere Monsalve. Su ayuda, sus consejos y el solo hecho de estar a mi lado en los buenos y malos momentos en gran parte de esta etapa estudiantil y durante todo el proceso de titulación la hacen una persona incondicional.

A mis abuelos maternos Ana y Rolando, mis abuelos paternos Gloria y Luis, mi familia de Santiago, mi familia de Arica, les agradezco por creer en mí, motivarme y siempre recibirme con los brazos abiertos y una gran sonrisa sin importar el momento en que aparezca.

A mis amigos de la infancia, mis amigos del colegio, mis amigos de la universidad, mis amigos de Valparaíso y a todas las personas que hayan quedado fuera de esta lista me encuentro infinitamente agradecido por ser parte de mi vida.

Finalmente quiero agradecer a mi profesor guía Miguel López González por encaminarme constantemente durante la investigación, por todo el conocimiento compartido y consejos brindados. A mi profesor correferente Werner Jara Montecinos por su excelente disposición a la hora de consultas y colaboración. Además agradecer a todos los profesores que he tenido a lo largo de mi vida ya que sin su ayuda no sería quien soy ahora.

¡Muchas gracias a todos y que viva el Rock n' Roll!

Valparaíso, 28 de marzo de 2018

Alfredo Eduardo Martínez Guerrero

Resumen

Vivimos en un mundo donde las reservas de combustibles fósiles además de estar agotándose, contaminan nuestro planeta con las emanaciones de gases tóxicos. Es por eso que la investigación y desarrollo de las energías renovables no convencionales es una de las principales tareas hoy en día, así la energía eólica es particularmente una de las ramas que ha recibido mayor atención en los últimos años.

Este trabajo de investigación se centra en un sistema autónomo de generación eólica de baja potencia (5 kW nominales), en donde el principal objetivo es encontrar la forma de extraer la mayor cantidad de energía de las corrientes de viento y poder suministrar toda la energía que pueda demandar la carga asociada a ella. La estrategia para enfrentar esta problemática es diseñar un controlador que opere en modo deslizante aplicado como un algoritmo seguidor del máximo punto de transferencia de potencia.

Antes de poder diseñar el controlador y el algoritmo, se realiza un estudio con todos los cálculos relacionados para realizar un correcto dimensionamiento de los elementos que componen esta red. En una primera instancia se dimensiona el sistema de captación y generación de la red, compuesto por la turbina eólica y el generador eléctrico a utilizar. Luego en la etapa de conversión de energía conformada por una etapa rectificadora y el convertidor boost se muestran todos los cálculos y criterios utilizados para el dimensionamiento de los componentes. En la etapa correspondiente a la carga final además hay un sistema de almacenamiento de energía que servirá de respaldo cuando la red no sea capaz de suministrar la energía suficiente.

Finalmente luego de que todos los elementos de la red sean dimensionados junto con el control asociado al convertidor boost, se realizan las simulaciones y análisis de resultados correspondientes utilizando un modelo de vientos basado en un área geográfica de la zona austral de nuestro país.

Palabras claves: Energías Renovables No Convencionales, Energía Eólica, Control en Modo Deslizante, Sistemas no lineales, Convertidor boost, Generador de imanes permanentes, Algoritmos MPPT.

Abstract

We live in a world where the fossil fuels reservations besides being running out, are polluting our planet with toxic gas emissions. Consequently, research and development of non-conventional renewable energies are the main tasks to be faced today. That is why wind energy has received greater attention in recent years.

This research work focuses on a standalone low power wind energy conversion system (5 kW nominal power) where the main objective is to find the way to extract the highest amount of energy from wind currents and be able to supply all the energy demanded by the charge associated to it. The strategy to face this problem is to design a sliding mode controller applied as a maximum power point tracker algorithm.

Before designing the controller and the algorithm, it must be made a study which includes all the related calculations to make a right sizing of the elements of the grid. At this first stage, it must be sized the capturing and electric generation system of the grid which consists on the wind turbine and the electric generator to be used. Then, in the energy conversion stage made up of a rectifier and a boost converter, all the calculations of the components sizing are shown. In the final stage there is also an energy storage system connected to the load which will be used as a backup system when the grid is not able to supply enough energy.

Finally, after all the elements of the grid are sized along with the boost converter control, simulations and results analysis are made using a wind profile based on an austral zone in our country.

Key words: Non-Conventional Renewable Energy, Wind Energy, Sliding Mode Control, Nonlinear Systems, Boost Converter, Permanent Magnet Synchronous Generator, MPPT Algorithms.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivo general.....	3
1 Antecedentes generales y propuesta	4
1.1 Descripción del problema.....	4
1.2 Solución propuesta	5
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivos específicos.....	6
2 Marco Teórico	7
2.1 Energía Eólica y elementos de la red	7
2.1.1 Turbina Eólica.....	8
2.1.2 Generador de imanes permanentes	11
2.1.3 Rectificadores y convertidores electrónicos	12
2.1.4 Banco de baterías y carga	15
2.2 Control en modo deslizante.....	15
2.2.1 Modelo de convertidor Boost	15
2.2.2 Superficies deslizantes.....	17
2.2.3 Control en modo deslizante de convertidor Boost.....	19
2.2.4 Algoritmos MPPT.....	21
3 Desarrollo de investigación	23
3.1 Red a simular	23
3.1.1 Turbina eólica y generador de imanes permanentes.....	24
3.1.2 Convertidor Boost	25
3.1.3 Banco de baterías y carga	26
3.2 Perfil de vientos.....	29
3.2.1 Datos de vientos	29
3.3 Implementación de control en modo deslizante y algoritmo MPPT	32
3.3.1 Algoritmo propuesto	32
4 Simulaciones y resultados	36
4.1 Simulaciones a velocidad de viento fija	36

4.1.1 Comparación de potencias.....	36
4.1.2 Corrientes en inductor, carga y de referencia.....	38
4.1.3 Tensiones de convertidor y velocidad de rotor.....	39
4.2 Simulación con perfil de vientos	40
4.2.1 Comparación de potencias.....	41
4.2.2 Corrientes en inductor, carga y de referencia.....	42
4.2.3 Tensiones de convertidor y velocidad de rotor.....	45
4.3 Discusión de resultados	46
Conclusión.....	48
Bibliografía	50
A Datos de perfil de vientos	52
B Código Algoritmo	54

Introducción

El interés por las energías renovables ha crecido considerablemente en las últimas décadas y se hace indispensable para combatir el cambio climático, lograr el acceso universal a la electricidad en el largo plazo, y generar grandes beneficios tanto económicos como en la calidad de vida de las personas.

Dentro de las ventajas de las energías renovables encontramos que son más limpias, y por tanto, más respetuosas con el medio ambiente; contribuyen al autoabastecimiento y se basan en fuentes inagotables de recursos, al contrario de los sistemas convencionales; son capaces de impulsar la economía, la industria y generar nuevos empleos en los lugares en que son instaladas; son energías seguras y no generan residuos tóxicos, protegiendo la salud de las personas.

La energía eólica es aquella generada por el movimiento de las masas de aire y puede ser usada como energía mecánica o transformada a eléctrica. Para esta última, se requiere de turbinas que gracias a la acción del viento son capaces de producir electricidad cuando son acopladas a un generador.

Dentro de la categoría de energías renovables, se considera la energía eólica como una de las más eficientes, además de ser una de las más antiguas usadas por la humanidad. Ya fuera para bombear agua o transformar cereales en harina, los molinos de viento significaron un gran aporte a la vida de las personas. Y fue basándose en este mismo principio y funcionamiento que aparecieron los primeros aerogeneradores a finales del siglo XIX. Sin embargo, no fue hasta la década de los '70 que las fuentes de energías renovables fueron vistas como una alternativa viable en la generación de electricidad.

El gran interés por la energía eólica se vio contrastado por su alto costo de instalación, lo que dificultó la construcción masiva de plantas generadoras, pero la iniciativa tuvo grandes avances en investigación gracias a subvenciones y aportes de gobiernos internacionales. Fue gracias a este proceso de investigación que se logró estandarizar y reducir costos de instalación.

Debido a lo anterior el acceso a este tipo de tecnologías ya no está restringido a solo el sector industrial, esto sumado al interés de la población y campañas sobre concientización ambiental han aportado a la adquisición de sistemas autónomos de generación eólica de baja potencia para el uso doméstico.

Entre los distintos tipos de aerogeneradores de baja potencia, destacan los que son de velocidad variable en donde generalmente el generador eléctrico es de imanes permanentes debido a que presentan una buena durabilidad y requieren de poco mantenimiento. Además, tienen la característica de poseer autoexcitación lo que las deja en la categoría de máquinas eficientes.

Entre los principales objetivos de los sistemas eólicos recién mencionados se encuentra la eficiencia energética, es para esto que se están utilizando variadas técnicas entre las que destacan la implementación de un convertidor electrónico en la red.

Una de las particularidades de los convertidores electrónicos es que son sistemas inherentemente no lineales ya que su estructura varía por medio del accionamiento de interruptores, es decir, la naturaleza de estos convertidores electrónicos es discontinua. Es por esto que cuando se busca la eficiencia energética, el control asociado a estos dispositivos debe ser cuidadosamente diseñado tomando en cuenta la naturaleza no lineal del sistema a modelar.

Entre las opciones de control no lineal disponibles para los convertidores electrónicos, aparece el control en modo deslizante el cual se caracteriza por ser un control de respuesta rápida, y presenta una muy buena adaptabilidad, resultando un control robusto a las variaciones del sistema.

Una de las técnicas actuales para mejorar la eficiencia de estos sistemas de generación autónomos es la aplicación de un controlador que opera bajo un algoritmo seguidor del máximo punto de transferencia de potencia (MPPT), estos algoritmos reúnen un conjunto de acciones que tienen como fin extraer la mayor cantidad de energía posible de la red para las condiciones a las que está siendo sometida.

Otra de las características que poseen las redes autónomas de energías renovables es que cuentan con un sistema de almacenamiento de energía que actúa como respaldo frente al comportamiento intermitente del viento minimizando al máximo el impacto del cambio de condiciones del sistema, lo que permite aumentar los niveles de confiabilidad y disponibilidad de la red.

Rescatando las potencialidades de cada uno de los elementos disponibles que conforman el sistema:

- La alta eficiencia de los generadores de imanes permanentes
- La alta eficiencia de los convertidores electrónicos
- El control en modo deslizante junto con su rapidez y adaptabilidad
- La efectividad de los algoritmos MPPT
- La continuidad de servicio garantizada por el sistema de almacenamiento de energía

Y aplicar un controlador en modo deslizante como seguidor del punto de máxima transferencia de potencia aparece como una interesante propuesta para lograr el objetivo de una red energéticamente eficiente.

Hoy en día Chile se está posicionando como uno de los países líderes en Latinoamérica en el desarrollo de las energías renovables con un plan de transición que tiene como objetivo renovar la matriz de generación bajo el concepto de las energías limpias.

El cambio de mentalidad que está ocurriendo en el país ofrece nuevas posibilidades en el desarrollo de proyectos relacionados a esta área, lo que a mediano y largo plazo otorgará beneficios en todos los ámbitos, principalmente económicos, sociales y ecológicos.

Más allá de todos los beneficios que otorga el desarrollo de estas nuevas tecnologías a la población y a la economía de un país, fomentar la conciencia ambiental en personas vinculadas al área eléctrica aumentará el interés en este tipo de investigaciones, ya que este es el primer paso antes de poner en marcha nuevos proyectos sustentables.

Objetivo general

- Proponer y verificar una estrategia de control en modo deslizante de un convertidor Boost aplicado a un sistema de generación eólica.

1 Antecedentes generales y propuesta

Este capítulo tiene como fin presentar el principal desafío de este proyecto de investigación en forma detallada. Además se dará una descripción general de la solución propuesta junto con los objetivos generales y específicos relacionados a esta investigación.

1.1 Descripción del problema

Los sistemas autónomos de generación eólica convencionales están conformados, a grandes rasgos, por cuatro principales etapas, la primera de ellas es la encargada de captar la energía cinética del viento y transformarla en energía mecánica, en la siguiente etapa es transformada en energía eléctrica para luego llegar a la etapa de la conversión de la energía (alterna a continua, continua a alterna u otra combinación) y finalmente alcanzar la última etapa que corresponde a la carga final. [1]

El sistema que será sometido a estudios y simulaciones será de baja potencia y de aplicación doméstica, además será de velocidad variable, por lo que en la etapa de generación de energía utilizará un generador de imanes permanentes. En la etapa de conversión de energía utilizará un rectificador trifásico pasivo y un convertidor boost (elevador de tensión), en la etapa final del sistema se encuentra un banco de baterías conectado a una carga resistiva.

Como ya es sabido, a lo largo del día se van a presentar distintas velocidades de viento, por lo tanto también existirán distintos puntos de operación para el sistema. Ya que el sistema a estudiar será de velocidad variable, para una misma velocidad de viento también existe una velocidad de rotor específica en donde se genere más energía que en otra. La velocidad que tendrá el rotor del generador de imanes permanentes también depende de la tensión de entrada que posee la etapa de conversión de energía que es a la que se encuentra directamente conectada.

Precisamente en la etapa de la conversión de energía es en donde se encuentra el principal desafío de este proyecto de investigación, encontrar la forma de hacer un sistema mucho más eficiente. Debido a que en la etapa de conversión los principales elementos son dispositivos de electrónica de potencia, la oportunidad de lograr un sistema más eficiente se encuentra en la forma de controlar estos dispositivos para que puedan encontrar la velocidad de rotor ideal a cada velocidad de viento que se presente.

1.2 Solución propuesta

La solución propuesta para el problema es aplicar un control en modo deslizante funcionando bajo un algoritmo de seguidor del punto de máxima transferencia de potencia (MPPT) en el convertidor boost de la etapa de conversión de energía.

En la Figura 1-1 se muestra el diagrama de bloques que muestra el sistema en su forma general.

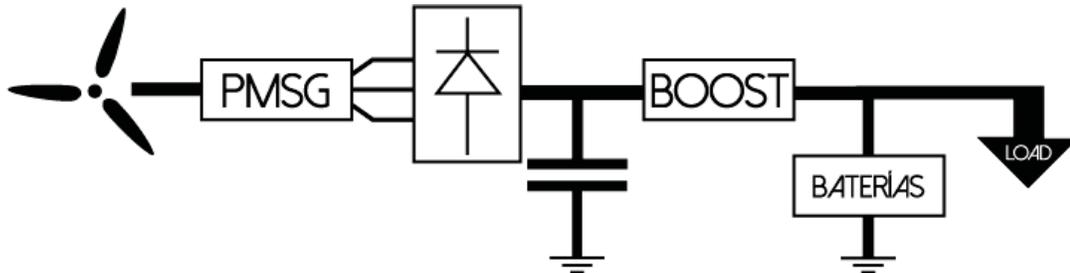


Figura 1-1: Diagrama de bloque de sistema propuesto

Este control aplicado como MPPT busca establecer la trayectoria de la máxima potencia del sistema definida por los distintos puntos de operación del aerogenerador tal como se muestra en la línea punteada de la Figura 1-2, por lo tanto, el controlador irá variando la velocidad del rotor hasta encontrar el ideal para la velocidad de viento que se presenta.

Ya que a la salida de la etapa de conversión de energía estará conectado un banco de baterías, la tensión de salida del convertidor boost no será posible variarla, es por eso que la corriente del inductor que se encuentra en la entrada del convertidor boost será la entrada del controlador, que operará directamente sobre el switch del convertidor boost determinando su estado y así poder variar la tensión de entrada.

La finalidad de este esquema propuesto es establecer un control adaptativo al convertidor que tenga como misión encontrar la corriente de entrada del convertidor en la que la máxima potencia es transferida tratando de llevar la eficiencia del sistema lo más alto posible.

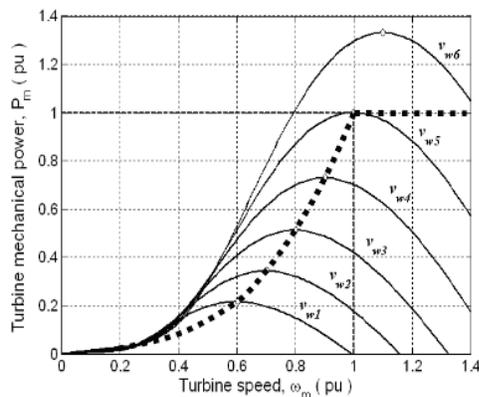


Figura 1-2: Trayectoria de máxima potencia del sistema. (Fuente: [2])

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo de investigación es lograr diseñar e implementar un control en modo deslizante de un convertidor Boost que sea aplicado como un seguir del punto de máxima transferencia de potencia en un sistema autónomo de generación eólica.

1.3.1 Objetivos específicos

En una primera instancia, y a lo largo del trabajo de investigación, uno de los objetivos específicos es la revisión de la bibliografía asociada a los temas de Energía Eólica, Control en Modo Deslizante y finalmente la aplicación de algoritmos MPPT (seguidores del punto de máxima transferencia de potencia) en sistemas de conversión de energía eólica.

A partir de lo anterior se desprenden los dos siguientes objetivos específicos, en primer lugar se debe proponer una estrategia de control en modo deslizante aplicada en el convertidor Boost de la red propuesta y luego proponer o verificar un algoritmo MPPT para que pueda ser aplicado a la estrategia de control diseñada.

Finalmente lo anterior debe ser verificado mediante la simulación computacional en el software Matlab Simulink en donde se tendrán en consideración los aspectos variables tanto de la fuente de energía y de la carga del sistema.

2 Marco Teórico

En este capítulo se describe con mayor detalle cada uno de los ejes en los que se basa este proyecto de investigación. En una primera instancia se hablará de la energía eólica y los principales elementos involucrados en una red que tiene como misión transformar la energía cinética del viento en energía eléctrica, en donde también están involucrados los convertidores de energía utilizados para obtener el tipo de señal deseada y bancos de almacenamiento de energía. Luego se hablará del modelamiento de sistemas no lineales y el control en modo deslizante, en donde se definirán las superficies deslizantes y su aplicación en convertidores boost. Para finalizar el capítulo se muestran los algoritmos seguidores del máximo punto de transferencia de potencia, las aplicaciones y clasificaciones de éstos aplicados en la energía eólica.

2.1 Energía Eólica y elementos de la red

En los últimos años, las fuentes energía renovable no convencionales (ERNC) han llamado mucho la atención debido al incremento en el costo, reservas limitadas y el negativo impacto ambiental que poseen los combustibles fósiles. Los avances tecnológicos, la reducción de costos y las iniciativas gubernamentales han hecho a las ERNC mucho más competitivas en el mercado. Dentro de las ERNC, la energía eólica es una de las que ha tenido más rápido crecimiento. [1]

Este tipo de energía es obtenida a partir de la energía cinética de las corrientes de aire, es una fuente limpia e inagotable que ha tenido distintos usos a lo largo de la historia y actualmente se utiliza para la generación de electricidad mediante los aerogeneradores.

Los esfuerzos realizados hoy en día para incrementar la eficiencia de la extracción de energía eólica de forma eficiente tanto en los aspectos técnicos como económicos no son menores, ya que se requiere tener en cuenta el carácter aleatorio del viento. Debido a lo anterior, para poder instalar una red de generación eólica, independiente de su capacidad de generación, se debe escoger cuidadosamente los elementos mecánicos y eléctricos que conformarán esta red ya que la potencia que finalmente será capaz de generar va a depender directamente del dimensionamiento de ellos.

Otra rama que es absolutamente necesaria para la instalación de aerogeneradores es la encargada de evaluar el recurso eólico en la zona, en donde se hace necesario realizar análisis de indicadores topográficos, geomorfológicos, e incluso sociales y culturales. Además se desarrollan modelos de

predicción del comportamiento del viento que permiten optimizar planes de la producción energética. [3]

2.1.1 Turbina Eólica

Los elementos principales del aerogenerador son las turbinas eólicas, que son las encargadas de captar la energía cinética del viento para luego transformarla en energía mecánica con una serie de mecanismos asociados a ellas, y el generador eléctrico que es el encargado de transformar la energía mecánica en energía eléctrica.

Existen distintas clasificaciones de turbinas eólicas, entre ellas se encuentran las turbinas de eje horizontal (HAWT) o vertical (VAWT), de velocidad fija o variable, la cantidad de palas que posee, entre otras.

Con respecto a este proyecto de investigación, se ha escogido trabajar con turbinas de eje horizontal y de velocidad variable ya que poseen muchas ventajas en relación a las de velocidad fija tales como la capacidad de capturar mayores corrientes de aire debido a que está montada sobre una torre, la capacidad de operación en el máximo punto de potencia, mayor eficiencia, entre otros. [1] [4]

La potencia de una corriente de aire a una velocidad v_w a través de un área A está dada por:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 \quad (2-1)$$

En donde ρ es la densidad del viento en kg/m^3 , A es el área de barrido en m^2 y la velocidad v_w en m/s .

Sin embargo, la potencia que pueden captar las palas de la turbina eólica está dada por:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A v_w^3 C_p \quad (2-2)$$

En donde C_p es el coeficiente de potencia, que teóricamente tiene un valor máximo de 0,59 de acuerdo con el límite de Betz, por lo tanto todas las turbinas eólicas operan bajo ese límite.

Su valor se obtiene a partir de la potencia total disponible y la potencia que es aprovechada.

$$C_p = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Este coeficiente varía para los distintos tipos de turbinas, en la Figura 2-1 se muestran las curvas de potencia para distintos tipos de aerogeneradores.

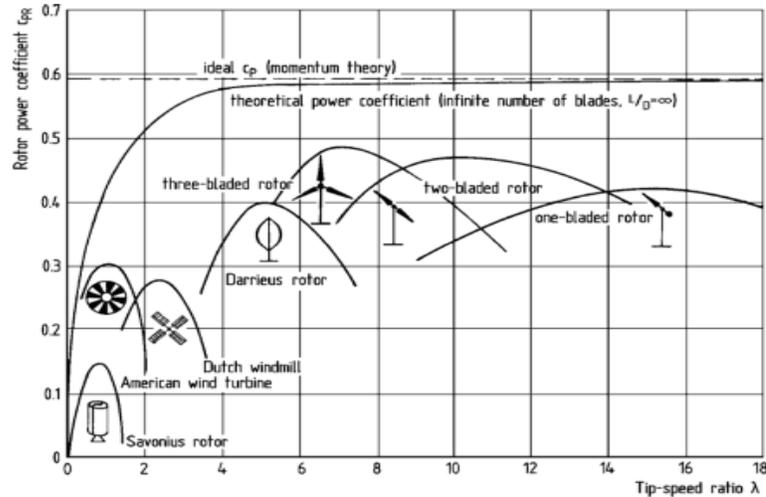


Figura 2-1: Coeficientes de potencia para turbinas eólicas (Fuente: <https://zestedesavoir.com>)

Un importante aspecto en el dimensionamiento de las turbinas eólicas es la relación de velocidad de punta de pala (Tip Speed Ratio en inglés) ya que está directamente relacionado con el coeficiente de potencia y, por lo tanto, la potencia que es capaz de aprovechar la turbina. Si el rotor de la turbina gira muy lento, gran cantidad de aire de la corriente no se verá perturbado y se pierde mucha energía que podría ser aprovechada. Por otra parte si el rotor de la turbina gira muy rápido, el viento verá la turbina como un disco sólido y no habrá masa de aire que pase a través de las palas, por lo que no habrá energía que extraer. [2]

La relación de velocidad de punta de pala se obtiene de la siguiente forma:

$$\lambda = \frac{\omega_r * R}{v_w} \quad (2-3)$$

En donde ω_r es la velocidad del rotor, R es el radio del rotor y v_w es la velocidad del viento. El máximo valor del coeficiente de potencia en los aerogeneradores se alcanza cuando el TSR es de 6,6.

Otra característica que presentan ciertos tipos de turbinas eólicas es la capacidad de variar el ángulo de incidencia del viento hacia las palas para así encontrar el ángulo óptimo de captación del viento, y además presta una protección extra frente a fuertes corrientes de aire. Esta característica puede presentarse como un control activo en donde se requiere ir midiendo constantemente las características ambientales y ajustando el ángulo, otra forma de aplicar esta característica es de manera pasiva, en donde mecánicamente el ángulo varía cuando la corriente de aire alcanza cierta velocidad.

En la Figura 2-2 se muestra el funcionamiento de la característica de paso variable que poseen ciertas palas.

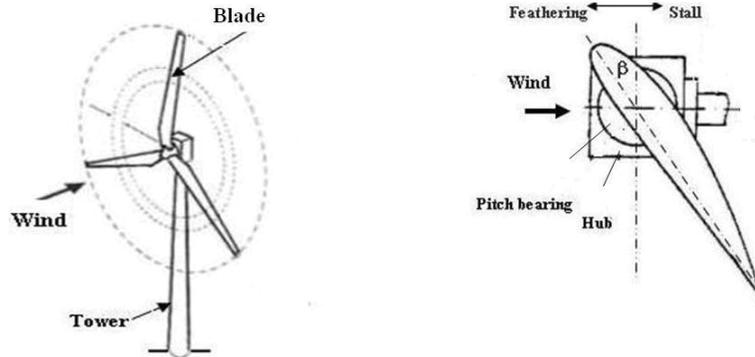


Figura 2-2: Turbina con ángulo de paso variable. (Fuente: <https://www.intechopen.com>)

De esta forma el coeficiente de potencia varía dependiendo del ángulo de paso de las palas respecto del viento, por lo tanto $C_p(\lambda, \beta)$ es el coeficiente de potencia que está en función de la velocidad de las palas con respecto al viento λ y del ángulo de paso de las palas de la turbina β , ρ la densidad del aire en kg/m^3 , A el área de barrido de la turbina en m^2 y la velocidad del viento v_w en m/s . El comportamiento de $C_p(\lambda, \beta)$ para distintos ángulos β se muestran en la Figura (2-3).

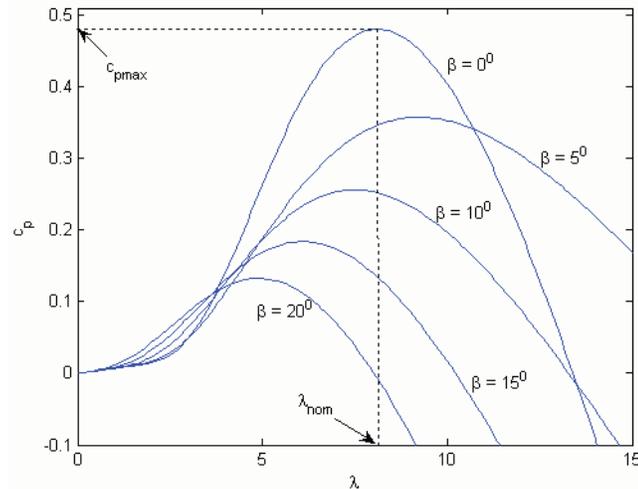


Figura 2-3: Coeficientes de potencia para distintos ángulos de paso. (Fuente: [5])

La turbina está acoplada a un sistema de transmisión mecánico directamente conectado al generador eléctrico por lo que aplica un torque mecánico sobre él dado por:

$$T_m = \frac{\rho A v_w^3 C_p(\lambda, \beta)}{2 \omega} \quad (2-4)$$

2.1.2 Generador de imanes permanentes

Para poder trabajar a velocidad variable, los generadores síncronos de imanes permanentes han recibido mucha atención en los sistemas de generación eólica autónomos ya que poseen autoexcitación, que permite operar a un mayor factor de potencia. La presencia de imanes permanentes en el rotor evita la aplicación de corriente de magnetización a través del estator, por lo que la corriente en el estator solo cumple la función de producir torque lo que tiene como consecuencia un mayor factor de potencia. Además se caracterizan por ser máquinas que no requieren mucha mantención mecánica (al menos en el formato de baja potencia). [6]

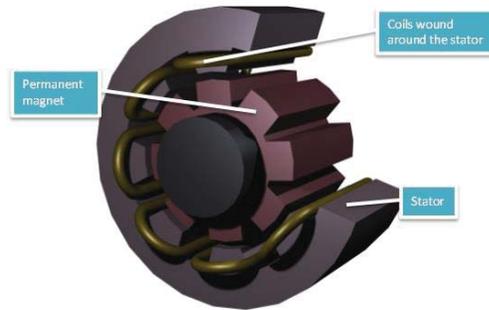


Figura 2-4: Generador de imanes permanentes. (Fuente: <https://www.comsol.com>)

En primer lugar se debe tener en cuenta la ecuación mecánica de la turbina y el generador, que está dada por la ley de Newton para el movimiento rotacional [7] [8]:

$$T_m = T_e + J \frac{d\omega}{dt} + F \omega \quad (2-5)$$

En donde T_m y T_e son el torque mecánico y torque eléctrico en Nm respectivamente, J es la inercia mecánica en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$, ω es la velocidad angular en rad/s y F es la constante de fricción del sistema $\text{kg} \cdot \text{m/s}$.

Llevando la ecuación anterior al dominio de Laplace, y con condiciones iniciales iguales a cero:

$$\omega(s) = \frac{T_m(s) - T_e(s)}{J s + F} \quad (2-6)$$

El modelo dinámico del generador de imanes permanentes es expresado por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} i_d &= \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega i_q \\ \frac{d}{dt} i_q &= \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega i_d - \frac{\lambda p \omega}{L_q} \\ T_e &= 1.5 p [\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \end{aligned} \quad (2-7)$$

En donde los subíndices d y q se refieren a los ejes directos y de cuadratura, v es la tensión, i la corriente, R es la resistencia en el estator, L la inductancia en los ejes, p los pares de polos, λ es la amplitud del flujo inducido por los imanes permanentes del rotor en las fases del estator y T_e el torque electromagnético.

2.1.3 Rectificadores y convertidores electrónicos

En esta etapa de la red se hace necesaria la utilización de un rectificador de onda completa conectado a la salida del generador para así poder tener la onda de tensión continua que será conectada a la entrada del convertidor Boost. El rectificador utilizado está conformado únicamente por diodos por lo que será del tipo no controlado.

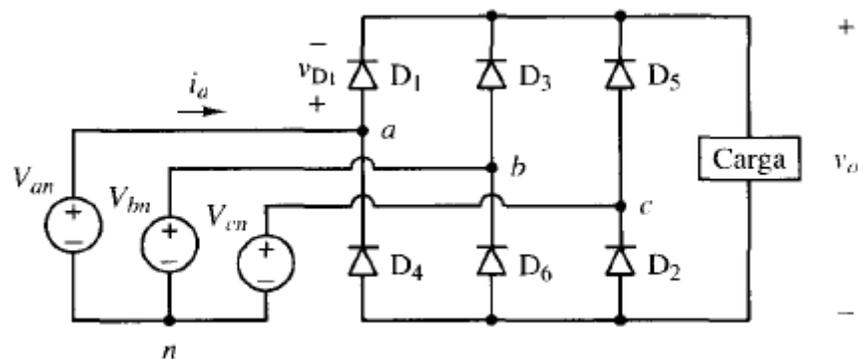


Figura 2-5: Rectificador no controlado. (Fuente: [9])

Este tipo de rectificadores posee menor contenido de ondulaciones y mayor capacidad de manejo de potencia. Haciendo el análisis de la ley de Kirchoff para las tensiones, solo uno de los diodos puede conducir en la parte superior del puente (D_1 , D_3 o D_5) que será el que esté conectado a la tensión de fase de mayor valor en ese instante, del mismo modo en la parte inferior del puente se repite lo mismo, es decir, sólo un diodo es capaz de conducir a la vez (D_2 , D_4 o D_6) y será el que esté conectado a la tensión de fase de menor valor.

Este rectificador también se denomina “rectificador de seis pulsos” ya que existen seis combinaciones de tensiones línea a línea en donde si consideramos un ciclo de 360° , la transición de tensión línea a línea de mayor valor deberá producirse cada 60° . La tensión de salida del rectificador en la carga conectada es la tensión línea a línea del generador conectado a él. [9] [10]

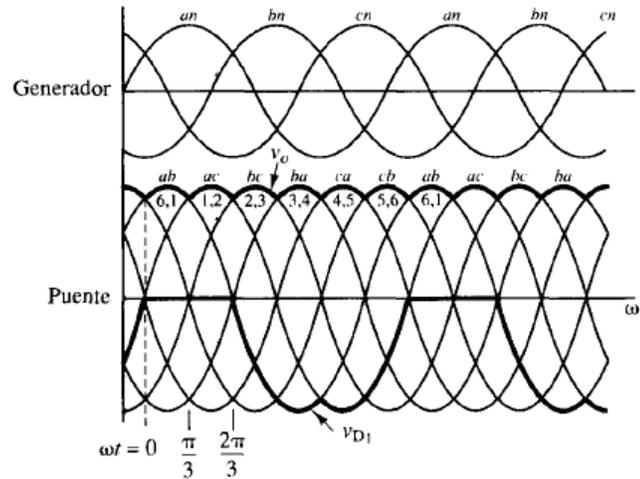


Figura 2-6: Tensiones de generador y de salida. (Fuente: [9])

El valor medio de la tensión y corriente de salida del rectificador trifásico de puente completo está dado por:

$$V_o = \frac{1}{\pi/3} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{2} V_{L-L} \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = \frac{3\sqrt{2} V_{L-L}}{\pi} = 1,35 V_{L-L}$$

$$I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2-8)$$

A continuación del rectificador está conectado convertidor controlado DC-DC tipo boost, y tal como su nombre lo dice, la principal característica de él es que la tensión de salida siempre es mayor que la tensión de entrada pero nunca menor que ella.

Se dice que un convertidor es controlado cuando los interruptores que lo constituyen pueden ser controlados en su encendido como es en el caso de los tiristores, o en su encendido y apagado como los transistores BJT, MOSFET e IGBT. [9]

El convertidor está formado por una fuente de voltaje de entrada V_i , un interruptor controlado S , un diodo D , un inductor L , un capacitor C , y una carga R .

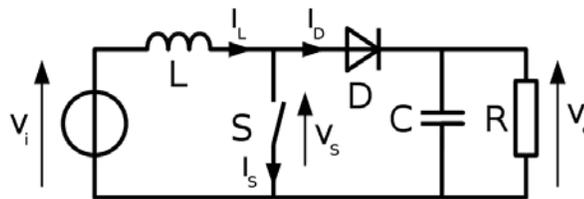


Figura 2-7: Convertidor Boost. (Fuente: <http://es.wikipedia.org>)

En estado permanente, cuando el interruptor se encuentra en estado On el inductor L almacena energía de la fuente V_i mientras que la carga R es alimentada por el capacitor C y cuando el

interruptor se encuentra en estado Off, se transfiere energía desde la bobina L y la fuente V_i hacia la carga R elevando la tensión de salida. En la Figura 2-8 se pueden ver las dos topologías asociadas al convertidor.

Este convertidor es inherentemente no lineal ya que su funcionamiento se basa en una discontinuidad formada por dos topologías distintas.

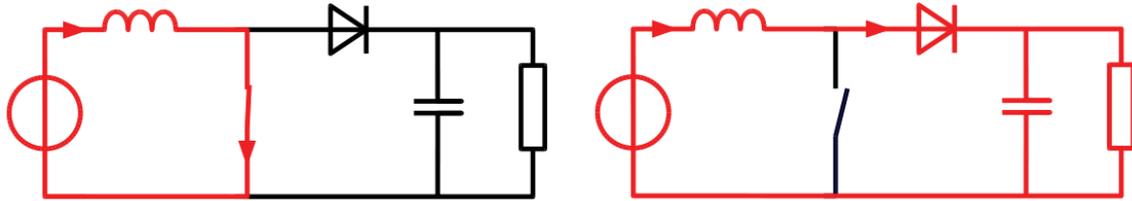


Figura 2-8: Estados de Switch. (Fuente: <http://es.wikipedia.org>)

Los convertidores DC/DC pueden tener dos modos de operación, el primero es la conducción de corriente continua (Figura 2-9 a) y el segundo es la conducción de corriente discontinua (Figura 2-8 b), que dependerá del dimensionamiento de cada componente.

Para las consideraciones de diseño, los valores mínimos que pueden tener la inductancia y capacitancia del convertidor boost están dados por las ecuaciones (2-9):

$$L_b = \frac{(1 - D)^2 DR}{2f}$$

$$C_{min} = \frac{DV_o}{V_r Rf} \quad (2-9)$$

En donde D es el ciclo de trabajo, f la frecuencia de conmutación, R la carga, V_r es el rizado de tensión y V_o es la tensión de salida deseada.

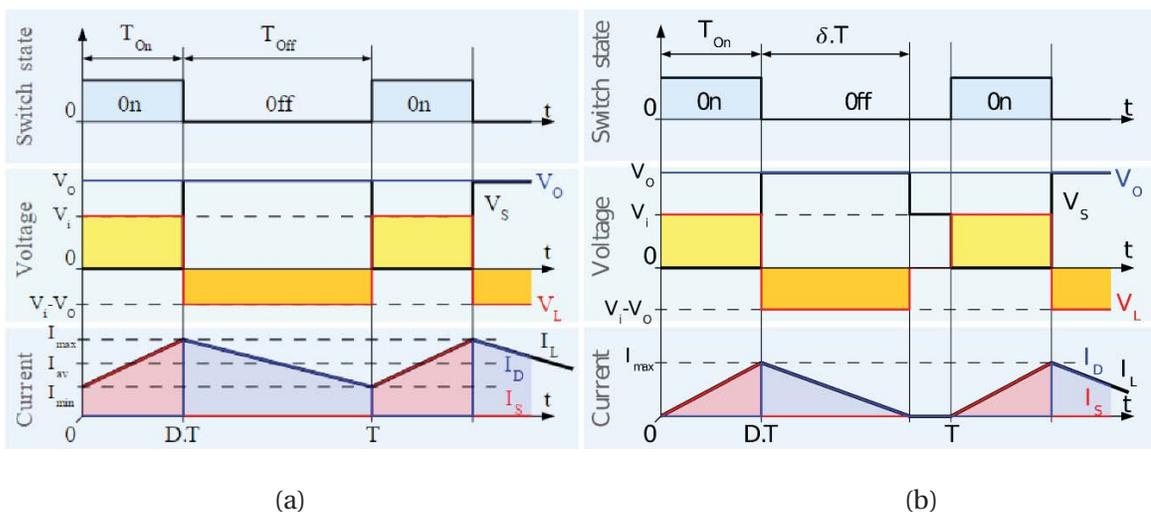


Figura 2-9: Modo de conducción continua (a) y discontinua (b). (Fuente: <http://es.wikipedia.org>)

2.1.4 Banco de baterías y carga

En la gran mayoría de las redes de generación autónomas se hace necesario un sistema de almacenamiento de energía que sirva de respaldo en caso de que la generación se vea interrumpida, en este caso debido al comportamiento aleatorio del viento. Es por eso que la implementación de un adecuado sistema de almacenamiento de energía es el mejor aliado que puede tener un sistema basado en energía renovable para suplir las interrupciones de suministro.

La carga corresponde al uso final que tendrá toda la energía generada, en este caso, al consumo de una carga ubicada en un punto en donde no existe (o es muy costosa) la conexión a la red, por lo tanto el enfoque que tendrán las simulaciones será lograr dimensionar un sistema de generación capaz de cubrir todas las necesidades energéticas que pudiese tener esta carga.

2.2 Control en modo deslizante

El control en modo deslizante es una técnica de control discontinuo retroalimentado. Es un tipo de control que es muy aplicado en sistemas de estructura variable controlados por interruptores, tales como los dispositivos de electrónica de potencia. La naturaleza discontinua de estos dispositivos es una de sus principales características en donde los cambios en su topología pueden ocurrir debido a una activación automática de uno o más interruptores o el cambio de parámetros de manera temporal. [11]

Particularmente en el convertidor Boost, la dinámica de su comportamiento depende de la región en el espacio de estados donde se encuentra la operación del sistema, y la posición del switch se muestra la única entrada de control disponible.

En el estudio de los sistemas de control, los espacios de estado no lineales son representados de la siguiente forma:

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u, \quad y = h(x) \quad (2-10)$$

En donde $x \in R^n$, $u \in \{0,1\}$, $y \in R$. Las funciones vectoriales $f(x)$ y $g(x)$ representan campos vectoriales infinitamente diferenciables definidos sobre un espacio tangente a R^n . El estado del sistema es representado por x , la entrada de control se conoce como u mientras que y es la salida del sistema, además $f(x)$ y $g(x)$ son campos vectoriales.

2.2.1 Modelo de convertidor Boost

El modelo dinámico del convertidor está basado en las leyes de Kirchoff de corriente y tensión, además se utiliza una variable binaria que representa el estado en el que se encuentra el Switch del convertidor, por lo tanto los valores que puede tomar esta variable son 0 y 1. De esta forma, se combinan las ecuaciones diferenciales con la variable binaria para obtener el modelo dinámico del convertidor.

En la Figura 2-10, se muestra el modelo tradicional del convertidor Boost:

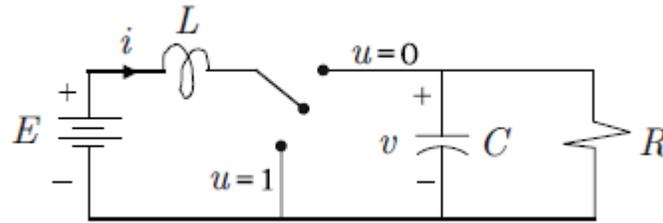


Figura 2-10: Modelo convertidor Boost. (Fuente: [11])

Las ecuaciones (2-11) describen el comportamiento del convertidor.

$$L \frac{di}{dt} = -(1 - U)v + E$$

$$C \frac{dv}{dt} = (1 - U) i - \frac{v}{R} \quad (2-11)$$

Se utilizará un modelo alternativo del convertidor Boost en donde la particularidad que posee es que ahora la posición del switch está representada por (2-12), esto permitirá la simplificación de las ecuaciones que describen su funcionamiento.

$$u = 1 - U \quad (2-12)$$

En donde U representa el estado del interruptor (1 para encendido y 0 para apagado) y u es una transformación auxiliar que tiene como fin simplificar el modelo.

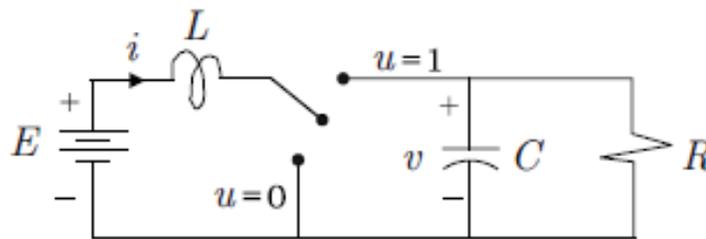


Figura 2-11: Modelo Alternativo convertidor Boost. (Fuente: [11])

La Figura 2-11 describe gráficamente el funcionamiento del convertidor en donde ahora las ecuaciones que describen el funcionamiento de éste están dadas por (2-13).

$$L \frac{di}{dt} = -uv + E$$

$$C \frac{dv}{dt} = ui - \frac{v}{R} \quad (2-13)$$

Matricialmente el modelo queda de la siguiente forma:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v}{L} \\ \frac{i}{C} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

En donde se pueden identificar las funciones vectoriales $f(x)$ y $g(x)$:

$$f(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ \frac{x_2}{-RC} \end{bmatrix}, \quad x = [x_1 \ x_2]^T = [i \ v]^T$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{x_2}{L} \\ \frac{x_1}{C} \end{bmatrix} \tag{2-14}$$

2.2.2 Superficies deslizantes

Una superficie deslizante S es representada por un conjunto de vectores de estado en donde se cumple la restricción $h(x) = 0$, en donde $h: R^n \rightarrow R$ es una función de salida escalar del sistema.

$$S = \{x \in R^n \mid h(x) = 0\}$$

En el control retroalimentado existen un conjunto de acciones $u(x)$ que permiten que la restricción $h(x) = 0$ sea satisfecha localmente en la trayectoria de estado $x(t)$.

En el diseño de las leyes de control retroalimentado, la función escalar $h(x)$ también es parte del diseño del problema. En este caso particular, la superficie deslizante propuesta para el convertidor Boost de la red está dada por (2-15):

$$h(x) = i - \bar{i} = x_1 - \bar{x}_1 \tag{2-15}$$

En donde $\bar{i} = i = \frac{v^2}{RE}$ representa el punto de equilibrio de corriente de entrada que corresponde con la tensión deseada de salida.

Para el estudio de la accesibilidad de las superficies deslizantes se introduce el concepto de la derivada direccional de $h(x)$ en la dirección de $f(x)$ que se denotará como $L_f h(x)$, del mismo modo, la derivada direccional $h(x)$ en la dirección de $g(x)$ se denotará como $L_g h(x)$. [9] [10]

Además, se define el control equivalente realimentado como $u_{eq}(x)$. Por lo que para satisfacer la restricción $h(x) = 0$, entonces se debe cumplir la siguiente condición:

$$\dot{h}(x) = \frac{\partial h}{\partial x} (f(x) + g(x)u_{eq}(x)) = 0$$

Según la notación anteriormente quedaría expresado como:

$$L_f h(x) + [L_g h(x)]u_{eq}(x) = 0$$

Por lo tanto, el control equivalente del sistema está dado por (2-16):

$$u_{eq}(x) = -\frac{L_f h(x)}{L_g h(x)} \quad (2-16)$$

Finalmente, el campo vectorial controlado y su evolución correspondiente sobre la superficie deslizante S quedan descritos por la siguiente relación (2-17):

$$\dot{x} = f(x) - g(x) \frac{L_f h(x)}{L_g h(x)} \quad (2-17)$$

La idea principal es proporcionar la acción de control que garantice el seguimiento de la trayectoria descrita por S . De este modo la derivada de $h(x)$ del tiempo con respecto a x está dada por:

$$\frac{d}{dt} h(x) = \frac{\partial h}{\partial x} (f(x) + g(x)u) = L_f h(x) + [L_g h(x)]u$$

Si en una vecindad de S tenemos que $L_g h(x) > 0$, es decir, se ubica por encima de la trayectoria definida se requiere la acción de control sea eliminar el efecto incremental que se presenta, por lo tanto la derivada de $h(x)$ del tiempo debe ser estrictamente negativa en x , haciendo que $u = 0$. De la misma forma si se ubica por debajo de la trayectoria de S , es decir $L_g h(x) < 0$, la acción requerida es hacer $u = 1$.

Dado lo anterior, se define la ley de control que obliga a la trayectoria del sistema alcanzar la superficie S (y de paso “cruzarla”), está definida como:

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } h(x) < 0 \\ 0 & \text{si } h(x) > 0 \end{cases}, \quad u = \frac{1}{2}[1 - \text{sign } h(x)] \quad (2-18)$$

Con esta ley de control, el comportamiento que tendrá la trayectoria del sistema en una vecindad de S será un “zig-zagueo” como el mostrado en la Figura 2-12.



Figura 2-12: Conmutación a frecuencia finita

En la Figura 2-13 se muestra una comparación del control a 20 kHz y a “frecuencia infinita” (la simulación fue efectuada a 1 MHz), se puede ver claramente como la señal de corriente posee un menor rizado lo que reafirma que a mayor frecuencia (idealmente infinita), la superficie deslizante se alcanza de mejor manera.

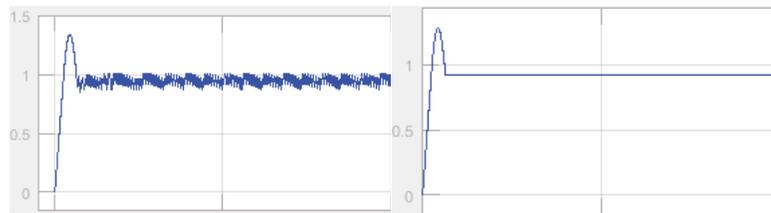


Figura 2-13: Control en modo deslizante a frecuencia finita (izq.) e infinita (der.)

2.2.3 Control en modo deslizante de convertidor Boost

Dadas las características de la red, en donde la tensión de salida va a estar fijada por la tensión del banco de baterías se hace necesario que el control del convertidor sea a través de la corriente de entrada del inductor. De esta forma, la superficie deslizante estará dada por:

$$h_1(x) = x_1 - \bar{x}_1, \quad \bar{x}_1 = I_{ref} \quad (2-19)$$

En donde:

$$\bar{x}_1 = \frac{V_{bat}^2}{RE}$$

Tomando las funciones vectoriales expresadas en (2-14), el valor de las derivadas direccionales de cada una estarán expresadas por:

$$f(x) = \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ -\frac{x_2}{RC} \end{bmatrix} \quad g(x) = \begin{bmatrix} -\frac{x_2}{L} \\ \frac{x_1}{C} \end{bmatrix}$$

2.2.4 Algoritmos MPPT

En los sistemas de generación autónomos, tales como los eólicos y solares, se encuentran distintos puntos de operación a lo largo del día, y como consecuencia, los “peak” de potencia asociados a cada punto de operación también varían dependiendo de las condiciones ambientales. Debido a lo anterior, y con el motivo de tener sistemas más eficientes, se están desarrollando distintos algoritmos para poder alcanzar el punto de máxima transferencia de potencia en estos sistemas. [2]

Al aplicar los algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracker) en los controladores, la potencia de salida del sistema depende mucho de la exactitud en que se siguen estos “peaks” de potencia independiente de la fuente generadora de ésta, en la Figura 2-15 se muestran las curvas generales asociadas a ciertas velocidades de viento, en donde la máxima potencia no sólo depende de la velocidad del viento, sino que también de la velocidad del generador.

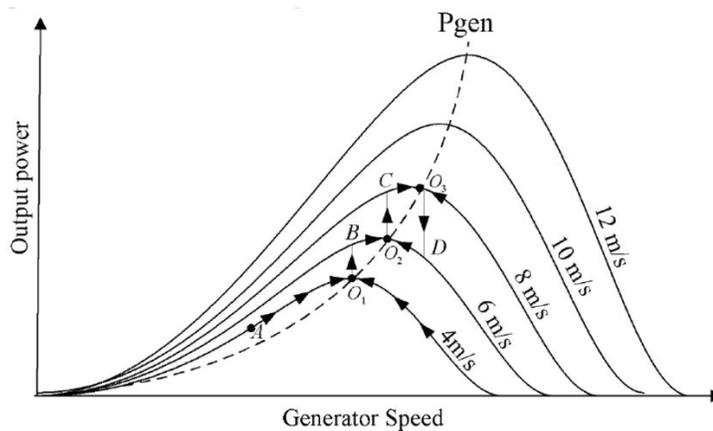


Figura 2-15: Curvas generales de potencia de aerogenerador. (Fuente: [2])

Existen distintas clasificaciones para los algoritmos de control MPPT, entre las que se destacan:

- TSR control (Tip Speed Ratio): Este tipo de algoritmos regula la velocidad rotacional del generador de forma que la relación de velocidad de punta de pala se encuentre en su valor óptimo.

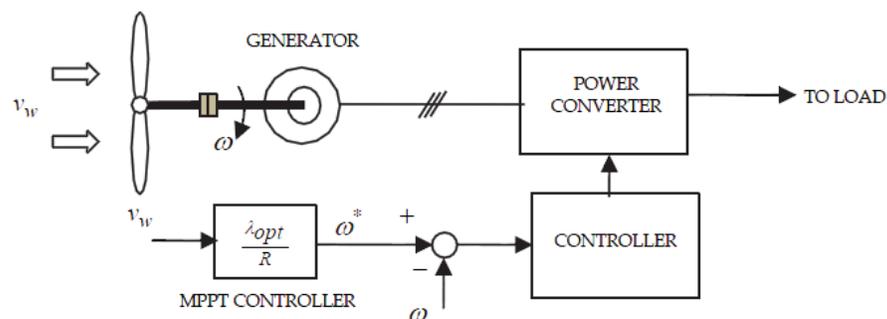


Figura 2-16: TSR control. (Fuente: [2])

- PSF control (Power Signal Feedback): Para este tipo de algoritmos de control se hace necesario tener conocimiento previo de todas las curvas de potencia características propias de la turbina (obtenidas previamente vía simulaciones o estudios experimentales) para así tener una referencia de potencia para cada punto de operación.

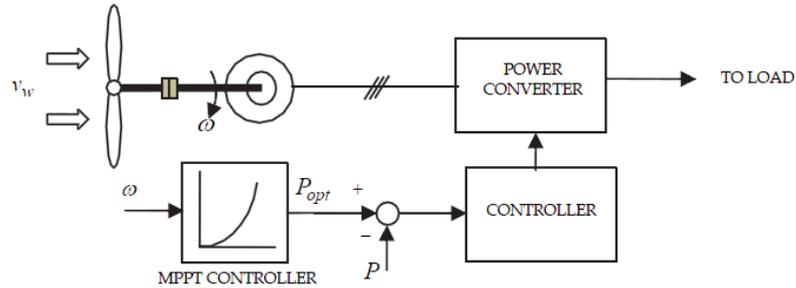


Figura 2-17: PSF Control. (Fuente: [2])

- HCS control (Hill-Climb Search): Este tipo de algoritmos está midiendo constantemente las variables asociadas y comparando las potencias a medida que va generando nuevas referencias para el controlador de modo que llegue al punto de máxima transferencia de potencia.

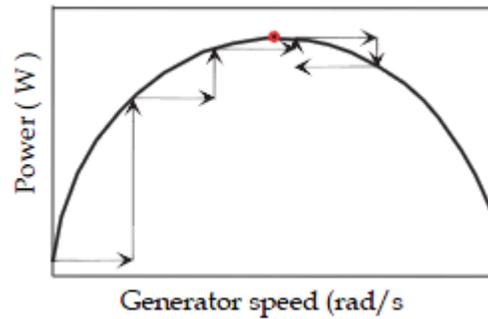


Figura 2-18: HCS control. (Fuente: [2])

3.1.1 Turbina eólica y generador de imanes permanentes

Las características de la turbina eólica a simular se presentan en la Tabla 3-1. Esta turbina eólica cuenta con un sistema de paso variable pasivo varía el ángulo de incidencia en 5° para velocidades mayores a 12 m/s y así proteger el sistema contra corrientes fuertes de viento.

Tabla 3-1: Características turbina eólica

Turbina eólica	
Configuración	Tres palas, eje horizontal, rotación en sentido horario, orientación pasiva
Potencia Nominal	5000 (W)
Velocidad Nominal	10,5 (m/s)
Diámetro	5 (m)
Área de barrido	19,63 (m ²)
Máxima Potencia	8000 (W)
Velocidad mínima de rotación	3 (m/s)
Velocidad nominal de rotación	260 (rpm)
Velocidad de supervivencia	50 (m/s)

En la Tabla 3-2 se encuentran las características del motor utilizado en las simulaciones, este generador corresponde a un modelo predeterminado del software (Simulink) en el que se están haciendo las simulaciones.

Tabla 3-2: Características de PMSG

PMSG	
Pares de Polos	4
Velocidad Nominal	2400 (rpm)
Tensión Nominal	300 (V)
Resistencia de Armadura, R_s	0,0918 (Ω)
Flujo magnético de enlace	0,1688 (Wb)
Inductancia de Estator	0,975 (mH)
Torque Nominal	24 (Nm)
Potencia Nominal	5,8 (kW)

El cálculo de la caja elevadora de velocidad se dimensionó con el objetivo de que a velocidad nominal tanto del generador de imanes permanentes como la turbina eólica la relación de velocidad de punta de pala (Tip Speed Ratio) alcanzara su valor óptimo de modo que el coeficiente de potencia también alcance el máximo.

$$\lambda = \frac{\omega_r * R}{v_w} \quad (3-1)$$

En donde ω_r es la velocidad del rotor, R es el radio del rotor y v_w es la velocidad del viento. El máximo valor del coeficiente de potencia en los aerogeneradores se alcanza cuando el TSR es de 6,6. [8]

De esta forma, y sabiendo que el radio del rotor es de 2.5 y la velocidad nominal de viento es 10.5 m/s, la velocidad que debiera tener el rotor es de 27.72 rad/s.

Haciendo el cálculo de la relación de velocidades entre la turbina y el generador, el valor resultante es de 8.7, por lo que se dimensiona una caja elevadora de velocidad que cumple con esa exigencia.

En la Figura 3-2 se muestra el diagrama de bloques correspondiente al Aerogenerador a simular en el software.

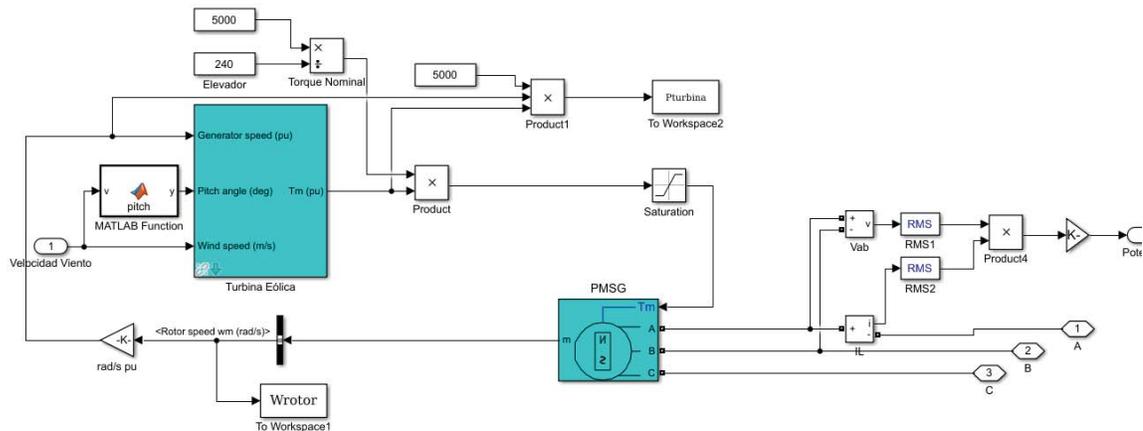


Figura 3-2: Bloque Aerogenerador

Los parámetros que serán medidos en este bloque son la potencia de la turbina, la potencia aparente generada, y la velocidad del rotor.

3.1.2 Convertidor Boost

Para la modelación del convertidor Boost, considerando la potencia nominal de la red a diseñar y una frecuencia de operación de 20 kHz, el switch a utilizar será un IGBT ya que presenta buen comportamiento para estas características. [13]

Para el dimensionamiento del inductor y capacitor se utilizaron las ecuaciones (2-8) presentadas en el capítulo anterior que representarán los valores límites para el modo de conducción continua.

En condiciones nominales de operación del esquema, la tensión de salida del convertidor será 440 V y la de entrada 300 V, por lo tanto el ciclo de trabajo nominal D a una frecuencia de 20 kHz será de 0.3 aproximadamente. Para el rizado de tensión se considera un 5% para el dimensionamiento del condensador.

Como anteriormente se indica, el convertidor es diseñado para que opere en modo de conducción continua mientras que las ecuaciones (2-8) nos dan los valores límite, por lo tanto para evitar el modo de conducción discontinua los valores obtenidos fueron aumentados cinco veces, de todas maneras existen distintos factores que pueden afectar el modo de conducción del convertidor, como la tensión del banco de baterías conectado a la salida que se ve muy afectada dependiendo del estado de carga en el que se encuentra, esta situación se explica en el ítem siguiente.

Finalmente los valores obtenidos de inductor es de 1.5 mH y el de condensador es de 200 uF.

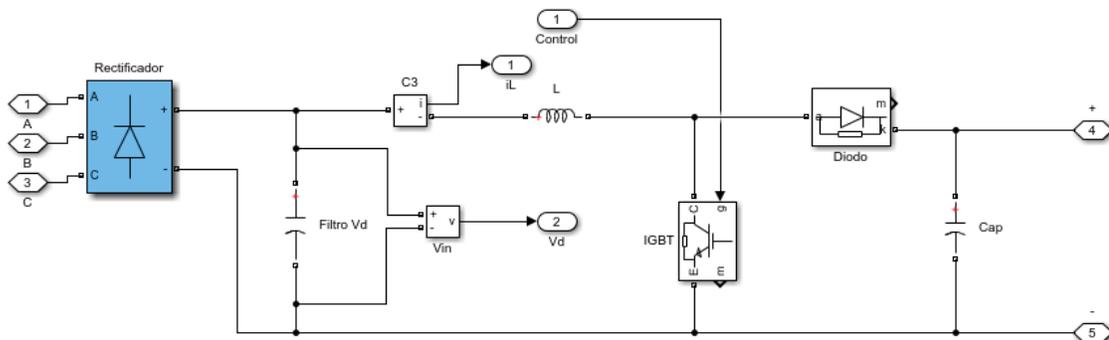


Figura 3-3: Rectificador y convertidor Boost

Los valores que serán registrados en esta etapa son la tensión de entrada, la corriente en el inductor y la corriente de referencia que entregará el controlador.

3.1.3 Banco de baterías y carga

La carga a utilizar será de 2 kW aproximadamente y que será utilizada como carga promedio a lo largo del día, se utiliza una resistencia de 90 Ohm que fue obtenida a partir de la relación entre potencia, tensión y resistencia dada por la ecuación (3-2).

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (3-2)$$

El banco de baterías utilizado está conformado por 36 baterías de ion de litio con 12 V, 7 Ah nominales conectadas en serie dando un total de un banco de 3 kWh operando a 432 V nominal, cabe destacar que a pesar de que la carga nominal de cada una de las celdas sea de 12 V [14], su

tensión oscila entre 10, 8 y 13,8 V aproximadamente dependiendo de su estado de carga. Debido a lo anterior, la tensión del banco de baterías puede variar entre 388 y 500 V aproximadamente.

Los parámetros que serán registrados en la etapa final de esta red son la corriente que entrega el sistema, la tensión que posee la carga y la potencia que absorben. Para efectos de la simulación, se utilizará un estado de carga de 30% del banco de baterías.

En la Figura 3-4 se muestra el diagrama del banco de baterías junto con la carga en Simulink.

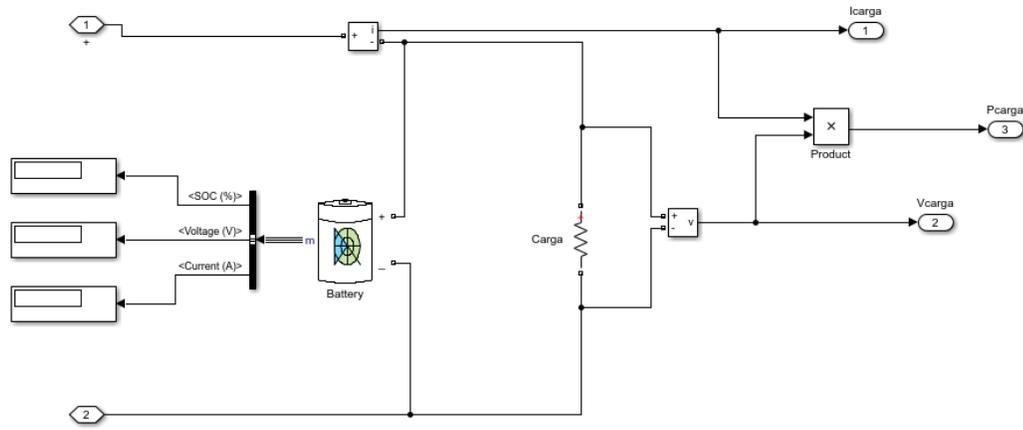


Figura 3-4: Banco de baterías y carga

El modelo simulado de batería corresponde al incluido en el software Simulink que representa la dinámica de las baterías recargables genéricas. [5]

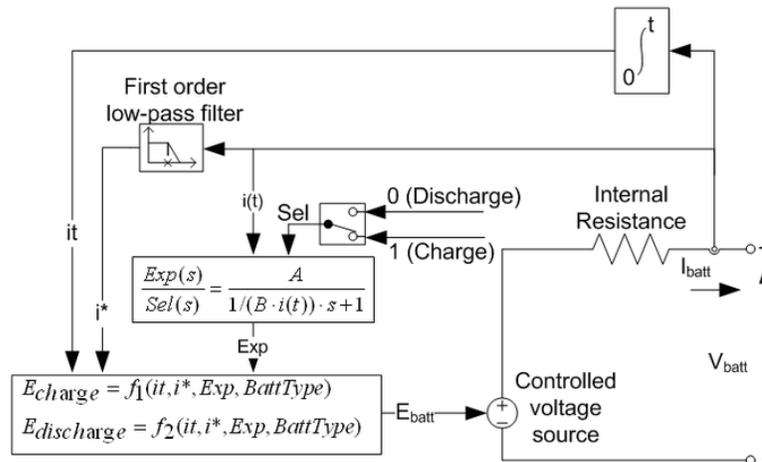


Figura 3-5: Modelo de batería

Este modelo presenta dos funciones que representan sus estados, que están dados por las ecuaciones de descarga (1-5) para $i^* > 0$ y carga (1-6) para $i^* < 0$.

$$f_1(it, i^*, i) = E_o - K \frac{Q}{Q - it} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B it)$$

$$f_2(it, i^*, i) = E_o - K \frac{Q}{it + 0.1 Q} i^* - K \frac{Q}{Q - it} it + A \exp(-B it)$$

En donde:

- E_{batt} : Tensión no lineal [V].
- E_o : Tensión constante [V].
- $Exp(s)$: Dinámica de zona exponencial [V].
- $Sel(s)$: Modo de batería (0 para descarga, 1 para carga).
- K : Constante de polarización o resistencia de polarización [Ah^{-1}].
- i^* : Dinámica de corriente de baja frecuencia [A].
- i : Corriente de batería [A].
- it : Capacidad extraída [Ah].
- Q : Capacidad máxima de batería [Ah].
- A : Zona exponencial de tensión [V].
- B : Capacidad exponencial [Ah^{-1}].

En la Figura 3-6, se presentan las curvas características de carga y descarga que describen el comportamiento de las baterías. La curva de descarga en la Figura 3-6a de las baterías se divide en tres principales secciones, el área de descarga, el área nominal y el área exponencial.

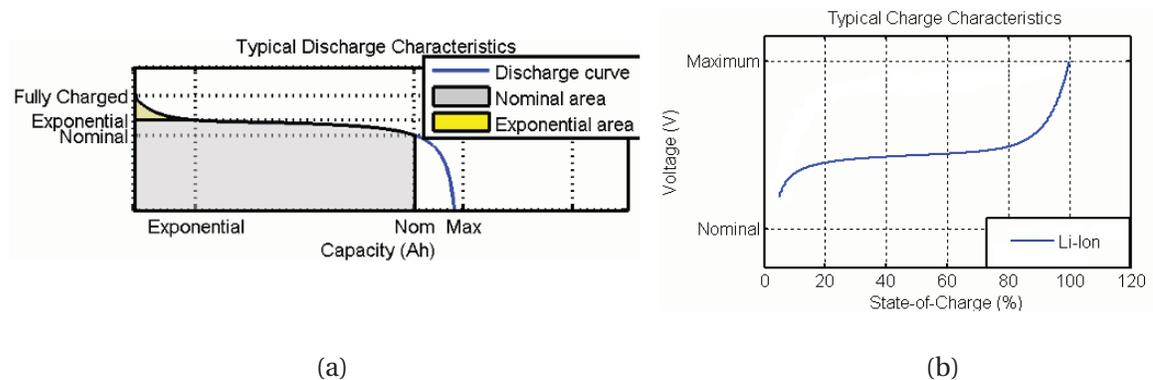


Figura 3-6: Curvas características de batería

3.2 Perfil de vientos

El modelo de vientos representa la fuente primaria de entrada al sistema, por lo tanto se hace necesario obtener un modelo de vientos lo más cercano a la realidad posible. Es por eso que para realizarlo se consultó el Explorador de Energía Eólica, que es una base de datos de las velocidades de vientos a lo largo de todo el país (a excepción de una zona cercana al parque nacional Torres del Paine), por lo tanto todos los datos usados para construir el modelo fueron obtenidos del explorador.

El sector escogido para realizar el modelo y las simulaciones de la red, el lugar de estudio está ubicado en el extremo sur del país, en la entrada a la reserva nacional Magallanes que está ubicada a aproximadamente 8 km del centro de Punta Arenas.

Los datos de la zona escogida son los siguientes:

Tabla 3-3: Características del sitio

Latitud	53.16 S
Longitud	71.03 O
Elevación del terreno	410 metros
Densidad del aire	1.21 (kg/m ³)

Gráficamente la ubicación del sitio de estudio se muestra demarcada con el puntero de color verde en la Figura 3-7.



Figura 3-7: Localización sitio estudio

3.2.1 Datos de vientos

Los datos de los vientos a simular corresponden una altura de 16 metros aproximadamente, ya que para aerogeneradores de baja potencia, según las recomendaciones del fabricante, el poste

en el cual será montada la góndola debe medir aproximadamente 10 metros más que su “obstáculo” más cercano para evitar turbulencias o la posibilidad de captar toda la corriente de aire. [15]

En la Figura 3-8 se muestra el ciclo medio de velocidad de vientos anual correspondiente al perfil. El valor medio de cada mes está dado por el promedio de los valores de todas las horas de todos los días durante el período que se indica, de la misma forma el promedio mínimo diario y máximo diario es calculado con la diferencia de que se toman los valores mínimos o máximos del día durante el período.

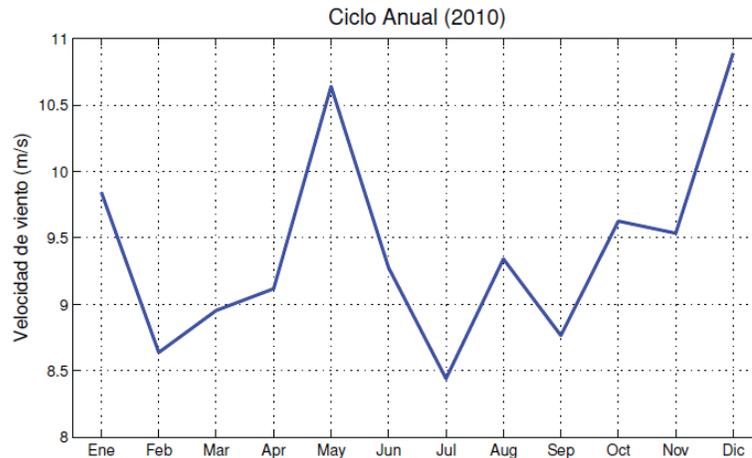


Figura 3-8: Ciclos medios de velocidad según mes del año

La distribución de frecuencia para el año completo está dada por la Figura 3-9, en donde las barras azules representan la velocidad del viento mientras que la línea roja la distribución de la frecuencia acumulada.

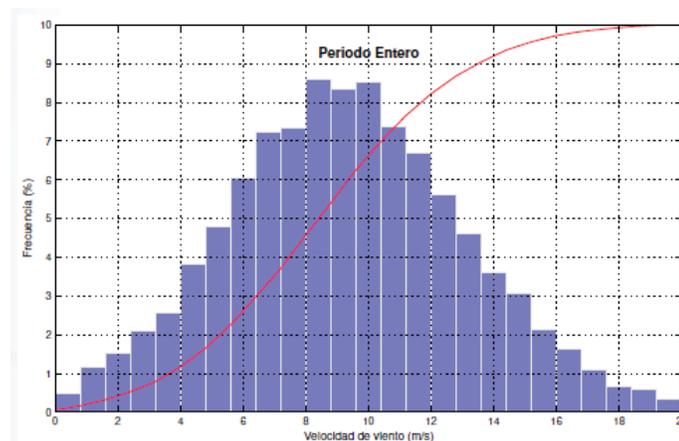


Figura 3-9: Distribución de frecuencias

En base a los valores presentados anteriormente, se elaboró un perfil de vientos que simulan las velocidades a cada hora del día, estos valores se muestran en la tabla 3-4.

Tabla 3-4: Valores de vientos a simular a cada hora

Hora	[m/s]	Hora	[m/s]
0:00	8.35	12:00	7.18
1:00	8.74	13:00	9.91
2:00	6.79	14:00	10.11
3:00	9.91	15:00	13.03
4:00	10.49	16:00	10.88
5:00	9.52	17:00	6.98
6:00	9.71	18:00	9.52
7:00	10.10	19:00	8.74
8:00	8.35	20:00	10.49
9:00	7.57	21:00	9.91
10:00	6.79	22:00	9.71
11:00	6.59	23:00	9.71

Gráficamente el perfil de vientos a simular queda como se muestra en la Figura 3-10.



Figura 3-10: Perfil de vientos

En el Apéndice A de este informe se encuentran las tablas con los datos en los que se basan las Figuras 3-8 y 3-9, además los datos que ayudaron a elaborar el perfil de vientos a simular.

3.3 Implementación de control en modo deslizante y algoritmo MPPT

La implementación del control en modo deslizante en el sistema es relativamente sencilla pero como anteriormente se nombró, hay que tomar en cuenta las limitaciones físicas de los elementos del sistema, en este caso la conmutación del switch IGBT no debería ser superior a los 20 kHz para minimizar las pérdidas por conmutación.

Es por eso que para la medición de la corriente se utilizó un elemento de muestreo Sample & Hold a una frecuencia de 20 kHz, de esta forma se obliga al controlador a enviar las instrucciones en esa frecuencia (hay que recordar que las instrucciones están limitadas a 1 y 0).

En la Figura 3-11 se muestra el diagrama de bloques utilizado en el sistema, en donde la entrada es la corriente en el inductor mientras que la salida es u (que representa los estados del switch).

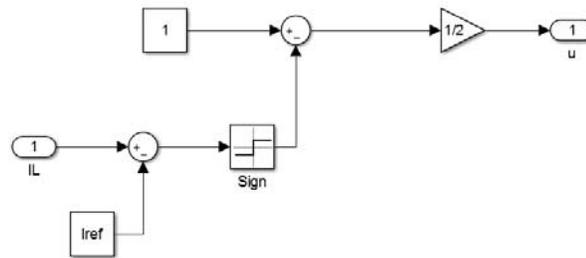


Figura 3-11: Diagrama de bloques implementado

3.3.1 Algoritmo propuesto

Como anteriormente se planteó, el convertidor Boost de la red será controlado en modo deslizante a través de la corriente de entrada en el inductor, de este modo la trayectoria del sistema va a estar definida por la(s) corriente(s) de referencia que tenga el controlador.

El algoritmo MPPT que se propone implementar en el controlador pertenece a la categoría del HCS control ya que se irá variando la corriente de referencia y luego se comparan las potencias de manera constante con el fin de llegar al punto de máxima transferencia de potencia. [16] [17]

Las variables de entrada de este algoritmo corresponden a la corriente media en el inductor junto con la tensión de entrada, mientras que la única salida de este algoritmo es la nueva corriente de referencia que tendrá el controlador.

En una primera instancia, el algoritmo calcula la potencia a partir de las mediciones de corriente media de inductor y tensión de entrada del convertidor y luego la compara con el valor de la potencia medida anteriormente que es almacenado en la memoria, cabe destacar que también se almacena en la memoria el valor de la corriente de referencia correspondiente a la potencia almacenada.

La forma en que el algoritmo compara los valores de potencia medida con la potencia almacenada es restándolas, cuando la diferencia entre estas potencias es distinta de cero el algoritmo tiene

dos opciones, si la resta es un número positivo significa que el valor de la potencia medida es mayor que la potencia almacenada, por lo tanto el valor de la corriente de referencia y potencia que se almacena en la memoria son los medidos y luego se genera una nueva corriente de referencia sumándole una diferencia previamente establecida (Δi) para comparar. Por el contrario, cuando la resta entre los valores medidos y almacenados es un número negativo, a la corriente de referencia se le resta la diferencia (Δi) y los valores son igualmente almacenados en la memoria. Finalmente cuando la diferencia entre las potencias es igual a cero, significa que se alcanzó el punto de máxima transferencia de potencia por lo que la corriente de referencia se mantiene. En la tabla 3-7 se muestra la nomenclatura utilizada en el diagrama de flujo del algoritmo MPPT propuesto en la Figura 3-11.

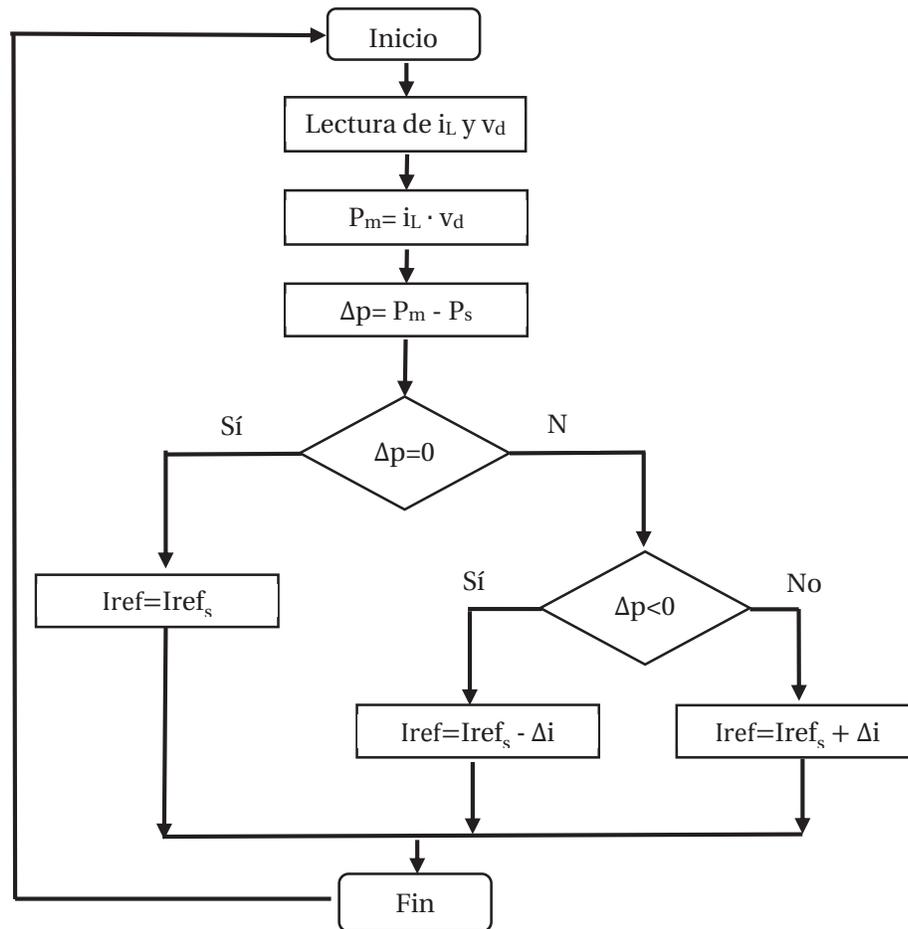


Figura 3-12: Diagrama de flujo de Algoritmo MPPT propuesto

Tabla 3-5: Nomenclatura de diagrama de flujo

Nomenclatura	
i_L	Corriente medida en inductor
v_d	Tensión medida en entrada de convertidor
P_m	Potencia calculada a partir de mediciones de i_L y v_d
P_s	Valor de potencia almacenado en memoria
Δp	Diferencia de valores de potencia
I_{ref}	Valor de corriente referencial
I_{ref_s}	Valor de corriente referencial almacenado en memoria

Antes de comenzar el funcionamiento del algoritmo, para evitar problemas de inestabilidad, se desactiva el algoritmo en el inicio del sistema hasta que alcance un estado estacionario.

Para asegurar un correcto funcionamiento y evitar errores en el control del convertidor se agregó una línea de código que verifica si la diferencia entre la corriente medida y la corriente de referencia es mayor a 0.5 A, la nueva referencia será la corriente medida.

En la Figura 3-12 se muestra el diagrama de bloques que contiene el algoritmo con sus elementos de muestreo correspondientes implementados en el controlador.

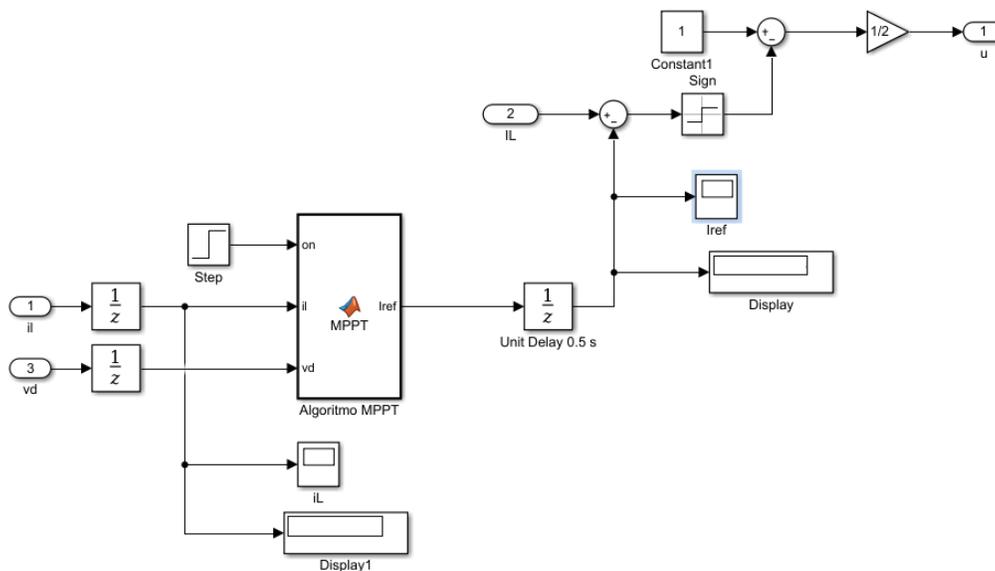


Figura 3-13: Algoritmo MPPT implementado en controlador

Para la implementación del algoritmo en el controlador se utilizaron elementos de muestreo en la entrada y salida, estos elementos toman una muestra cada 0.5 segundos por lo que la corriente de referencia del controlador se actualiza en cada uno de esos períodos.

Además como fue anteriormente nombrado el bloque del algoritmo está desactivado los primeros momentos de simulación mientras el sistema está alcanzando un estado estacionario por lo que el bloque posee una entrada llamada “on” que es la que finalmente permite activar el algoritmo cuando recibe la señal “1”.

En el Apéndice B se adjunta el código utilizado para el algoritmo en la simulación.

4 Simulaciones y resultados

En este capítulo se reúne todo lo presentado en los capítulos anteriores para dar paso a la simulación de la red propuesta que está conformada por todos los elementos y dispositivos dimensionados. Este capítulo cuenta con dos principales secciones que corresponden a los dos tipos de simulaciones efectuadas, el primero de ellos es la simulación a velocidad de viento fija mientras que el segundo tipo considera el perfil de vientos presentado en el capítulo anterior.

En ambas secciones en un principio se exponen las consideraciones que se tuvieron y los motivos de realizarlas ya que cada una cumple un rol distinto en la investigación, luego se presentan los datos obtenidos con su gráfica correspondiente en donde los que se encuentren directamente relacionados se contrastan para facilitar la comprensión. Finalmente, en cada sección se realiza un análisis de las gráficas obtenidas en forma general o puntual según amerite el caso.

4.1 Simulaciones a velocidad de viento fija

La simulación de la red a una velocidad de viento fija tiene como principal objetivo demostrar la efectividad del sistema en donde se tomarán en cuenta dos aspectos en los datos obtenidos, en primer lugar se verificará que el controlador efectivamente esté aplicando el control en modo deslizante como seguidor del punto de máxima transferencia de potencia y el tiempo que demora en alcanzar este “peak” de potencia.

Son dos las simulaciones que se mostrarán en esta sección que fueron realizadas durante 50 segundos cada una, la primera de ellas fue realizada a una velocidad de viento de 7,5 metros por segundo mientras que la segunda se hizo a la velocidad nominal de la red, es decir 10,5 metros por segundo. El objetivo de hacer esta comparación es obtener una posible referencia acerca del comportamiento del sistema a distintas velocidades.

4.1.1 Comparación de potencias

El primer gráfico obtenido es el que se muestra en la Figura 4-1, en la gráfica de la izquierda se muestra el gráfico correspondiente a la simulación de 7,5 m/s, S1 en adelante, mientras que en el de la derecha el de la simulación de 10,5 m/s, que será denominada S2.

Las curvas graficadas son las de la potencia de la turbina en color azul, luego la potencia en la entrada del convertidor en color rojo y finalmente en color anaranjado se muestra la correspondiente a la potencia en la carga.

Entre las primeras observaciones que se pueden realizar observando la Figura 4-1 es que en primer lugar, el punto de máxima transferencia de potencia se alcanza aproximadamente a los 15 segundos en la simulación S1 mientras que en la simulación S2 el punto de máxima transferencia de potencia se alcanza a los 30 segundos.

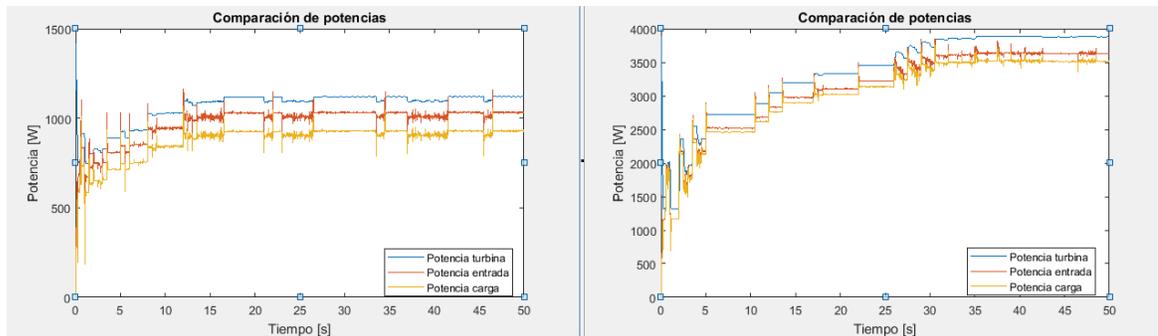


Figura 4-1: Comparación de potencias de turbina, entrada de convertidor y carga

Con respecto al rendimiento del sistema, se realiza el cálculo en un punto en donde ya se alcanzó el punto de máxima transferencia de potencia en ambas simulaciones. Se puede medir el rendimiento en las distintas etapas de la red, en primer lugar se puede evaluar entre la potencia que entrega la turbina y la entrada del convertidor, luego se puede evaluar entre la entrada del convertidor y la carga, y finalmente se puede medir entre la turbina y la carga que corresponde al rendimiento total del sistema.

En la Tabla 4-1 se muestran las mediciones de las potencias en las distintas etapas de la red, en un instante en donde ya se alcanzó el punto de máxima transferencia de potencia, y se muestra los rendimientos calculados para cada simulación. El rendimiento η_1 corresponde a la potencia de turbina y entrada del convertidor, η_2 corresponde a entrada de convertidor y carga y η_3 finalmente corresponde al rendimiento total.

Tabla 4-1: Rendimiento de red

Simulación	T [s]	Turbina [W]	Entrada [W]	Carga [W]	η_1	η_2	η_3
S1	20	1172	1024	922	87%	90%	79%
S2	40	3885	3633	3515	93%	97%	90%

Según indican los resultados de la Tabla 4-1, se puede concluir en primer lugar que la red en general se comporta de manera eficiente cuando se encuentra operando a valores más cercanos al valor nominal que en bajas velocidades de viento, en segundo lugar se destaca la alta eficiencia del convertidor sobretodo en la simulación S2 lo que confirma que los convertidores electrónicos son excelentes opciones para utilizarlas en aplicaciones relacionadas a las ERNC.

4.1.2 Corrientes en inductor, carga y de referencia

En la gráfica correspondiente a la Figura 4-2 se muestra la corriente en inductor en color azul y la corriente media en rojo para las simulaciones S1 y S2, se puede observar que la corriente comienza en un nivel bajo hasta que alcanza el punto de máxima transferencia de potencia, en esta situación se puede ver claramente el comportamiento HCS del algoritmo MPPT implementado en la red, en donde el controlador comienza con un nivel bajo de corriente de referencia y aumenta poco a poco hasta encontrar la corriente ideal.

Además se puede observar que el dimensionamiento de los componentes del convertidor boost para estas velocidades fue correctamente calculado ya que se puede ver que el convertidor está operando en modo de conducción continua, lo que evitaría que el controlador entre a una zona de inestabilidad.

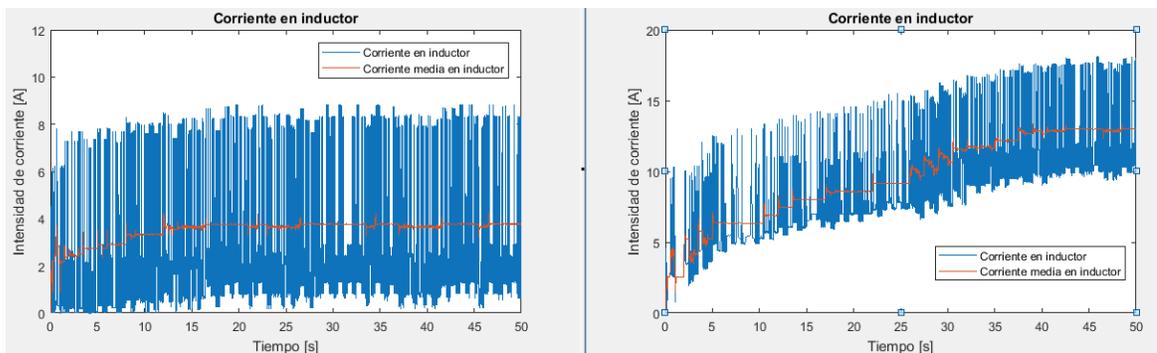


Figura 4-2: Corriente en inductor

En la Figura 4-3 se muestra en azul la corriente media del inductor y en rojo la referencia de corriente que va dando el controlador al convertidor. Otro aspecto a destacar de la red es la precisión del control en modo deslizante, en donde existe un bajo error de referencia ya que se encuentra constantemente evaluando la diferencia entre la corriente que pasa por el inductor y la corriente de referencia que arroja el algoritmo.

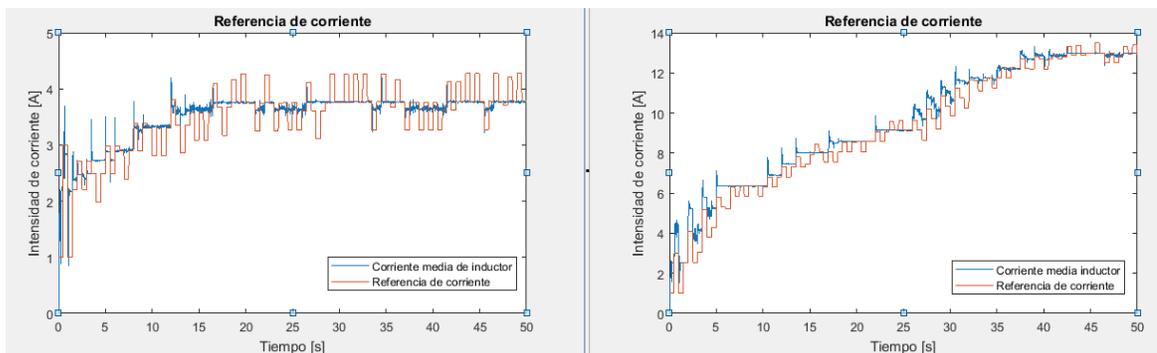


Figura 4-3: Referencia de corriente

Finalmente en la Figura 4-4 se puede ver la corriente que fluye hacia la carga, en donde al igual que en la Figura 4-2 se aprecia un rizado de corriente de magnitud considerable, esta situación puede corregirse aplicando filtros inductivos según los requerimientos de la carga final.

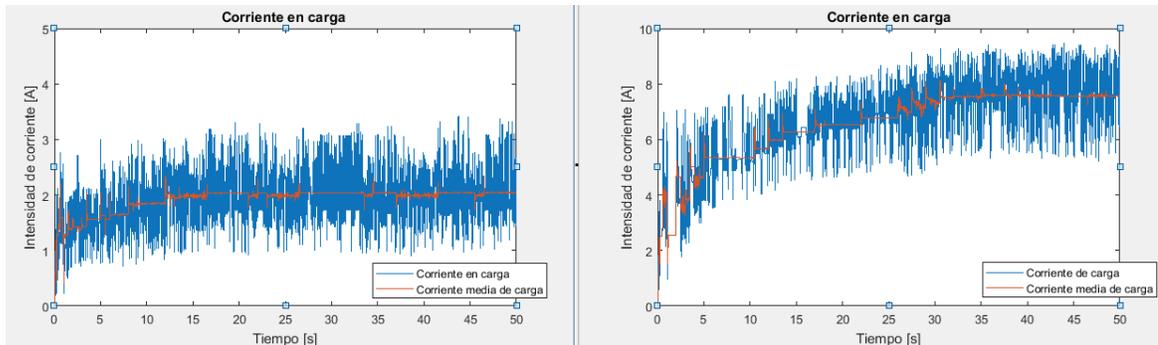


Figura 4-4: Corriente en carga

4.1.3 Tensiones de convertidor y velocidad de rotor

En estas la Figura 4-5 se muestran las comparaciones entre las tensiones de entrada y salida del convertidor (o tensión de carga) de ambas simulaciones que deja en evidencia la naturaleza del convertidor boost utilizado, en donde la tensión de entrada siempre es menor que la tensión de salida.

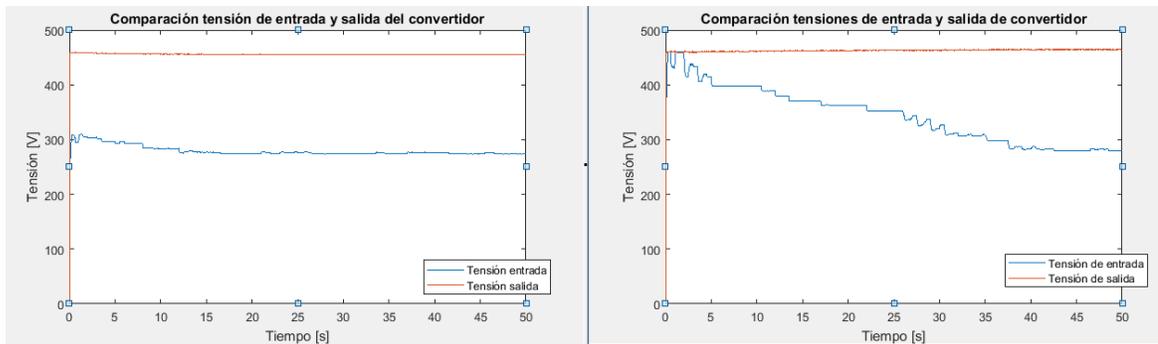


Figura 4-5: Tensiones de entrada y de carga de convertidor

Se puede notar en ambas gráficas que antes de alcanzar el punto de máxima transferencia de potencia la tensión de entrada del convertidor es mayor, al igual que la velocidad de rotor como se muestra en la Figura 4-6.

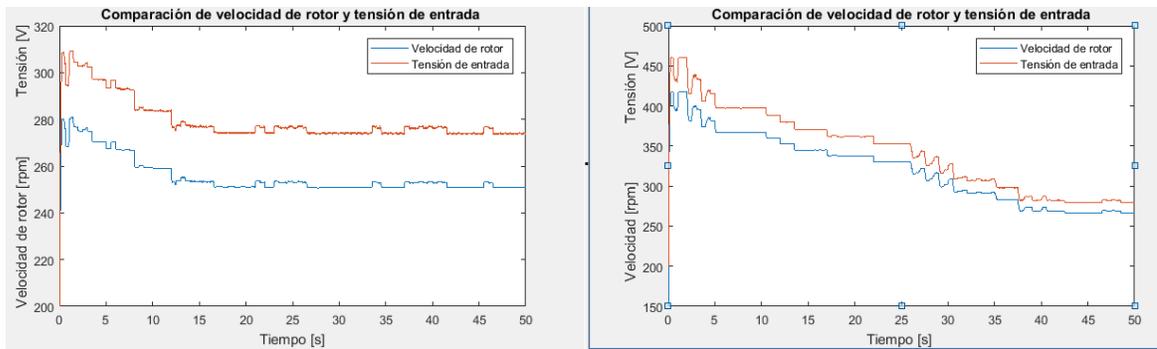


Figura 4-6: Comparación de velocidad de rotor y tensión de entrada

4.2 Simulación con perfil de vientos

El otro aspecto muy importante medir en este proyecto de investigación es la adaptabilidad del sistema, particularmente en este modelo de red, el perfil de vientos juega un rol muy importante ya que la red se ve sometida a cambios en su principal fuente de alimentación que es la velocidad del viento, esto también prueba la capacidad de funcionamiento del algoritmo implementado en el controlador.

Tabla 4-2: Velocidades de viento de cada simulación

Tiempo [s]	S3 [m/s]	S4 [m/s]	S5 [m/s]	S6 [m/s]
0	8.35	7.18	10.88	10.49
50	7.57	9.91	6.98	9.91
100	6.79	10.11	9.52	9.71
150	6.59	13.03	8.74	9.71

Para realizar la simulación del perfil de vientos mostrado anteriormente, se omitieron los datos vientos entre las horas 01:00 y 8:00 am y además la simulación se dividió en cuatro partes de 200 segundos cada una (Figura 4-7) en donde se asignaron 50 segundos a cada velocidad de viento, el principal motivo que forzó esta división del modelo fueron las limitaciones de memoria al momento de realizar la simulación para la cantidad de datos que tiene que almacenar.

Al igual que en la sección anterior de este capítulo para facilitar la lectura en adelante las simulaciones serán referidas como S3 y S4 en la fila superior, S5 y S6 en la fila inferior. De esta forma, ahora los valores de velocidad de viento para cada una de las simulaciones se muestran en la Tabla 4-2.

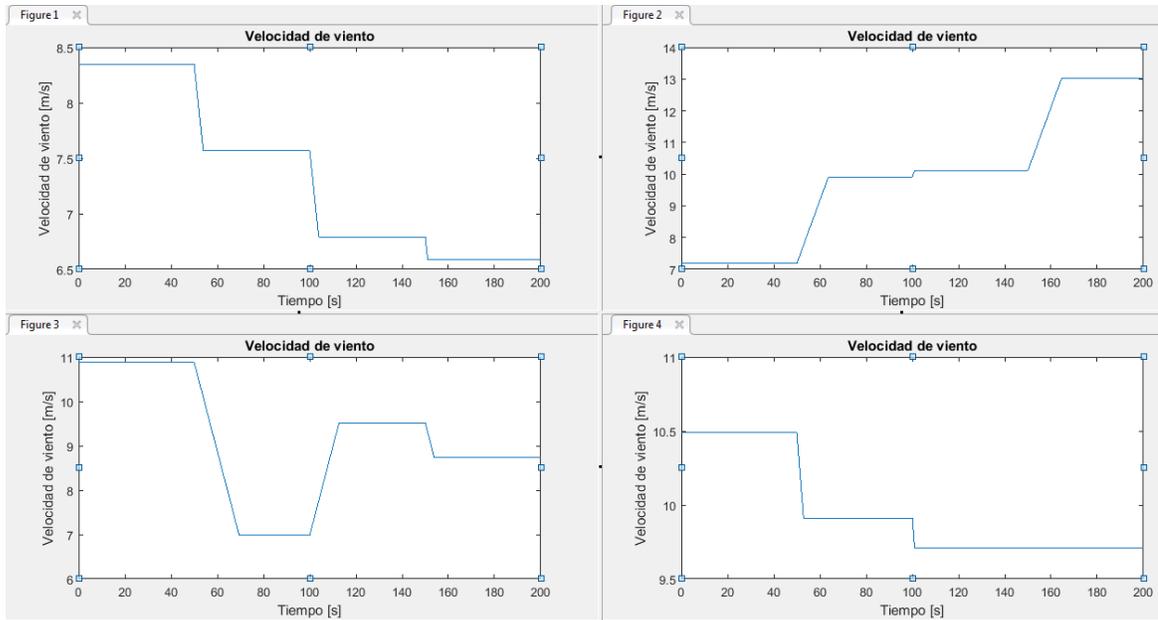


Figura 4-7: Perfiles de viento

4.2.1 Comparación de potencias

En la Figura 4-8 se muestran los gráficos de las potencias medidas durante la simulación en el mismo formato de la sección anterior, es decir, la potencia de la turbina en color azul, la potencia en la entrada del convertidor en color rojo, y anaranjado para la potencia en la carga.

Como se puede ver en la figura, el comportamiento que tuvo la red durante las simulaciones es bastante similar al que presentó en la sección anterior y lo más relevante es que la red mostró una buena adaptación a los cambios de velocidad de viento.

Este conjunto de simulaciones ahora permiten realizar un mejor análisis de rendimiento, es por eso que se escogerán los puntos más relevantes con respecto a la velocidad de viento de la red y reafirmar lo concluido en la sección anterior con respecto al funcionamiento a velocidad de viento nominal o una velocidad más baja.

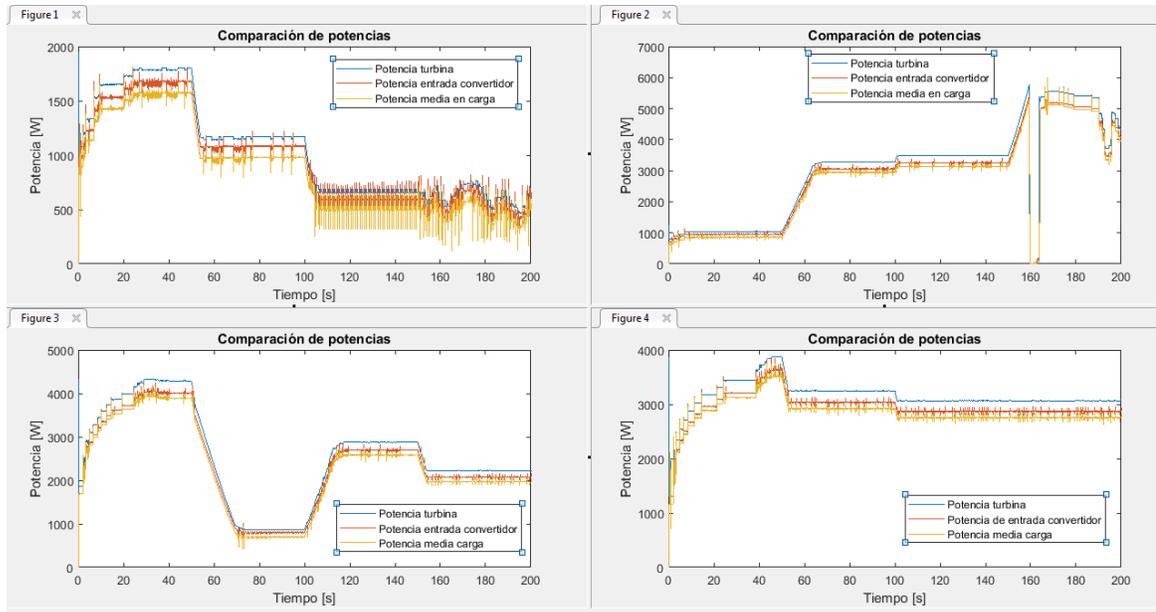


Figura 4-8: Comparación de potencias perfil de viento

Los puntos escogidos para análisis se encuentran en las simulaciones S3 y S4, el primero de ellos está ubicado en S3 aproximadamente a los 120 segundos cuando la velocidad de viento es 6.79 m/s, y el segundo punto ubicado en S4 a los 170 segundos cuando la velocidad de viento es de 13.03 m/s.

Tabla 4-3: Rendimiento de red

Simulación	T [s]	Turbina [W]	Entrada [W]	Carga [W]	η_1	η_2	η_3
S3	120	652	586	490	90%	84%	75%
S4	170	5542	5181	5124	93%	99%	93%

Nuevamente se verifica que el rendimiento de la red se ve afectado de forma negativa cuando la velocidad de viento es muy baja, y que el rendimiento es aún mayor cuando la velocidad de viento es mayor, incluso operando a un valor mayor al nominal.

Existe una situación que se presentó en los 150 segundos de simulación de S4 en donde se muestra que la red dejó de generar energía por unos segundos pero rápidamente pudo alimentar la carga funcionando con normalidad.

4.2.2 Corrientes en inductor, carga y de referencia

Con respecto a la corriente en el inductor del convertidor boost (Figura 4-9), se observa que existe un rizado de corriente de mayor magnitud a velocidades de viento más bajas mientras que a medida que aumenta va disminuyendo. Debido a lo anterior, uno de los detalles que más llama la atención se puede ver en la simulación S3, y es que para las velocidades de viento 6,79 y 6,59 m/s (en 100 y 150 segundos respectivamente) el convertidor entra en modo de conducción discontinua, esta situación se repite en la simulación S5.

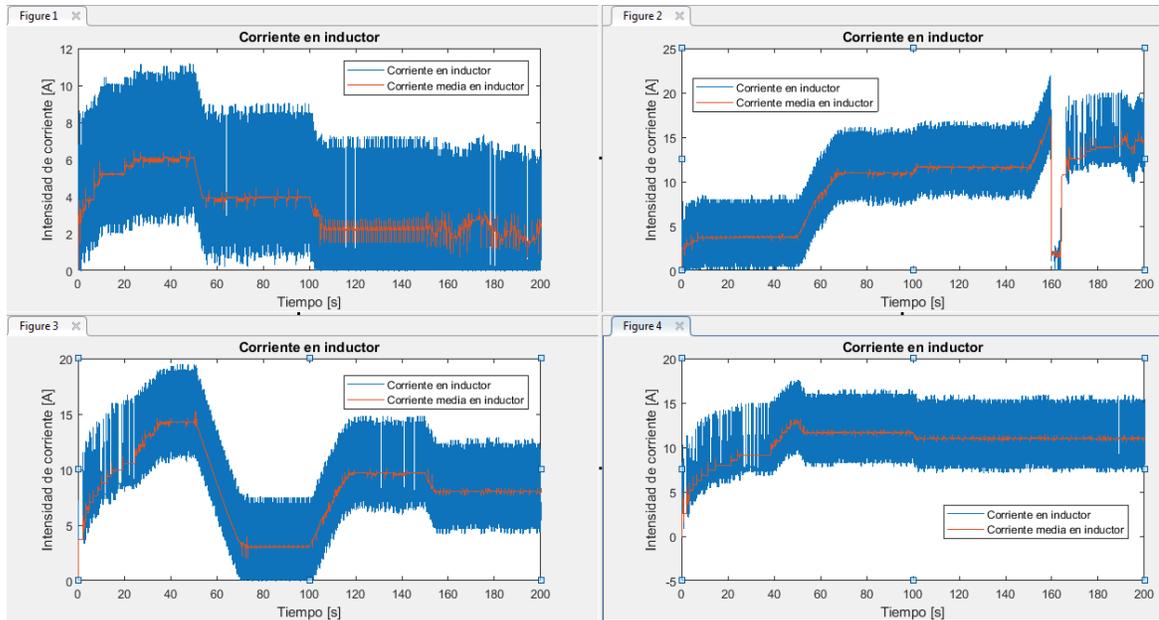


Figura 4-9: Corriente en inductor en perfil de vientos

El convertidor al entrar al modo de conducción discontinua, provoca que el controlador obtenga lecturas de corriente en el inductor con valor nulo y otras lecturas con valores muy altos lo que podría generar un “loop” o constantes errores en la referencia como se pueden ver en la Figura 4-10 en las curvas de S3.

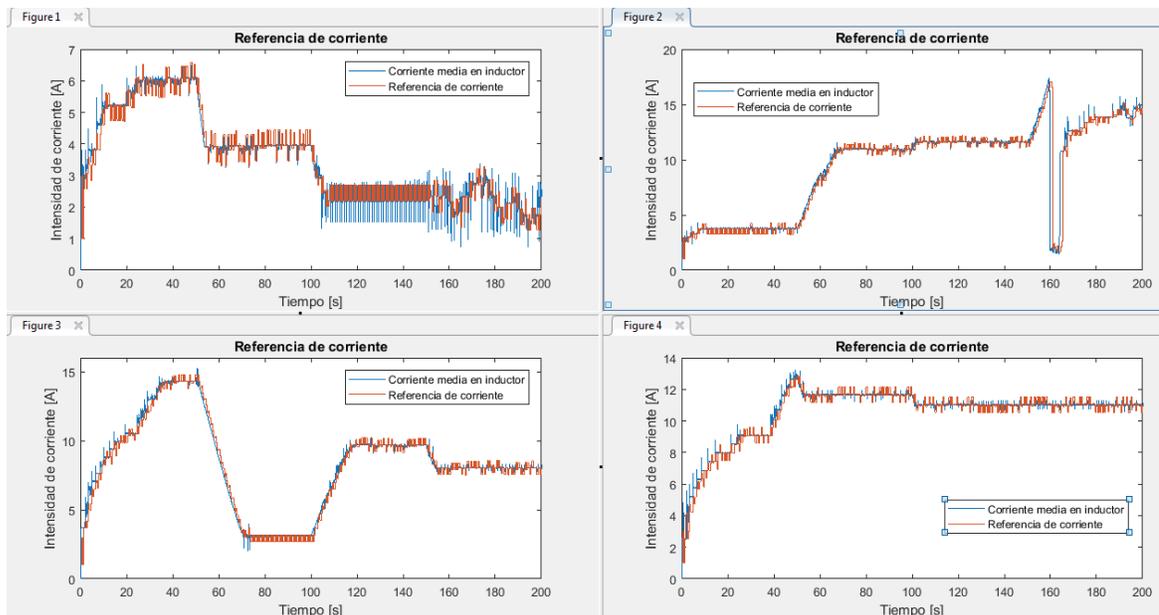


Figura 4-10: Referencia de corriente en perfil de vientos

Con respecto a la corriente de carga, en la Figura 4-11 se observa que la corriente que posee se comporta de la misma forma que la corriente en el inductor, es decir, la magnitud del rizado es

mayor cuando la potencia transferida hacia la carga es menor mientras que el rizado disminuye a velocidades de viento mayores.

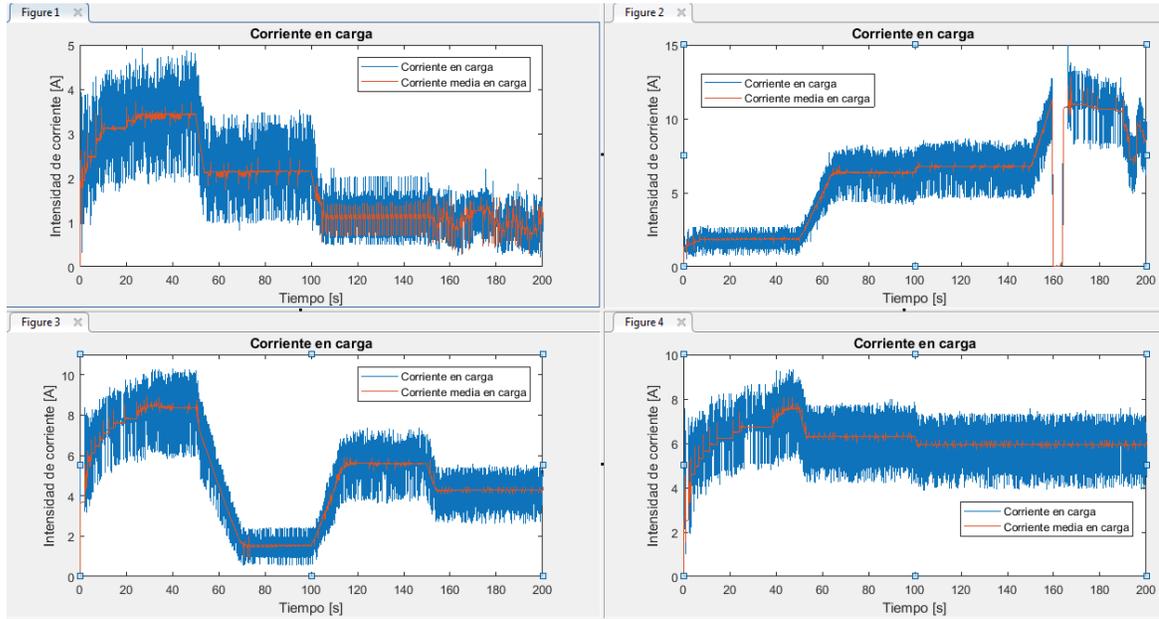


Figura 4-11: Corriente en carga de perfil de vientos

En la Tabla 4-4 se muestra un análisis en distintos puntos de la simulación del rizado de corriente en inductor, este valor se obtiene ponderando el valor “peak to peak” de la componente alterna de la corriente con la componente continua (valor medio). Según los resultados que arroja la tabla se puede ver que efectivamente el rizado disminuye a potencias más altas, pero además el valor de la componente alterna se mantiene en un valor bastante similar en ambos puntos lo que sí afecta a la hora de medir el rizado ya que compara las magnitudes de ambas componentes.

Tabla 4-4: Rizado de corriente en inductor

Simulación	T [s]	I_{pp} [A]	I_{cd} [A]	Rizado
S5	80	7.37	3.05	241%
S6	60	7.59	11.63	65%

Realizando el análisis de rizado de corriente en los mismos puntos pero en la corriente que circula por la carga se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 4-5. Se puede ver que los niveles del rizado de corriente se reducen considerablemente.

Tabla 4-5: Rizado de corriente en carga

Simulación	T [s]	I_{pp} [A]	I_{cd} [A]	Rizado
S5	80	1.14	1.5	76%
S6	60	2.34	6.31	37%

Otra importante observación es que el convertidor haya entrado en el modo de conducción discontinua, la alimentación de la carga no se ve afectada ya que el banco de baterías también pudo suplir con la energía necesaria a una carga que demanda constantemente 2 kW.

4.2.3 Tensiones de convertidor y velocidad de rotor

En la Figura 4-12 se muestran las tensiones de entrada y salida del convertidor boost, en donde se puede ver como varía la tensión del banco de baterías (que finalmente es la tensión que posee la carga) y como se carga o descarga según la potencia que reciba desde la etapa correspondiente al convertidor.

Con respecto al funcionamiento en modo discontinuo del convertidor boost en la simulación S3 se puede ver el efecto “vibratorio” en la velocidad del rotor a partir del segundo 100 (Figura 4-13). Este efecto mecánicamente puede traer consecuencias negativas en donde el generador de imanes permanentes resulte dañado.

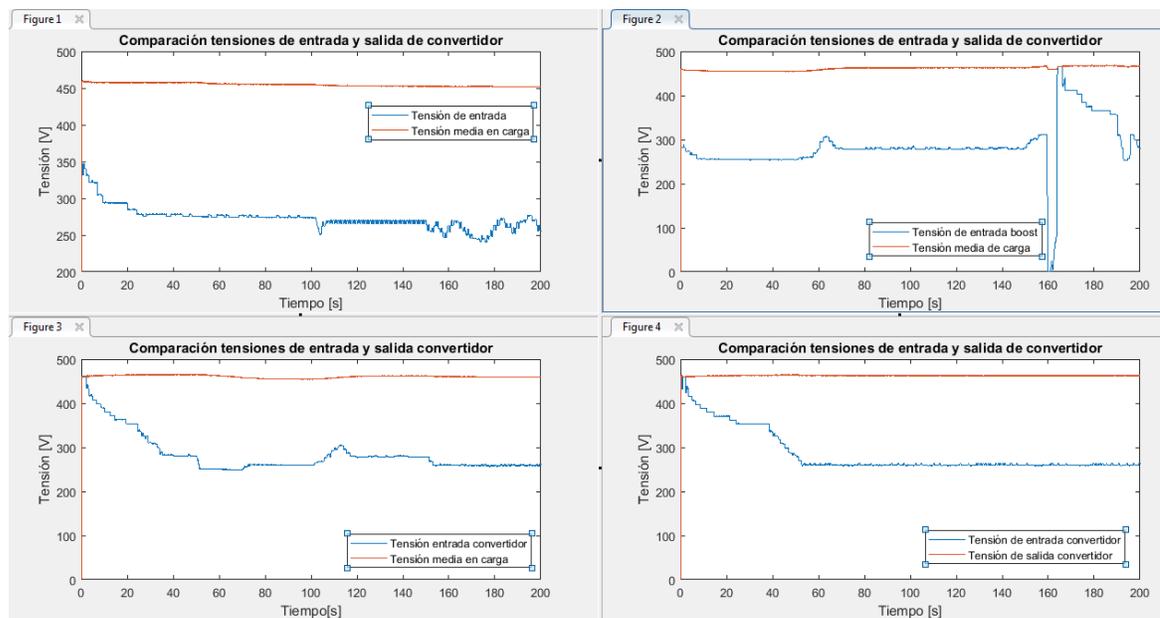


Figura 4-12: Comparación tensiones de convertidor en perfil de vientos

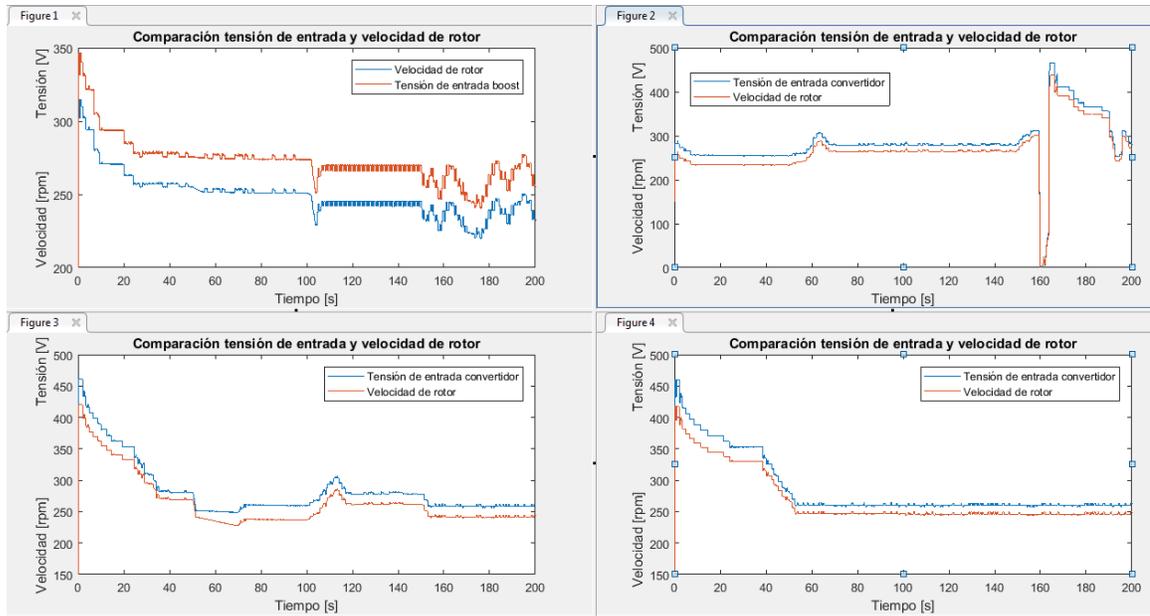


Figura 4-13: Comparación de tensión de entrada y velocidad de rotor en perfil de vientos

4.3 Discusión de resultados

Como fue presentado a principios de este capítulo, los dos tipos de simulaciones a los que fue sometida la red tenían distintos enfoques, por una parte las simulaciones a velocidad de viento fija tenían como objetivo probar la efectividad del sistema poniendo a prueba el control en modo deslizante diseñado para la red, además conocer los tiempos y comportamientos a baja potencia y a carga nominal. Por otra parte, la simulación con el perfil de vientos pone a prueba la adaptabilidad del control y la red ante los cambios o valores de velocidad de viento.

Con respecto a los límites de operación de la red, las simulaciones arrojaron que a velocidades menores a los 7 m/s aproximadamente, el convertidor boost entra en modo de conducción discontinua generando diversas complicaciones en el funcionamiento de la red o provocando que el controlador realice referencias de corriente erróneas, por lo que se puede concluir que el algoritmo MPPT aplicado como control en modo deslizante diseñado para este trabajo de investigación es válido únicamente para el modo de conducción continua del convertidor.

Otra cualidad que llama bastante la atención de la red simulada es el rendimiento general que presenta, sobretodo en la etapa del convertidor que en ciertas condiciones alcanza el 99% de rendimiento lo que representa una buena motivación para fomentar el uso de estos dispositivos en el área de las ERNC, aunque para alcanzar estos niveles de rendimiento también se necesita un buen cálculo y dimensionamiento de los elementos que conformarán el convertidor.

Un punto muy importante también es la calidad de energía que se está suministrando a la carga, los resultados de las gráficas arrojaron un rizado de corriente de nivel considerable, por lo que para cierto tipo de cargas podría ser dañino y se hace necesaria la instalación de filtros a la salida del convertidor para corregir este problema.

A pesar de que el límite inferior de velocidad de viento sigue siendo relativamente alto, una posible solución para este problema es reemplazar el generador eléctrico utilizado por uno directamente conectado a la turbina, evitando el uso de cajas elevadoras (o reductoras) de velocidad y de este modo disminuir pérdidas de potencia para mejorar las características generales de la red.

El fin de estas simulaciones es diseñar un algoritmo MPPT en un controlador que opera en modo deslizante sobre un convertidor boost en un sistema autónomo de generación eólica de baja potencia. Estas simulaciones fueron realizadas en rangos de tiempo muy ajustados en donde los cambios de velocidad de viento ocurrían en muy pocos segundos forzando a la simulación acelerar o frenar bruscamente, lo que en la realidad no debería ocurrir. Este algoritmo plantea una forma de cómo se busca el punto de máxima transferencia de potencia y podrían ser ajustados sus tiempos de muestreo o variando el valor de los saltos de corriente de referencia propios de su comportamiento HCS.

Conclusión

Particularmente en este proyecto de título el abanico de posibilidades en que se puede desarrollar la idea principal es bastante amplio, debido a que los componentes que pueden conformar un sistema autónomo de generación eólica son muy variados y tienen múltiples combinaciones. Lo anterior se confirma al momento de escoger el tipo de turbina eólica; generador asociado a ella; tipo de sistema de almacenamiento de energía o generación distribuida; forma en que se aplica el control en modo deslizante aplicado en el convertidor, que puede ser controlado por corriente o tensión; ser aplicado como control directo sobre el switch, o indirecto como un control PWM.

La definición de un marco referencial que proporcione la información necesaria fue de gran importancia durante la investigación para establecer criterios a la hora de realizar cálculos de cada uno de los componentes de la red propuesta ya que se encuentra en un sistema que varía sus condiciones constantemente.

También resulta crítico el estudio y el correcto modelado del convertidor electrónico utilizado en la red al momento de diseñar el controlador. Tener conocimiento de los efectos que puede causar el control en modo deslizante en el comportamiento del convertidor junto con las limitaciones propias que posee es vital cuando se está realizando el diseño de un controlador junto con su implementación.

Luego de conocer el comportamiento del convertidor con el control aplicado, se abre paso al diseño de la estrategia que permite llevar a la red al punto de máxima transferencia de potencia. El algoritmo que fue implementado en el controlador está inspirado en una técnica utilizada regularmente en sistemas fotovoltaicos, demostrando que los algoritmos no están limitados a un tipo de generación y además que es posible combinarlos o tomar una base para implementar un algoritmo nuevo.

En la etapa de simulación del modelo propuesto, el software utilizado (Simulink) representa una interfaz amigable y de desarrollo sencillo de aplicación. Este software posee distintas opciones para la resolución de modelos matemáticos con distinto grado de precisión según se requiere. Sin embargo, una de las principales limitaciones a la hora de la simulación de esta red fue la cantidad de datos que se debían almacenar, por lo que el modo de resolución utilizado es de carácter sencillo, lo cual arroja ciertas imprecisiones pero con un muy buen acercamiento a lo que se busca en la realidad.

Tal como fue presentado en la discusión de resultados, entre los aspectos destacables que presentó la red se encuentran el rendimiento del convertidor, la rapidez y el bajo error con respecto a la referencia del control. Si bien el control implementado logra cumplir con la premisa de esta investigación, aún existen muchos ámbitos en que se puede seguir avanzando, entre ellos encontramos la calidad de la energía que la red suministra a la carga debido al alto rizado de corriente; diseño de un generador de imanes permanentes creado especialmente para ser acoplado a una turbina eólica; entre otros escenarios en que se pueda aplicar.

Debido a lo anterior, esta investigación forma un precedente sobre el cual se puede trabajar con un alto nivel de proyección. Se mostró que existen diferentes categorías de algoritmos pero que esto no impide la creación o combinación de estas técnicas en la búsqueda de mejores resultados. Además, las simulaciones realizadas permitirían dar pie a una fase experimental con el fin de posicionar el uso del control en modo deslizante como una opción real en redes no sólo eólicas, sino que también se podrían considerar en otras aplicaciones, como las solares.

Nuestro país cuenta con el potencial energético que nos brinda la naturaleza y junto con ello, un gran interés por parte de las políticas gubernamentales, por lo que resulta muy interesante alinearse con este llamado a ser un aporte en la concientización y buscar nuevas formas de generación de energía. Además este tipo de proyectos permite avanzar en el acceso universal a la red eléctrica.

Bibliografía

- [1] B. Wu, L. Yongqiang, N. Zargari y S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, IEEE Press, 2011.
- [2] R. Carriveau, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, Rijeka: InTech, 2011.
- [3] J. A. Carta González, R. Calero Pérez, A. Colmenar Santos y M. A. Castro Gil, *Centrales de energías renovables*, Pearson Prentice Hall, 2006.
- [4] M. Kesraoui, N. Korichi y A. Belkadi, «Maximum power point tracker of wind energy conversion system,» *Renewable Energy XXX*, pp. 1-8, 2010.
- [5] The Mathworks, Inc, *Simscape Power Systems Documentation*.
- [6] M. E. Haque, K. M. Muttaqi y M. Negnevitsky, «Control of a Stand Alone Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator,» *IEEE*, 2008.
- [7] A. Rolán, Á. Luna, G. Vázquez, D. Aguilar y G. Azevedo, «Modeling of a Variable Speed Wind Turbine with a Permanent Magnet Synchronous Generator,» de *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Seoul, 2009.
- [8] M. F. Elmorshedy, S. M. Allam, A. I. A. Shobair y E. M. Rashad, «Voltage and Frequency Control of a Stand-alone Wind-Energy Conversion System Based on PMSG,» de *IEEE*, Sharjah, United Arab Emirates, 2015.
- [9] D. Hart, *Electrónica de Potencia*, Prentice Hall, 2001.
- [10] N. Mohan, T. Undeland y W. Robbins, *Electrónica de Potencia: Convertidores, aplicaciones y diseño*, Mc Graw Hill, 2009.

-
- [11] H. Sira-Ramírez y R. Silva-Ortigoza, *Control Design Techniques in Power Electronics Devices*, Springer-Verlag, 2006.
- [12] J. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, 1991.
- [13] M. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [14] S. Sharma y B. Singh, «Asynchronous Generator with Battery Storage for Standalone Wind Energy Conversion System,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n° 4, 2014.
- [15] Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, «Explorador de Energía Eólica,» [En línea]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>. [Último acceso: 2017].
- [16] S. S. Mali y B. E. Kushare, «MPPT Algorithms: Extracting Maximum Power from Wind Turbines,» *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, vol. 1, n° 5, 2013.
- [17] M. Hlaili y H. Mechergui, «Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems,» *International Journal of Photoenergy*, vol. 2016.

A Datos de perfil de vientos

En esta sección se adjuntan las tablas con los datos correspondientes al modelo de vientos utilizado en la simulación. Con los datos de las tablas de datos A-1 y A-2 se pudo realizar el modelo que finalmente fue simulado.

Tabla A-1: Datos básicos viento

Mes	Medio Diario m/s	Mínimo Diario m/s	Máximo Diario m/s	Variabilidad m/s
Enero	9.8 ± 1.8	4.9 ± 0.9	14.5 ± 2.6	2.8 ± 1.0
Febrero	8.6 ± 1.6	4.6 ± 0.9	12.2 ± 2.3	3.2 ± 1.2
Marzo	9.0 ± 1.6	4.4 ± 0.8	13.5 ± 2.4	2.6 ± 0.9
Abril	9.1 ± 1.7	5.0 ± 0.9	13.5 ± 2.5	3.0 ± 1.1
Mayo	10.6 ± 1.9	5.9 ± 1.1	15.1 ± 2.7	3.2 ± 1.1
Junio	9.3 ± 1.7	5.3 ± 1.0	13.5 ± 2.5	2.0 ± 0.7
Julio	8.4 ± 1.5	4.3 ± 0.8	11.9 ± 2.1	2.7 ± 1.0
Agosto	9.3 ± 1.7	5.1 ± 0.9	13.4 ± 2.4	3.8 ± 1.4
Septiembre	8.8 ± 1.6	5.0 ± 0.9	12.6 ± 2.3	4.0 ± 1.5
Octubre	9.6 ± 1.7	5.1 ± 0.9	14.3 ± 2.6	3.0 ± 1.1
Noviembre	9.5 ± 1.7	5.3 ± 1.0	13.4 ± 2.4	3.0 ± 1.1
Diciembre	10.9 ± 2.0	6.4 ± 1.1	15.4 ± 2.8	2.6 ± 0.9
TODOS	9.4 ± 0.5	5.1 ± 0.3	13.6 ± 0.7	3.1 ± 0.9

Tabla A-2: Velocidad del viento según mes y hora del día

Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
23:00	10.1	8.6	9.2	9.5	11.1	9.6	8.1	9.2	8.9	9.6	9.3	10.4
22:00	10.0	8.4	9.2	9.7	11.0	9.3	8.0	9.3	9.0	9.5	9.2	11.0
21:00	9.7	8.4	8.6	9.7	11.0	9.5	8.3	9.6	8.9	9.9	9.3	10.9
20:00	10.2	8.5	9.2	9.3	10.5	9.9	8.0	9.7	8.8	10.4	8.9	10.5
19:00	10.1	8.4	8.7	9.1	10.5	9.1	8.4	10.1	8.7	9.7	9.2	10.7
18:00	10.3	8.5	8.5	9.1	10.8	8.6	8.6	10.0	8.7	9.7	9.2	11.3
17:00	9.9	8.7	8.3	9.0	10.4	9.0	8.4	9.8	8.7	9.3	9.3	11.0
16:00	10.4	8.8	8.8	9.5	10.6	8.9	8.6	9.5	8.6	9.6	9.5	11.4
15:00	10.4	9.3	8.9	9.3	11.0	8.7	8.2	9.9	8.9	10.0	9.9	11.3
14:00	9.7	8.8	9.1	9.3	10.5	8.4	8.3	9.9	8.6	9.6	9.8	11.5
13:00	10.1	8.9	9.2	9.3	9.9	8.6	8.6	9.6	8.8	9.8	9.5	10.9
12:00	9.5	8.3	9.1	9.1	9.6	8.8	8.7	9.0	9.0	9.8	9.9	10.7
11:00	9.3	8.0	9.0	8.8	10.2	9.0	9.0	8.8	9.1	9.6	9.7	10.7
10:00	9.7	8.4	9.3	8.9	10.2	9.2	8.8	8.6	8.5	9.1	9.9	10.8
09:00	9.5	8.6	9.4	9.0	10.3	9.0	8.9	9.2	8.0	9.0	9.8	11.1
08:00	9.0	8.8	9.4	8.8	10.8	9.3	8.5	9.6	8.0	9.1	9.8	11.4
07:00	9.2	8.9	9.8	9.2	10.9	9.8	8.4	9.3	8.5	9.2	9.6	11.0
06:00	8.8	9.0	9.5	9.4	11.0	9.5	8.1	9.0	8.8	9.7	9.7	10.9
05:00	9.7	8.8	9.2	8.9	10.8	9.7	8.2	9.2	8.9	9.7	9.7	10.6
04:00	10.2	8.3	8.4	9.1	11.5	10.2	8.1	9.1	8.7	9.9	9.7	10.9
03:00	10.1	8.7	8.3	8.7	10.6	10.1	8.3	9.6	9.3	9.7	9.4	11.1
02:00	9.9	8.8	8.2	8.1	10.4	9.5	8.9	8.9	9.3	9.7	9.2	10.6
01:00	10.2	8.7	8.7	8.4	10.9	9.4	8.8	8.6	8.9	9.9	9.6	10.6
00:00	10.1	8.7	8.8	9.4	10.8	9.7	8.3	8.8	8.8	9.4	9.7	10.1

B Código Algoritmo

En este apéndice se presenta el código utilizado en el bloque del algoritmo implementado en el controlador de la red. Posee ciertos criterios en caso de que las mediciones o el sistema evolucionen de forma acelerada.

```
1 function Iref = MPPT(on,il,vd)
2 d=0.5; %definir paso de referencia
3
4 %inicializar algoritmo
5 persistent Iref1 pd1;
6 if isempty(Iref1) %Dar valor de referencia cuando esté vacío
7     Iref1=3;
8     pd1=0;
9 end
10
11 if on~=0 %El algoritmo inicia cuando la entrada esta activada
12 %Se calcula potencia medida y compara con potencia anterior
13 p=il*vd;
14 dp= p - pd1;
15
16 if dp ~= 0
17     if dp < 0
18         Iref=Iref1-d; %si potencia es menor se vuelve a la Iref anterior
19     else
20         Iref=Iref1+d; %si potencia es mayor se toma un nuevo Iref
21     end
22 else
23     Iref=Iref1; %si la diferencia de potencia es 0, la referencia se mantiene
24 end
25 %códigos en caso que diferencia con corriente medida sea muy grande
26 if abs((Iref-il)*10) > 5
27     Iref=il;
28 end
29 if Iref < 1
30     Iref=1;
31 end
32 Iref1=Iref;
33 pd1=p;
34 end
```