



**MODELACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA HIBRIDO FOTOVOLTAICO-
EÓLICO CONECTADO A LA RED**

OTNIEL DAVID PIÑERES CUETTO

JESITH PÉREZ PÉREZ

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Riohacha, Colombia

2022

**MODELACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA HIBRIDO FOTOVOLTAICO-
EÓLICO CONECTADO A LA RED**

OTNIEL DAVID PIÑERES CUETTO

JESITH PÉREZ PÉREZ

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

Mag. Bashir Yacub Bermúdez

Bashir.yacub@uan.edu.co

Área:

Ciencias Naturales, Exactas y Aplicadas

Línea de Investigación:

Energías Renovables y alternativas.

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Riohacha, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo integral de grado titulado
Modelación Y Control De Un Sistema Hibrido
Fotovoltaico eólico Conectado A La Red,
cumple con los requisitos para optar al título
de: **Ingeniero Electromecánico.**

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Riohacha - La Guajira, 03 de mayo de 2022.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
RESUMEN.....	12
<i>ABSTRACT</i>	13
1 GENERALIDADES.....	14
1.1 <i>Planteamiento del Problema</i>	14
1.2 <i>Justificación</i>	16
1.3 <i>Objetivos</i>	17
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	17
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	17
2 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA.....	19
2.1 <i>Potencial Solar del Municipio de Riohacha</i>	19
2.2 <i>Potencial Aerodinámico De La Zona De Referencia</i>	23
2.2.1 <i>Caracterización De Velocidad Del Viento</i>	23
2.2.2 <i>Dirección Del Viento</i>	25
2.2.3 <i>Factores Que Influyen En El Modelo De Potencial Energético</i>	26
3 IDENTIFICACION DEL SISTEMA HIBRIDO	30
3.1 <i>Energía Solar Fotovoltaica</i>	30
3.2 <i>Energía Eólica</i>	32
3.3 <i>Sistema Solar - Eólico</i>	33
4 DISEÑO DEL SISTEMA HIBRIDO	34
4.1 <i>Selección del Panel Fotovoltaico</i>	34
4.2 <i>Selección del Aerogenerador</i>	37
5 MODELAMIENTO DEL SISTEMA HIBRIDO	39
5.1 <i>Ecuaciones Fundamentales del Sistema Híbrido</i>	39
5.1.1 <i>Ecuaciones Fundamentales Panel Fotovoltaico</i>	39
5.2 <i>Ecuaciones Fundamentales del Aerogenerador</i>	42
6 DISEÑO DEL CONTROLADOR	49
6.1 <i>Tipos de Convertidores</i>	49
6.1.1 <i>Convertidor Boost</i>	49
6.1.2 <i>Convertidor Buck</i>	50
6.1.3 <i>Convertidor Buck – Boost</i>	50

6.2	<i>Estrategias de Control</i>	51
6.3	<i>Control en Sistemas conectados a la Red</i>	52
6.4	<i>Control del Sistema Híbrido Basado en MPC</i>	53
6.4.1	Definición del Controlador Predictivo Basado en Modelo MPC.....	53
6.4.2	MPC Aplicados a Convertidores	58
6.4.3	Diseño del Convertidor Boost	59
	• Inductor	60
6.4.4	Estrategias de control con el MPC	62
	• Seguimiento del punto máximo de potencia con el MPC	62
7	SIMULACION Y RESULTADOS	64
7.1	<i>Esquemas De Simulación Sistema Híbrido</i>	64
7.1.1	Esquemas De Simulación Del Panel Fotovoltaico	64
7.1.2	Esquemas de Simulación del Aerogenerador	65
7.2	<i>Esquema de simulación del Controlador MPC</i>	66
7.3	<i>Escenario de Prueba</i>	67
7.3.1	Simulación del sistema híbrido	67
7.3.2	Simulación con el controlador MPC	68
7.3.3	Simulación del sistema híbrido con la estrategia de P&O y el controlador MPC.....	70
	CONCLUSIÓN	74
	BIBLIOGRAFÍA	75
	ANEXOS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Radiación Solar en Riohacha.....	20
Figura 2-2: Temperatura Periodo 2021 en el Municipio de Riohacha.....	21
Figura 2-3: Precipitación en el Periodo 2021 del Municipio de Riohacha.....	21
Figura 2-4: Resumen de Periodo 2021 en el Municipio de Riohacha.....	23
Figura 2-5: Velocidad y Dirección del Viento en el Municipio de Riohacha.....	24
Figura 2-6: Conglomerado de Velocidad del Viento Durante el Año 2021.....	24
Figura 2-7: Dirección el Viento Durante el Año 2021.....	25
Figura 2-8: Descripción de la Radiación.....	27
Figura 2-9: Descripción de la Temperatura Vs Radiación.....	28
Figura 2-10: Descripción Evaporación Humedad del Viento.....	29
Figura 2-11: Descripción Velocidad del Viento.....	29
Figura 2-12: Curva de I-V del Panel Fotovoltaico de 365W.....	36
Figura 2-13: Curvas Potencia Vs Velocidad del Viento del Aerogenerador.....	38
Figura 3-1: Modelo de Circuito Electrónico Panel Solar, en Matlab.....	39
Figura 3-2: Respuesta de la Función de Trasferencia del Panel Fotovoltaico.....	41
Figura 3-3: Diagrama de Cuerpo Libre Aerogenerador.....	42
Figura 3-4: Diagrama Del Cambio de Giro de Engranajes.....	45
Figura 3-5: Respuesta al Paso de la Función de Transferencia.....	48
Figura 3-6: Modelo de esquema de convertidor Boost.....	49
Figura 3-7: Modelo de esquema de convertidor Buck.....	50
Figura 4-1: Modelo de esquema de convertidor Buck- Boost.....	50

LISTA DE TABLA

Tabla 2-1: Cuadro Comparativo Entre Fabricantes de Paneles Solares.....	35
Tabla 2-2: Especificaciones Técnicas de los Paneles Solares.....	35
Tabla 2-3: Cuadro Comparativo Aerogeneradores	37
Tabla 2-4: Especificaciones Técnicas de los Aerogeneradores.	38

Dedico a mi padre, Otniel Piñeres Saquea, a mi madre Yadira Cuetto, por inculcarme la importancia del estudio y el deseo de aprovecharlo, que con su amor y perseverancia me han apoyado, Este trabajo no habría sido posible sin todo el amor que me mostraron en todo el proceso.

Otniel David Piñeres Cuetto

Dedico con todo mi corazón este trabajo a mi madre y a mi hija, Quienes han sido el motor que impulsa mi vida, por las cuales me supero día a día, una me dio la bendición la vida, me protegió y me saco adelante, sola, por el camino del bien. Por la cual quiero ser un ejemplo y motivación para Liz Andrea mi hija, las dos mujeres que más amo.

Jesith Pérez perez

Agradecimientos

Agradecer primeramente a Jehová Dios por regalarme a mis padres Otniel y Yadira, los cuales me impulsaron a cumplir cada una de mis metas, un agradecimiento a todos mis compañeros, docentes y tutores que con sus instrucciones ayudaron a cumplir este trabajo y motivaron el deseo de aprender cada día más.

Otniel David Piñeres Cuetto

A la primera persona, que quiero agradecer es a Dios por darme una madre y unas tías que me enseñaron el valor de las cosas, el esforzarme y luchar por mis sueños y amar mis estudios, a mi madre por ser mi ejemplo de superación, por proporcionar la mejor educación y tantas lecciones de vida, a todos los docentes que estuvieron presentes en el camino recorrido, al tutor que nos tuvo paciencia y nos ayudó con sus conocimientos, a mis compañeros Jose, Otniel, Yusneider, Luis quienes fueron incondicionales en este proceso amigos y familiares los cuales regalaron una voz de aliento y motivación en este proceso.

Jesith Pérez Pérez

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el uso de energías renovables para la generación de energía eléctrica debido a que se ha convertido en una de las soluciones más viables para sustituir las formas tradicionales de generación de energía ya que con el pasar de los años van desgastando el medio ambiente y contaminándolo cada vez más. Además de solucionar la falta de abastecimiento de energía eléctrica que se tiene actualmente debido a que la población cada vez crece y la capacidad instalada que se tiene no logra cubrir todo el territorio nacional.

El funcionamiento de una célula fotovoltaica en donde agrupadas conforman un panel fotovoltaico, está definido por sus curvas características de corriente vs tensión y potencia vs tensión, las cuales muestran el comportamiento de dicho elemento ante diferentes condiciones de trabajo. Una variable importante en este sistema es el punto de máxima potencia (MPP), donde la potencia extraída de la célula fotovoltaica llega a ser la máxima. El valor de la potencia máxima se obtiene al multiplicar el voltaje en el punto de máxima potencia por la corriente en dicho punto.

Para llevar el control del seguimiento del MPP en sistemas fotovoltaicos es un reto debido a los cambios que se presentan en las condiciones ambientales debido a que estas cambian continuamente durante el día, ya sea por el paso de nubes, vientos, lluvias, etc. Al cambiar dichas condiciones cambian las curvas características del sistema las cuales no son lineales. Por lo tanto, no se puede realizar el seguimiento del punto máximo de potencia con algoritmos convencionales por esto se utilizarán técnicas de control tales como La perturbación y observación P&O y el control predictivo MPC.

La técnica P&O es muy utilizada en sistemas comerciales ya que es fácil de implementar debido a que no necesita condiciones de radiación y temperatura, el cual consiste en que se perturbe

el voltaje de trabajo del panel solar en una cierta dirección y observar cómo se comporta la potencia máxima. Si se llega a incrementar la potencia significa que el punto de operación del panel se ha logrado mover hacia el MPP, por lo tanto, la tensión de operación se modifica en la misma dirección. En el caso contrario si llega a disminuir la potencia máxima, el punto de operación se ha movido para el lado contrario.

Por otro lado, el control predictivo MPC es una estrategia de optimización que hace uso de un modelo del proceso para predecir el efecto de la acción de control sobre una planta, en este caso el sistema híbrido. Para esto se tendrán en cuenta para esta técnica de control como variables la tensión, corriente, velocidad del viento, potencia máxima que es la que se requiere optimizar para poder tener un mejor aprovechamiento y eficiencia de sistema híbrido.

Al diseñar un sistema híbrido solar eólico se aprovechan al máximo todos los recursos renovables disponibles como lo es el viento y el sol, ya que al integrar estos dos sistemas en los días que se tienen nublados en donde no se aprovecha la luz solar, los aerogeneradores funcionan adecuadamente. Mientras que en los días soleados donde se tiene poco viento, son provechosos para los paneles fotovoltaicos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación estudia el modelado y simulación de un sistema híbrido conformado por paneles fotovoltaicos y aerogeneradores propuestos para su estudio en una zona de referencia la cual se seleccionó el municipio de Riohacha, La Guajira.

El trabajo está comprendido primeramente en realizar el dimensionamiento y selección de equipos que conformaran el sistema híbrido teniendo en cuenta las condiciones dadas de la zona, para esto se revisan las especificaciones técnicas de los equipos que ofrecen diferentes fabricantes. En la segunda etapa del trabajo se realiza el modelado matemático de cada sistema tanto el eólico como el solar, teniendo en cuenta diversas ecuaciones fundamentales de la electricidad como lo es la ley de ohm, la ley de tensiones y corrientes de Kirchhoff las cuales permiten el modelado del sistema fotovoltaico, también fueron utilizadas ecuaciones de la física como la energía, el torque, la velocidad angular, por medio de estas se realizó el modelado del aerogenerador, en donde dichas ecuaciones mencionadas describen el comportamiento de cada sistema. Y por último se realiza la simulación del sistema híbrido utilizando una técnica de control predictivo MPC, en donde este sistema de control proporciona un seguimiento al voltaje de referencia al momento que se genera la máxima potencia. El sistema híbrido está conectado a la red o carga a través de un convertidor DC/DC Boost. El controlador MPC proporciona el ciclo de trabajo apropiado al convertidor CC/CC para que el sistema híbrido genere la máxima potencia. El resultado de la simulación proporciona un buen seguimiento del punto de máxima potencia (MPP).

Palabras claves: control predictivo, modelado, sistema híbrido, sistema fotovoltaico, sistema solar-eólico

ABSTRACT

This research work studies the modeling and simulation of a hybrid system made up of photovoltaic panels and wind turbines proposed for study in a reference area which was selected in the municipality of Riohacha, La Guajira.

The work is comprised firstly in carrying out the sizing and selection of equipment that will make up the hybrid system taking into account the given conditions of the area, for this the technical specifications of the equipment offered by different manufacturers are reviewed. In the second stage of the work, the mathematical modeling of each system, both wind and solar, is carried out, taking into account various fundamental equations of electricity such as Ohm's law, Kirchhoff's law of voltages and currents, which allow the modeling of the photovoltaic system, physics equations such as energy, torque, angular velocity were also used, by means of these the modeling of the wind turbine was carried out, where said mentioned equations describe the behavior of each system. And finally, the simulation of the hybrid system is carried out using a predictive control technique MPC, where this control system provides a follow-up to the reference voltage at the moment that the maximum power is generated. The hybrid system is connected to the network or charging through a DC/DC Boost converter. The MPC controller provides the proper duty cycle to the DC/DC converter for the hybrid system to generate maximum power. The simulation result provides a good maximum power point (MPP) tracking.

Keywords: predictive control, modeling, hybrid system, photovoltaic system, solar-wind system

1 GENERALIDADES

1.1 Planteamiento del Problema

Debido a las grandes densidades de población en las áreas urbanas, el 75% de las fuentes de energía mundiales se consumen en estas áreas densamente pobladas como se esperaba. Debido a que el 60-80% de la energía mundial se ha consumido en áreas urbanas, el 75% de las emisiones de Dióxido de carbono se producen a través de estas áreas. Debido a que la densidad de población en las áreas urbanas ha ido aumentando rápidamente, se estima que para el año 2050, el 70% de la población total vivirá en áreas urbanas y como resultado de esto, se espera que la tasa de consumo de energía sea mayor aumentado un 80% más [12]. Por lo tanto, la promoción del uso de pequeños sistemas eólicos-solares en áreas urbanas tiene una importancia significativa.

Los Sistemas de Energía Híbridos Renovables, están compuestos por dos o más generadores de energía, y en la mayoría de los casos se utilizan generalmente fuera de la red eléctrica. Generalmente se utiliza un generador convencional alimentado con diésel, junto con un generador asociado a una fuente de energía renovable, como, por ejemplo: la solar, eólica, o incluso solar eólica. Los sistemas a base de sistema solar o eólica son de mayor costo que un generador a base de diésel, sin embargo, esto se reduce en los costos de mantenimiento y operación para los sistemas de energías renovables.

Los sistemas híbridos deben de llenar el criterio de modularidad, robustez y simplicidad, además de requerir bajo mantenimiento. Estos combinan los sistemas de fuentes alternativas junto con baterías para almacenamiento de energía, que se utilizan para almacenaje de energía, y equipo de condicionamiento de potencia, que se utilizan para mantener la calidad de la potencia de energía [10].

En la actualidad muchos de los países en desarrollo cuentan con regiones en las que se pueden aprovechar recursos eólicos, hidráulicos, solar y biomasa. Una de las mayores ventajas de los sistemas híbridos renovables es que permite integrar las fortalezas, tanto las energías convencionales como las renovables, logrando así reducir la dependencia de la importación energética. Los elementos que maneja el análisis de este proyecto se limitan a un sistema fotovoltaico, eólico y almacenamiento de energía, sin embargo, el término de sistemas híbridos puede involucrar el uso de otros sistemas de generación.

¿Cómo modelar y simular este tipo de sistemas garantizando su eficiencia y estabilidad? Uno de los mayores problemas que se presentan con la generación de energía eléctrica convencional es que no se logra abastecer a todas las comunidades, además en algunas zonas la calidad del servicio no es constante. Por esto las energías renovables como la eólica y solar se han convertido en una de las nuevas alternativas para poder dar solución a la mejoría del servicio eléctrico. Por medio de simulaciones se puede conocer el comportamiento de los sistemas ante las posibles perturbaciones y condiciones reales de la zona mediante simulaciones controlando las variables de tensión, corriente, velocidad del viento y el punto máximo de potencia MPP, para lograr obtener una mejor eficiencia y estabilidad del sistema, por medio de técnicas de control como el control predictivo por modelos MPC el cual utiliza un modelo matemático que permite controlar y predecir el comportamiento de los sistemas. Por medio del estudio del comportamiento de los sistemas híbridos junto con las técnicas de control que permitirían su funcionamiento más óptimo se lograra así direccionar a la implementación de estos sistemas como nuevas tecnologías en conjunto con las técnicas de control dando resultados a la mejora de la calidad del servicio eléctrico para los usuarios.

1.2 Justificación

Un sistema híbrido es un sistema dinámico el cual muestra un comportamiento dinámico continuo y discreto, un sistema que puede fluir (descrito por una ecuación diferencial) y saltar (descrito por una máquina de estado o autómeta). Un sistema híbrido tiene la ventaja lograr abarcar la clase más amplia de sistemas dentro de su estructura, permitiendo tener una mayor flexibilidad en el modelado de fenómenos dinámicos. Tal como exponen múltiples expertos en energía renovable, un pequeño sistema eléctrico "híbrido" que combina tecnologías de energía eólica doméstica y energía solar eléctrica doméstica (fotovoltaica o PV) ofrece varias ventajas sobre cualquier sistema único [7].

En gran parte de la Costa caribe, la velocidad del viento es baja en el verano, cuando el sol brilla más y durante más tiempo. El viento es fuerte cuando hay menos luz solar disponible. Debido a que las horas pico de funcionamiento de los sistemas eólicos y solares ocurren en diferentes momentos del día y del año, es más probable que los sistemas híbridos produzcan energía cuando la necesite [8].

Muchos sistemas híbridos son sistemas autónomos, que operan "fuera de la red", no conectados a un sistema de distribución de electricidad. Para los tiempos en los que ni el viento ni el sistema solar están produciendo, la mayoría de los sistemas híbridos proporcionan energía a través de baterías y / o un generador de motor alimentado por combustibles convencionales, como el diésel. Si las baterías se agotan, el generador del motor puede proporcionar energía y recargar las baterías [8].

Con la implementación de técnicas de control en sistemas híbridos se busca mejorar el comportamiento de dicho sistema, logrando aumentar la velocidad de respuesta y la estabilidad de este por medio de controladores robustos los cuales mejoran el comportamiento dinámico del

sistema. Las técnicas de control que han sido más implementadas son la lógica difusa la cual es un control de rango a rango. En donde la entrada es el error en la variable controlada y la salida es la magnitud de control. Sin embargo, la salida de un control difuso se deriva de las difusiones de entradas y salidas utilizando las funciones de pertenencia asociadas. Existen muchas más técnicas de control, pero en el desarrollo de este trabajo como se busca controlar la corriente y tensión del sistema para lograr estudiar el comportamiento del punto máximo de potencia se utilizará la técnica de control predictiva como lo es el controlador predictivo por modelo MPC con el cual se obtiene mejores resultados al momento de buscar la estabilidad de un sistema. Por medio de las simulaciones se obtendrán resultados los cuales nos mostraran el comportamiento de dicho sistema, empezando como base que servirán para futuros estudios en donde se pueda implementar este tipo de sistemas en las diversas zonas del país que no cuenten con el servicio de energía eléctrica o deseen tener una mejor calidad del servicio.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Modelar y controlar un sistema fotovoltaico-eólico conectado a la red

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Modelar el comportamiento del sistema híbrido solar-eólico mediante ecuaciones fundamentales que describen los fenómenos presentes en el sistema y obtener las variables controlables del sistema.
2. Implementar las técnicas de control MPC para intensificar la eficiencia del sistema solar-eólico potencializando su velocidad de respuesta y estabilidad.

3. Simular el funcionamiento del sistema en Matlab y simulink evaluando el controlador propuesto para mejorar la eficiencia en las condiciones modeladas

2 CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA

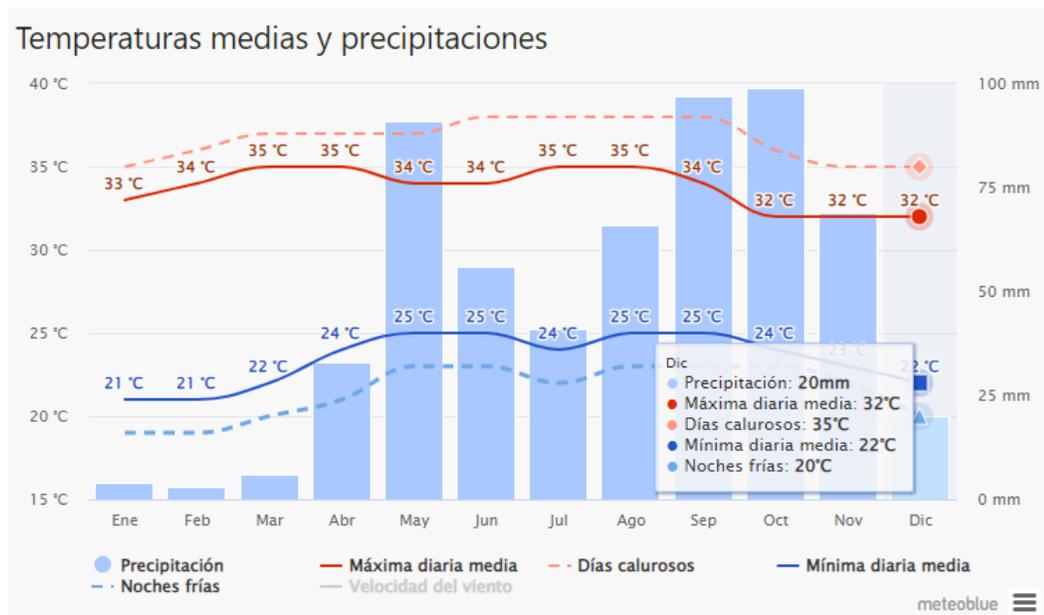
En el siguiente apartado es necesario definir una zona de referencia para poder llevar a cabo la simulación del modelado del sistema híbrido solar- eólico, en el cual se deben tomar diferentes condiciones climáticas presentes en la zona tales como la velocidad del viento y la irradiación, que serán variables claves para el estudio y modelado del sistema permitiendo corroborar su funcionamiento. En el presente trabajo se seleccionó la ciudad de Riohacha, La Guajira como zona de referencia debido a que brinda buenas condiciones climáticas, teniendo en cuenta que es una zona con altas irradiaciones solares y fuertes vientos los cuales se mantienen constantes en la mayoría de los periodos del año.

2.1 Potencial Solar del Municipio de Riohacha

Gracias a su posición geográfica, Colombia posee durante todo el año una radiación solar constante, principalmente en las regiones como La Guajira, Atlántico y Antioquia, siendo un elemento clave el cual le permite a Colombia convertirse en un generador de energía solar. Se registra que los efectos de la energía solar duran hasta más de 10 horas diarias, permitiéndole al país implementar parques solares que lleguen a generar energía solar durante todo el año, ofreciendo una mayor capacidad instalada al país, el cual mejorara la calidad del servicio eléctrico para los usuarios.

Para el diseño del sistema híbrido es importante conocer el potencial energético de la zona de referencia en estudio en este caso el municipio de Riohacha, La Guajira. En el cual se debe estimar la radiación solar y el tiempo que se tiene disponible para utilizar en el sistema. Para esto se debe calcular la radiación por cantidad de horas, por medio de la herramienta MeteoBlue, el cual ofrece diferentes mapas detallando la radiación solar, precipitación, temperaturas de todas las zonas del país, los cuales nos permiten utilizar esos datos como se observa en la figura 2-1 [7].

Figura 2-1: Radiación Solar en Riohacha

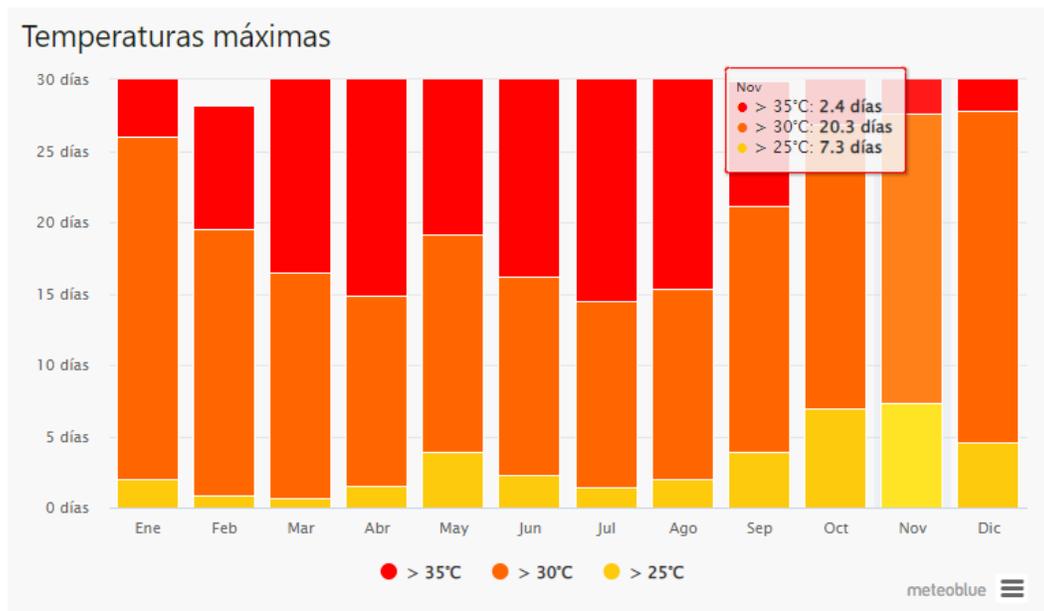


Fuente: Meteoblue.

La temperatura y radiación son variables fundamentales en el modelado de un sistema híbrido. La temperatura es un factor que afecta en la selección del panel solar fotovoltaico ya que cada fabricante ofrece condiciones diferentes, se puede encontrar que en algunos paneles solares bajan su efectividad de generación al tener mayor temperatura, en las curvas de corriente vs voltaje se determina el punto de corte y se necesita precisar de la misma forma que la radiación la cantidad de variación de temperatura en horas y días del municipio de Riohacha [8].

Para obtener la temperatura de trabajo para el panel fotovoltaico que se encuentra en la zona de referencia a estudiar por medio de la caracterización de la temperatura en el municipio de Riohacha, lleva a identificar la precipitación donde esta es inversamente proporcional a la temperatura.

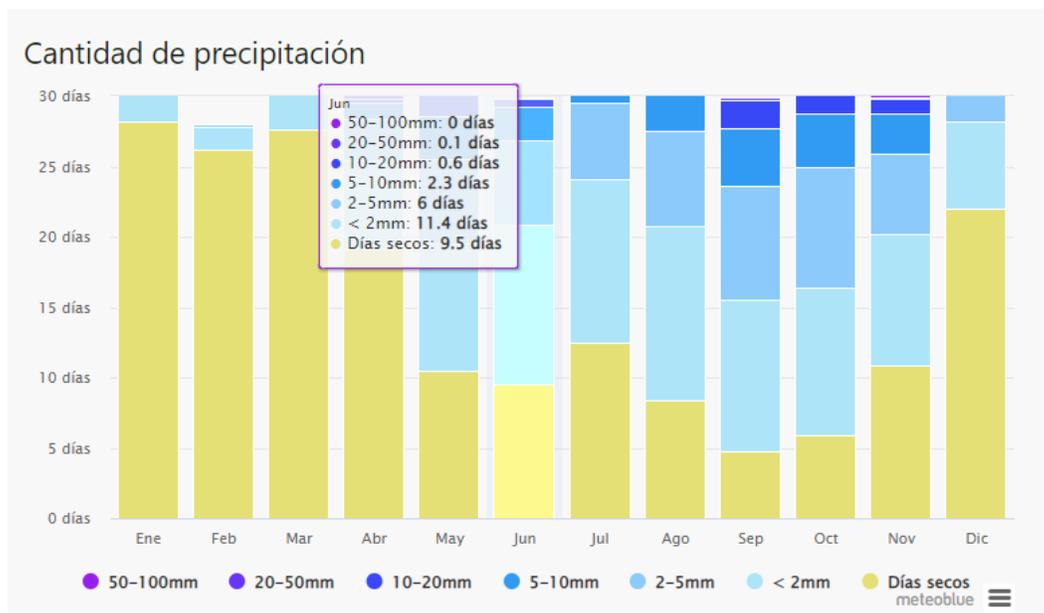
Figura 2-2: Temperatura Periodo 2021 en el Municipio de Riohacha.



Fuente: Meteoblue

En la Figura 2-2 se encuentra la relación de la precipitación del año 2021 en el cual se evidencia como en la mayoría de los meses prevalece los días secos por ejemplo en junio 9.5 días fueron secos y en 6 días el índice de precipitación fue entre 2-5mm como se puede observar en la figura 2-3. El índice de radiación radica en que utiliza únicamente la precipitación para su cálculo y es efectivo para analizar los períodos y ciclos húmedos y secos. Los registros de precipitación se ajustan a una distribución de probabilidades y a continuación se transforman en una distribución normal. Los valores positivos/negativos del índice de radiación indican que la precipitación es mayor/menor que la mediana

Figura 2-3: Precipitación en el Periodo 2021 del Municipio de Riohacha.



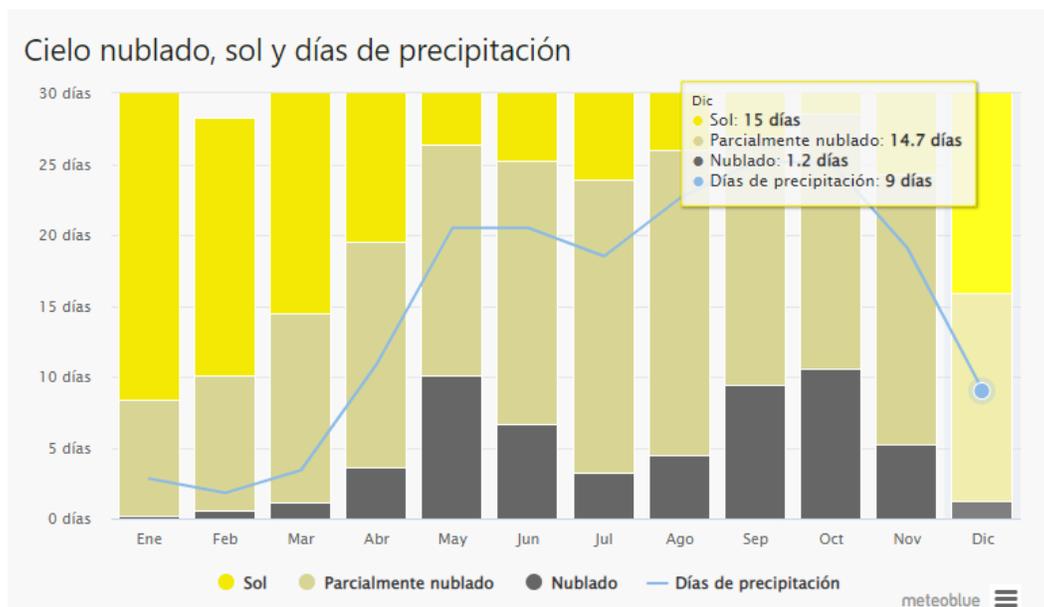
Fuente: Meteoblue.

En la figura 2-3 Se puede constatar que los meses con mayor precipitación fueron agosto, septiembre y octubre, en donde los días secos fueron muy bajos, sin superar los 10 días, a pesar de esto, las precipitaciones se mantuvieron en el promedio de 5-10 mm pocos días se logró superar ese valor. Enero y marzo son los meses más secos del año correspondiendo así a las temperaturas más altas, en los meses de alta precipitación la temperatura oscila entre 25 y 35 °C en promedio. La temperatura de diseño para tener trabajo durante todo el año es estipula entre 25 y 30 °C.

En la figura 2-4 se observa cómo se obtener el promedio de días en los que se observa precipitaciones en el mes, así mismo se tiene los días nublados, parcialmente nublados y de sol, con todo esto se conoce el comportamiento de forma más reducida.

Existen condiciones que directamente llegan a influir sobre el sistema, como se menciona anteriormente, la precipitación como que se encuentre el cielo nublado afecta el rendimiento del sistema fotovoltaico ya que la cantidad de electricidad producida por estos será inferior al de los días soleados y sin nubes.

Figura 2-4: Resumen de Periodo 2021 en el Municipio de Riohacha



Fuente: Meteoblue.

2.2 Potencial Aerodinámico De La Zona De Referencia

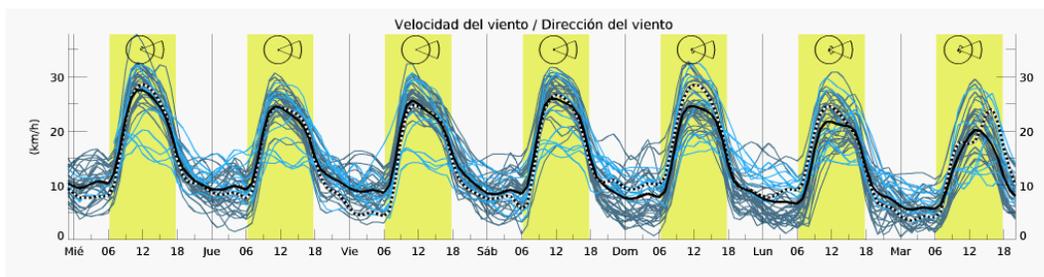
2.2.1 Caracterización De Velocidad Del Viento

La caracterización de la zona de estudio es importante para la presente investigación debido a que se toman valores de referencia de las condiciones climáticas de la zona para poder realizar el diseño y modelado del sistema, al ser un sistema híbrido este compuesto por paneles fotovoltaicos y aerogenerador, por esto se realiza la caracterización de los sistemas por separado. En el punto anterior se realizó el estudio del potencial solar donde este incide de manera directa en los paneles fotovoltaicos, por ende, se prosigue a realizar el estudio del aerogenerador teniendo en cuenta las condiciones de la velocidad del viento, ya que esta condición es fundamental para la selección de dicho equipo que se tendrá de referencia al momento de realizar la simulación.

Para realizar la caracterización del potencial aerodinámico en el municipio de Riohacha, se toma como referencia 10 mts de altura y se evalúa los siguientes factores la velocidad del viento y

las variaciones abruptas de la velocidad por lapsos de tiempo reducidos, en la figura 2-5 se observan las muestras tomadas en días específicos del año.

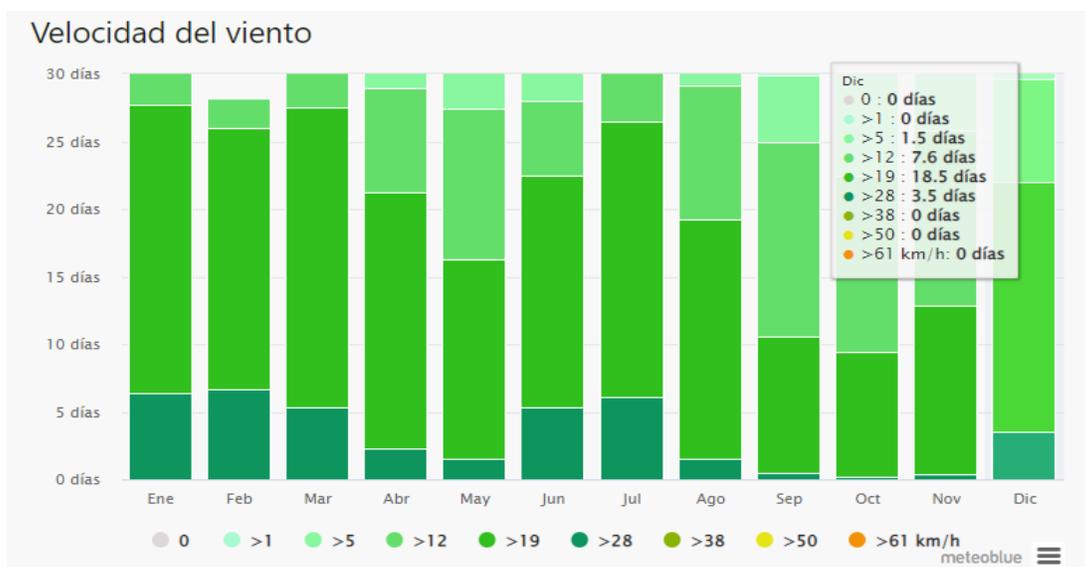
Figura 2-5: Velocidad y Dirección del Viento en el Municipio de Riohacha



Fuente: Meteoblue.

Al tomar los datos se obtiene uno fundamental el cual es la velocidad mínima del viento que se registró durante el año 2021, en donde la velocidad promedio mínima registrada fue de 3.6 m/s, este es un factor determinante para el diseño debido que se debe conocer para saber seleccionar el aerogenerador el cual debe poseer una velocidad de arranque menor que la velocidad mínima que se tuvo en promedio la zona durante el año.

Figura 2-6: Conglomerado de Velocidad del Viento Durante el Año 2021.

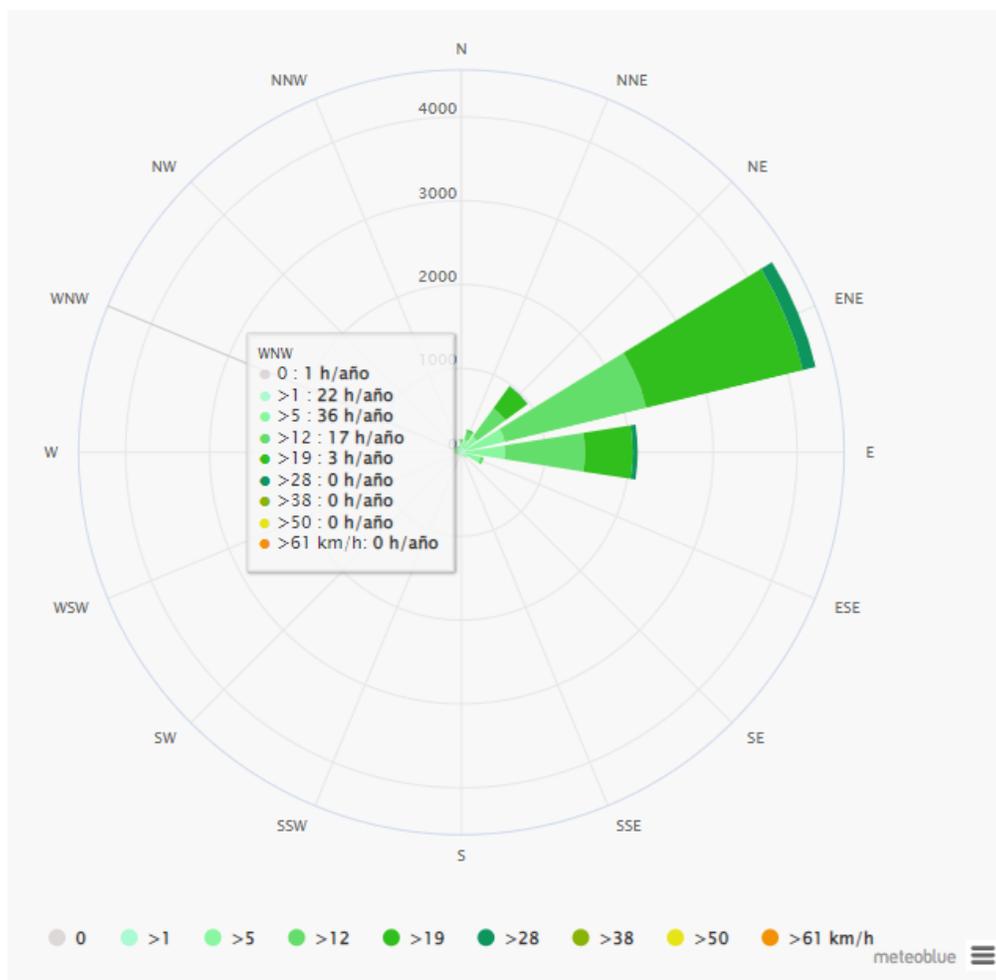


Fuente: Meteoblue.

2.2.2 Dirección Del Viento

Al utilizar aerogeneradores se debe tener en cuenta la dirección del viento debido a que es uno de los factores meteorológicos que afecta a la selección del equipo, los aerogeneradores se deben direccionar de tal forma que se aproveche la mayor energía aerodinámica disponible. Es necesario conocer la dirección del viento para poder realizar el diseño del aerogenerador para esto se utiliza la herramienta METEOBLUE en donde se obtienen las muestras de un año 2021 como se observa en la figura 2-7.

Figura 2-7: Dirección el Viento Durante el Año 2021.



Fuente: Meteoblue.

En la figura 2-7, se puede observar que la dirección del viento hacia el este-noreste se tiene durante la mayoría de las horas, en donde la velocidad y el tiempo estuvieron altos, también se puede ver que hacia el este la dirección del viento se movió durante un largo tiempo, pero esta no fue tan intensa como en las partes de la dirección este-noreste.

En conclusión, la dirección del viento donde fue más constante durante el mayor tiempo del año fue en el noreste como se observa en la figura 2-7, esta velocidad no es la más alta, sin embargo, en esta dirección es constante, dicho dato es importante al momento del diseño del aerogenerador ya que al darle la dirección se ubica de la mejor forma que se aproveche toda la energía producida.

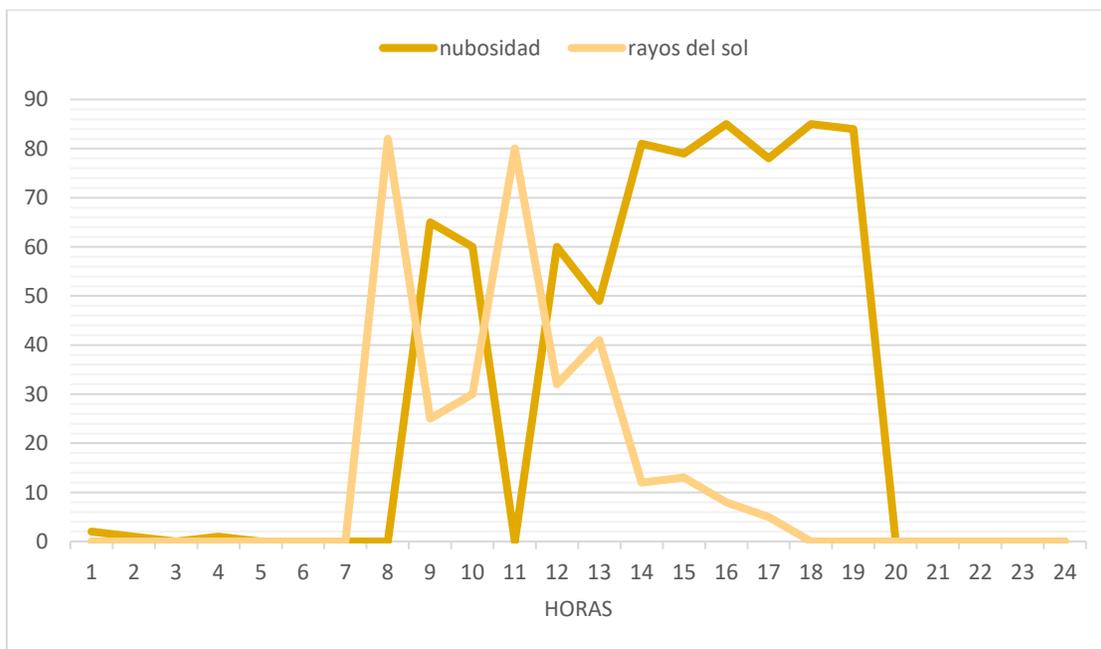
2.2.3 Factores Que Influyen En El Modelo De Potencial Energético

Al realizar el modelo de las condiciones del municipio de Riohacha se toman como entradas al sistema intervalos de 15 minutos, cada dato recolectado de Meteoblue, se toma como base en la radiación, temperatura, precipitación, nubosidad, velocidad del viento, presión y dirección del viento, debido a que estos factores inciden directamente en la energía potencial de la zona, con los datos en cada intervalo de tiempo se obtiene una ecuación en el tiempo para cada mes del año, sin embargo son directamente proporcionales entre variables, ya que si aumenta la nubosidad se ve afectada la temperatura y por consiguiente también el índice de radiación [9].

Por medio de la regresión matemática con los datos que se recolectaron se encuentra las ecuaciones que describen el comportamiento de cada factor. Se utilizó Excel y Matlab ya que son herramientas que brindan un fácil manejo de muchos datos, revisar anexo 1. Se realizaron las ecuaciones con los datos para cada mes del año debido a que se consultó años anteriores y se mantenía la tendencia.

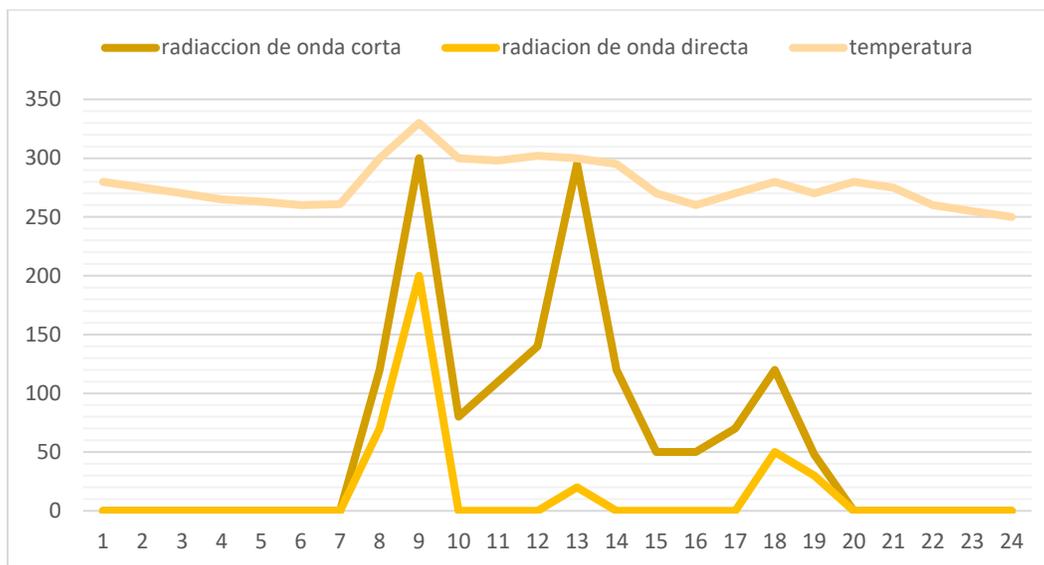
Al encontrar las ecuaciones se busca modelar las condiciones del municipio de Riohacha de una manera más asertiva considerando que toda ecuación tiene máximos y mínimos, en este caso los cuales deben concordar con los de la zona, es decir que los resultados de la ecuación no deben permitir que a pesar de tener baja nubosidad a las 7:00 am no es posible encontrar un pico de radiación mayor que el que se encuentre a las 12:00 pm. Las ecuaciones son un modelamiento matemático por lo que hubo condiciones que programáticamente se corrigieron para poder traer el acercamiento esperado. En la figura 2-8 la curva de nubosidad y de rayos del sol son factores que producen la radiación solar, en el cual se encuentran algunas muestras negativas, las cuales se llevan a valor cero en el periodo del mes de enero del año 2021.

Figura 2-8: Descripción de la Radiación.



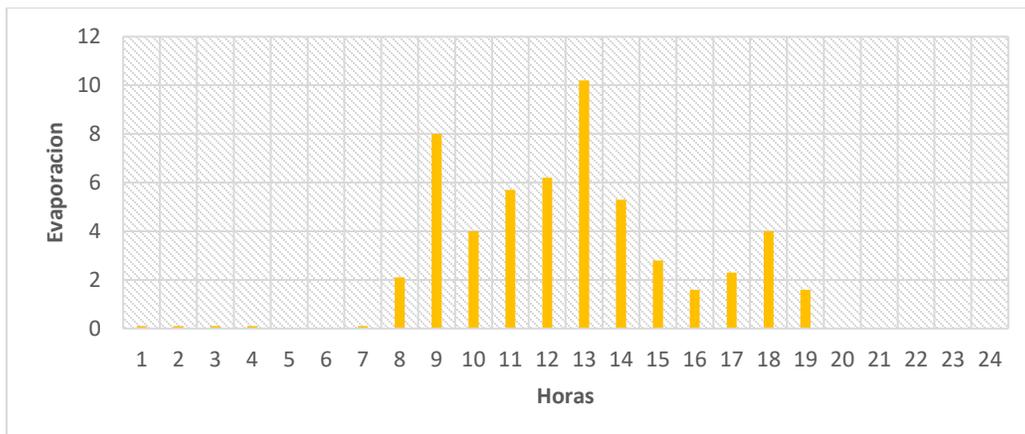
Fuente: Propia.

Figura 2-9: Descripción de la Temperatura Vs Radiación.

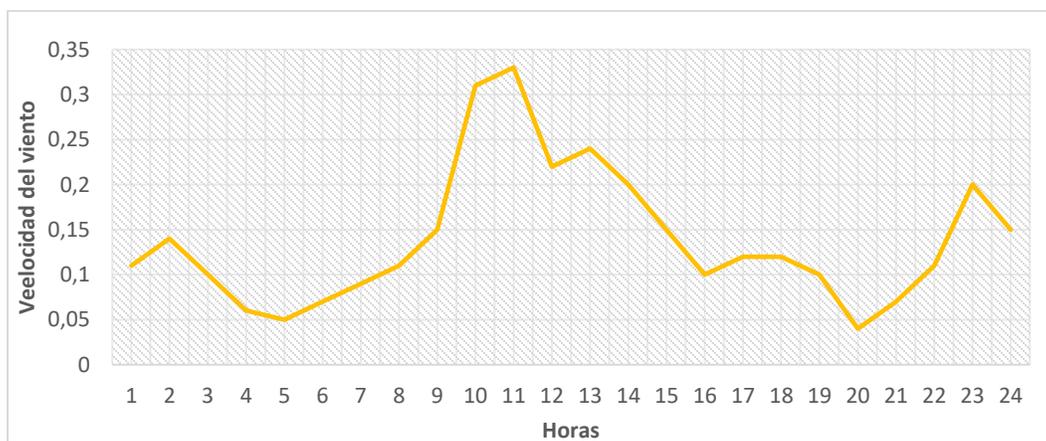


Fuente: Propia.

Del comportamiento de la velocidad del tiempo se utilizan los valores que llegan a incidir en la generación de energía, para esto se realizan las correlaciones con la presión y la velocidad del viento, también se tiene en cuenta la evaporación ya que esta afecta el estado del fluido pues la densidad del fluido cambia dependiendo de dicho estado es diferente el estado de evaporación como el estado de condensación. En la figura 2-10 y 2-11 se muestra el comportamiento de la evaporación y la velocidad del viento durante las horas de un día debido a que estas condiciones afectan en la generación de energía.

Figura 2-10: Descripción Evaporación Humedad del Viento.

Fuente: Propia

Figura 2-11: Descripción Velocidad del Viento.

Fuente: Propia

3 IDENTIFICACION DEL SISTEMA HIBRIDO

3.1 Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica también denominada energía fotoeléctrica es la encargada de transformar la radiación solar en electricidad. El proceso de transformación se realiza por medio de paneles solares los cuales están compuestos por fotoceldas con materiales semiconductores compuestos de silicio.

3.1.1 Formas De Obtención De La Energía Solar Fotovoltaica

Por medio de paneles solares se transforma los fotones en electricidad (electrones), utilizando unos dispositivos llamados células fotovoltaicas, los cuales son semiconductores sensibles a la luz. En donde los rayos solares impactan en las células generando un par electrón, el cual por medio de un circuito externo forma un movimiento de electrones, obteniendo así la corriente eléctrica.

3.1.1.1 Tipos de placas solares

- **Monocristalinos:** estas placas solares son las que presentan mayor rendimiento y presentan más estabilidad a lo largo de su vida útil. Son fabricadas en silicio. Eficiencia del 20 al 24%.
- **Policristalinos:** son fabricadas por medio de procesos de solidificación menos exhaustivos, con silicio metalúrgico. Obtenido una buena relación en calidad- precio. Eficiencia de 12 a 14%.
- **Amorfas:** estas placas son fabricadas de diferentes materiales tales como: silicio, telurio de cadmio, cobre, galio o selenio. Los cuales se fijan a plásticos, vidrios o tejados, permitiendo que logren ser celdas flexibles. Eficiencia de menos del 10%

Normalmente los sistemas solares fotovoltaicos están conformados por los siguientes componentes: panel solar, regulador, convertidor o inversor, y la carga que consumirá la energía obtenida.

3.1.1.2 Regulador

Los reguladores utilizados en los sistemas fotovoltaicos tienen como función principal evitar las sobrecargas directas al convertidor, logrando que el sistema funcione en óptimas condiciones. Al utilizar regulador se llega a reducir los mantenimientos del sistema ya que se disminuyen la posibilidad de daños.

Se pueden encontrar diferentes tipos de reguladores los más utilizados son:

- **Regulador de dos niveles de carga:** estos tipos de reguladores están fabricados con microcontroladores los cuales se encargan de gestionar la energía de forma inteligente.
- **Regulador con multietapa:** estos reguladores son más utilizados en grandes instalaciones ya que se encargan de gestionar la energía para suministrarla por medio de etapas.

3.1.1.3 Convertidor

El convertidor es el encargado de convertir la energía producida por el panel solar al tipo de energía que necesite la carga, debido a que se tienen dos casos posibles para transformar la energía ya sea de corriente continua a continua o corriente continua a alterna.

- **Convertidor de corriente continua a continua CC/CC:** es utilizado para aumentar la eficiencia de los sistemas, logrando disminuir las pérdidas por fluctuaciones llegándose a obtener un voltaje estable en la salida para la carga.
- **Convertidor de corriente continua a alterna CC/AC:** es utilizado cuando se tienen cargas que trabajen con corriente alterna por lo cual se necesita un inversor.

Este convertidor mantiene el voltaje dentro de los rangos necesarios para el buen funcionamiento de la carga, realizando ajustes en el voltaje de salida para que no ocurran sobrecargas en el sistema.

3.2 Energía Eólica

La energía eólica se obtiene a partir de la fuerza del viento. Por medio de un aerogenerador el cual se encarga de transformar la energía cinética de las corrientes de aire en energía eléctrica. Este proceso se realiza a través de extracción gracias al rotor, donde este transforma la energía cinética en energía mecánica, y el generador, se encarga de transformar dicha energía mecánica en eléctrica.

3.2.1 Funcionamiento y Características de La Energía Eólica

Para convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica se utilizan aerogeneradores. Los parques eólicos, que agrupan un gran número de aerogeneradores hacen posible que se obtenga grandes cantidades de energía, estos deben ubicarse en lugares donde exista mucha presencia de vientos que se mantengan constante en largos periodos.

Principales partes de un Aerogenerador:

- El rotor: el cual está compuesto por tres palas y el buje que las une, su principal función es captar la fuerza del viento y convertirla en energía mecánica de rotación.
- La multiplicadora: esta se encuentra unida al motor mediante un eje, tiene como función elevar la velocidad de giro de 30 revoluciones por minuto (rpm) a 1500 rpm.
- El generador: es el elemento que se encarga de convertir la energía mecánica de rotación en energía eléctrica.

3.3 Sistema Solar - Eólico

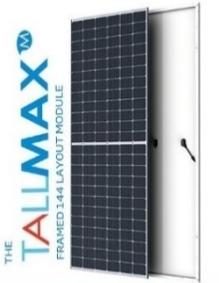
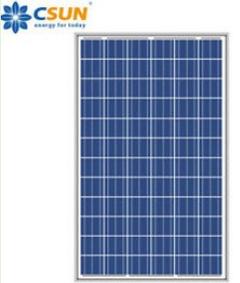
Los sistemas solares –eólicos también conocidos como sistemas híbridos, son la combinación de varios sistemas los cuales tienen una finalidad de suplir una necesidad en particular. En este caso que se trata de energías renovables, estos sistemas híbridos están compuestos por dos tipos de energías las cuales mezcladas logran abastecer la demanda energética de una zona. La eficiencia de estos sistemas de energía renovable depende de diversos factores tales como: la ubicación, la velocidad del viento y la radiación solar, debido a los cambios de estas condiciones se agrupan los sistemas de energía logrando mejorar la capacidad de abastecimiento, con la finalidad de que si alguno falla la otra pueda suplir la demanda energética.

4 DISEÑO DEL SISTEMA HIBRIDO

4.1 Selección del Panel Fotovoltaico

Para realizar la selección de los paneles fotovoltaicos se compara varios fabricantes como se muestra en la tabla 2-1 y 2-2, en la cual se tiene en cuenta tres paneles diferentes lo cual dos son paneles monocristalinos y uno policristalino, los fabricantes que se tienen en cuenta para la selección son TALLMAX PLUS y el otro es CSUN ENERGY donde cada uno maneja características diferentes de los paneles, las especificaciones que se tienen en cuenta para definir el panel solar es la potencia nominal máxima y el voltaje en el punto máximo de tensión, se encuentra que dos paneles tienen la misma cantidad de celdas 72, mientras el panel policristalino tiene solo 60 celdas con una potencia nominal menor. Se hace la aclaración que las especificaciones técnicas son tomadas de las fichas técnicas que suministra cada fabricante, dichos paneles fotovoltaicos cumplen con el punto de operación en la temperatura promedio que se necesita en la zona de referencia y sus picos de radiación también cumplen, se realiza una comparación en varias especificaciones para seleccionar el panel solar que cumpla con la mayoría de las condiciones.

Tabla 4-1: Cuadro Comparativo Entre Fabricantes de Paneles Solares

CUADRO COMPARATIVO PANELES FOTOVOLTAICOS			
ESPECIFICACIONES	TALLMAX PLUS	CSUN ENERGY	TALLMAX PLUS
TECNICAS	340W	275W	365W
			
Tipos de celdas	Monocristalinas	Policristalino	Monocristalino
Nº de celdas	72	60	72
Dimensiones	1960x992x40mm	1950x99x40mm	1960x992x35mm
Potencia Max nominal	340 W	275 W	365 W

Fuente: Propia.

Tabla 4-2: Especificaciones Técnicas de los Paneles Solares.

CUADRO COMPARATIVO PANEL FOTOVOLTAICO			
Especificaciones	TALLMAX PLUS	CSUN ENERGY	TALLMAX PLUS
Técnicas	340W	275W	365W
Tensión en el punto máximo	35.4 V	31.3 V	36.4 V
Corriente en el punto máximo	8.15 A	8.10 A	8.42 A

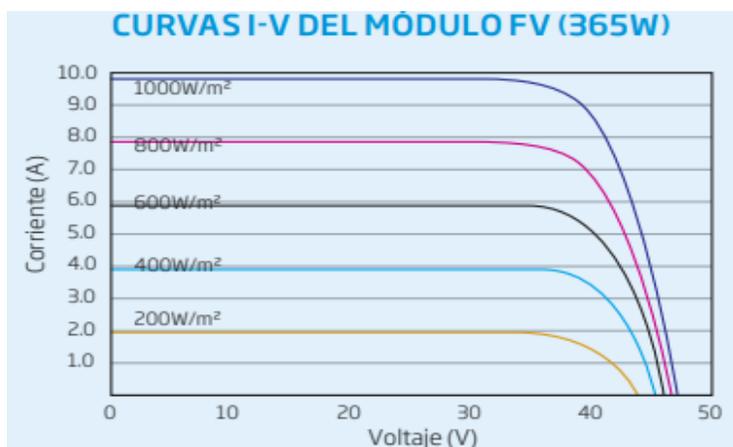
CUADRO COMPARATIVO PANEL FOTOVOLTAICO			
Tensión en cto abierto	42.9 V	38.4 V	44.6 V
Corriente de cortocircuito	9.34 A	9.27 A	9.69 A
Eficiencia	17.5%	16.49%	18.5%
Temperatura	-44°C +85°C	-44°C +85°C	-44°C +85°C

Fuente: Propia.

Es importante tener en cuenta las anteriores especificaciones técnicas, ya que al obtener las curvas de corriente y voltaje en los parámetros de la zona de referencia se puede seleccionar el panel fotovoltaico. Dentro de la simulación se indicaron los datos de los diferentes paneles para de esta manera poder evaluar la eficiencia de cada panel en diferentes escenarios.

En la figura 2-12 se relacionan las curvas del panel fotovoltaico de 365 W entregadas por el fabricante en donde muestra cómo se comporta la corriente y el voltaje de dicho panel para diferentes medidas de radiación solar.

Figura 4-1: Curva de I-V del Panel Fotovoltaico de 365W.



Fuente: Fabricante Tallmax Plus.

El panel fotovoltaico seleccionado es del fabricante Tallmax Plus, donde sus especificaciones técnicas son una potencia de 365 W, con una temperatura promedio de 33°C, tipo de celda monocristalina, con 72 celdas solares, voltaje de cortocircuito de 44.6 V, corriente máxima de 8.42 A, dicho panel entrega la eficiencia más alta.

4.2 Selección del Aerogenerador

Se realiza una comparación de tres tipos de aerogeneradores como se muestra en la tabla 2-3 y 2-4, en donde se comparan sus especificaciones técnicas dadas por el fabricante para la selección del más adecuado frente a las condiciones de viento en municipio de Riohacha, se hace énfasis en la velocidad del viento de arranque puesto que esta establece un punto fundamental en el momento de comparar con la velocidad mínima que se tiene en el municipio, los aerogeneradores son de los fabricantes AEOLOS WIND TURBINE, NORVERTO NED100, ENAIR E200.

Tabla 4-3: Cuadro Comparativo Aerogeneradores

CUADRO COMPARATIVO DE AEROGENERADORES			
Especificaciones Técnicas	ENAIR E200	NORVERTO NED100	AEOLOS WIND TURBINE 50
Modelo			
Potencia de red	200 KW	100 KW	50 KW
Velocidad de viento de arranque	3.0 m/s	3.0 m/s	3.0 m/s
Altura de buje	40 m	35 m	35 m

Fuente: Propia.

Tabla 4-4: Especificaciones Técnicas de los Aerogeneradores.

CUADRO COMPARATIVO DE AEROGENERADORES			
Especificaciones Técnicas	ENAIR E200	NORVERTO NED100	AEOLOS WIND TURBINE 50
Velocidad nominal de viento	12 m/s	10.0 m/s	10.0 m/s
Velocidad de giro del rotor	47.7 r.p.m	47.7 r.p.m	6-41 r.p.m
Frecuencia	50-60 Hz	50-60 Hz	50-60 Hz
Voltaje	400 V	400 V	400 V

Fuente: Propia.

Luego de realizar la comparación a detalle teniendo en cuenta las diferentes especificaciones técnicas de los aerogeneradores a pesar de que poseen características similares tales como el voltaje de 400 V, la velocidad de giro del rotor es muy similar en los tres, pero el que tienes las especificaciones más completas para el sistema que se desea implementar es el aerogenerador ENAIR E200 que es el seleccionado para el diseño.

Figura 4-2: Curvas Potencia Vs Velocidad del Viento del Aerogenerador

Fuente: Fabricante Enair E200.

Continuando con el proceso de selección se simula las condiciones del aerogenerador seleccionado ENAIR E200, utilizando su eficiencia y velocidad de arranque que se encuentra en la zona, también se tiene en cuenta el sistema en las palas de evaporación ya que el fluido en la zona está relacionado con la condensación la cual podría afectar el rotor y el filtrado del sistema.

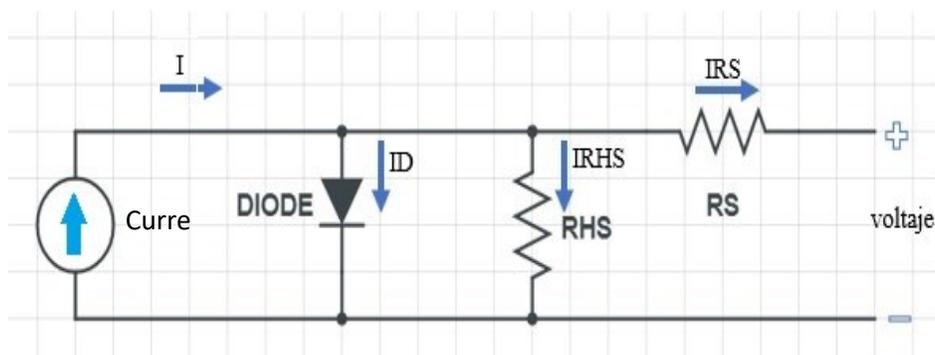
5 MODELAMIENTO DEL SISTEMA HIBRIDO

5.1 Ecuaciones Fundamentales del Sistema Híbrido

5.1.1 Ecuaciones Fundamentales Panel Fotovoltaico

Para modelar los elementos que se encuentran en el sistema híbrido, se empieza por el panel fotovoltaico, donde este recibe fotones que proviene de la radiación solar y por medio del material semiconductor, bien sea el silicio o el arseniuro de galio entre otros, que transforman la luz en energía eléctrica. Teniendo en cuenta lo anterior se puede semejar el funcionamiento del panel fotovoltaico con elementos electrónicos como se ve en la figura 3-1 y mediante las ecuaciones fundamentales conseguimos obtener el modelo de la parte del panel fotovoltaico, las leyes de Kirchhoff del voltaje y la corriente están en el corazón del análisis de circuitos. Con estas dos leyes, más las ecuaciones para cada componente individual (resistor, capacitor, inductor), tenemos el conjunto de herramientas básicas que necesitamos para comenzar a analizar circuitos.

Figura 5-1: Modelo de Circuito Electrónico Panel Solar, en Matlab.



Fuente: Propia.

Al realizar operaciones de circuitos se logra establecer la relación que existe entre la entrada y salida que describe el circuito.

Donde:

I = corriente

ID =Corriente del diodo

$IRHs$ =Corriente de la resistencia RHs

$$I - ID - IRHs=0 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Se reemplaza la corriente del diodo y la corriente de las resistencias para obtener la siguiente ecuación:

$$I - i_o * \left(e^{\left(\frac{Q*VD}{\eta*K*T} \right)} - 1 \right) - \frac{Voc}{RHs+Rs} = 0 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

Q = Carga del electron

VD =Voltaje diodo sicilio

η =Constante panel solar fiabilidad

K =Constante Boltzman

T =Temperatura de operacion

Se realizan diferentes arreglos matemáticos como factorizar y al reemplazar el voltaje de la fuente por el valor conocido del panel solar se obtiene la siguiente ecuación:

$$I(t) \left[\frac{V'oc}{Z} - \left(e^{\left(\frac{Q*VD}{\eta*K*T} \right)} - 1 \right) \right] - \frac{Voc}{RHs+Rs} = 0 \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\Psi = \frac{e^{\left(\frac{Q*VD}{\eta*K*T} \right)} * Z}{V} ; \varpi = \frac{(RHs+RS)}{V} * Z$$

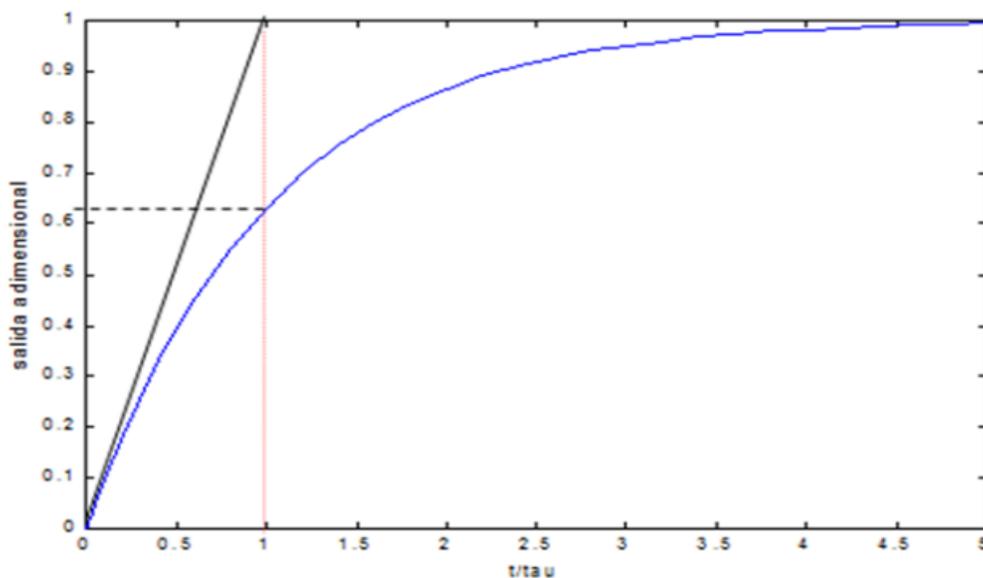
Para obtener los valores de la función de transferencia es necesario que se reemplacen los valores del tiempo de establecimiento y el coeficiente de amortiguamiento para obtener la función de transferencia. Estos valores son obtenidos de los datos que arrojan el fabricante.

Donde estos se encuentran en los datos que entrega el fabricante de las especificaciones técnicas del panel fotovoltaico.

$$H(S) = \frac{\omega}{s + \psi} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Al reemplazar en la función de transferencia descrita en la ecuación 4 se logra obtener la respuesta al escalón como se muestra en la figura 3-2, donde se encuentra un sistema de primer orden el cual se comporta de manera estable teniendo un error del 0.1 % en estado estacionario, a pesar de ello se observa que el tiempo de estabilización se comporta un poco lento dependiendo del reemplazo de la temperatura o radiación, estos resultados servirán al momento de realizar el diseño del controlador.

Figura 5-2: Respuesta de la Función de Trasferencia del Panel Fotovoltaico.

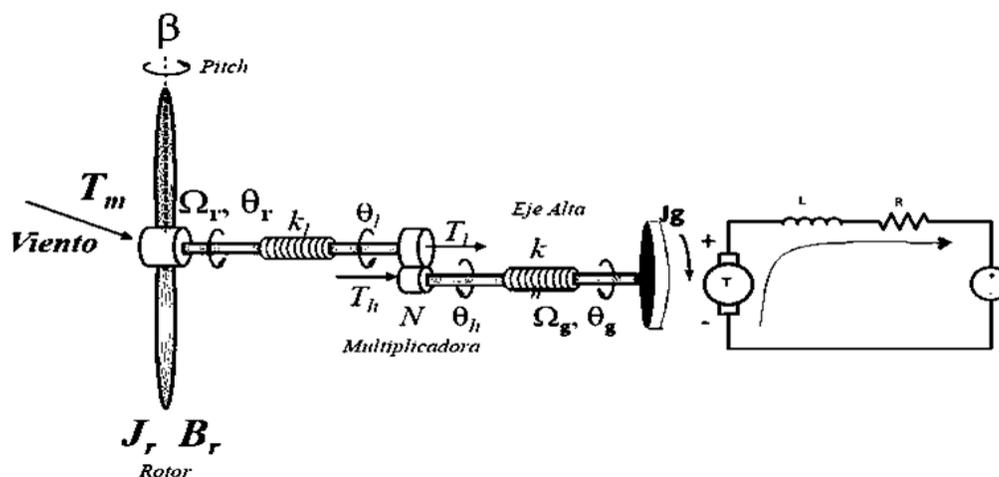


Fuente: Ángel Martínez Bueno, Funciones de Primer Orden.

5.2 Ecuaciones Fundamentales del Aerogenerador

Para modelar el sistema del aerogenerador se realizó en tres etapas donde la primera es la aerodinámica la cual relaciona la velocidad del viento con las aspas, la segunda se define como la mecánica, esta multiplica mediante los engranajes logrando potencializar el movimiento de las aspas y por último se tiene la conversión mecánica del acople a energía eléctrica el cual se modela mediante un motor con armadura. En la figura 3-3 se realiza un modelo que ilustra los elementos que conforman un aerogenerador que sirve de guía para poder realizar el modelo matemático. En el esquema también se muestra las diferentes etapas que conforman el sistema completo del aerogenerador.

Figura 5-3: Diagrama de Cuerpo Libre Aerogenerador.



Fuente: Horacio González, Waldo Jofré y Mariano Moreno, Energía Eólica.

Cada etapa del sistema del aerogenerador tiene una respectiva función de transferencia, en la parte aerodinámica se tendrá como entrada la velocidad del tiempo y como salida el torque necesario que produzca el movimiento en las aspas, obteniendo así el modelo para la función de transferencia aerodinámica.

$$E = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

ρ =Densidad del viento

ϑ =Velocidad del viento

E =Energía Cinética

A =Área

Al reemplazar la energía cinética en la ecuación 5, como la fuerza aerodinámica que genera el torque, y la potencia de la turbina como la fuerza del torque generada por la velocidad del viento, se obtiene el coeficiente de potencia el cual indica con que eficiencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

Donde:

C_p =Ccoeficiente de potencia

I =Momento de inercia

ω =Velocidad angular

$t= T_m$ =Torque

$$T = E * C_p = \frac{1}{2} * \rho * A * \vartheta^3 * C_p \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$I = \frac{M * L^2}{3} * N_p$$

$$EC = \frac{1}{2} * I * \omega^2$$

$$T_m = \frac{1}{2} * \rho * A * \vartheta^3 [N * m] \quad (\text{Ecuación 7})$$

Para modelar el torque generado por la velocidad del viento se tiene como la entrada de las aspas en el aerogenerador.

$$T_m(t) - \beta_r \theta_r(t) - \Omega_r \theta_r(t) = j_r \ddot{\theta}_r(t)$$

$$T_m(S) - \beta_r \theta_r(S) - \Omega_r \theta_r(S) = j_r \ddot{\theta}_r(S)$$

$$Tm(S) - (J_r S^2 + \beta_r S + \Omega_r) * \theta_r$$

$$\frac{\theta_r(S)}{Tm(S)} = \frac{1/J_r}{s^2 + \frac{\beta_r}{J_r} s + \frac{\Omega_r}{J_r}} \text{ (Ecuación 8)}$$

En la ecuación 8 se modela la función de transferencia. La ley de Betz es una relación física que establece el aprovechamiento de la velocidad del viento sabiendo que luego de que salga del aerogenerador esta será menor a la ingresada debido a la pérdida que se obtiene al realizar el movimiento del rotor; esa energía aerodinámica que se convierte en mecánica se modela por medio del torque generado dentro del rotor y su movimiento mecánico con un engranaje que multiplica la fuerza.

Donde:

ω = velocidad angular

K = constante

J = energía mecánica

N = número de dientes

$$\omega_1(t) - K_1(t)(\theta_1 - \theta_r) = J_1 \dot{\theta}_1(t)$$

$$\omega_1(t) + K_1(t)\theta_r = J_1(t)\dot{\theta}_1 + K_1(t)\theta_1$$

$$\omega_1(s) + K_1\theta_r(s) = (J_1 s^2 + K_1) \theta_1(s)$$

$$\frac{\theta_1(s)}{\omega_1(s) + K_1\theta_r(s)} = \frac{1/J_1}{s^2 + K_1/J_1} \text{ (Ecuación 9)}$$

Para la segunda etapa del sistema se tiene en cuenta una constante que relacione los tipos de energía, por consiguiente, en la ecuación 9 se relaciona el movimiento mecánico producido por la velocidad angular.

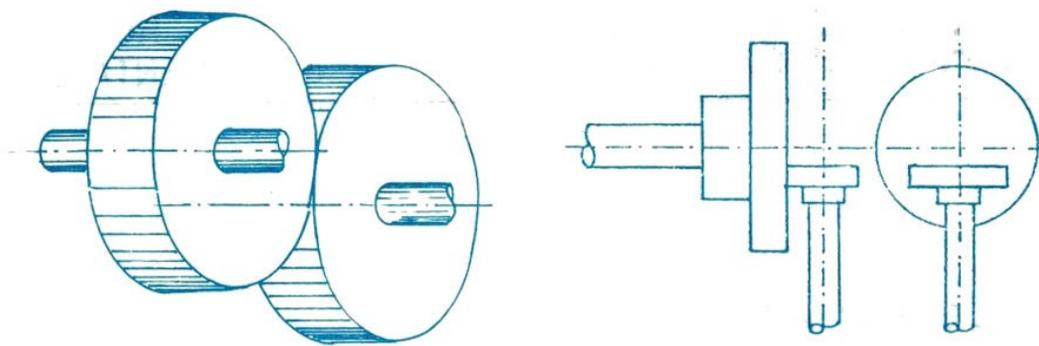
Al tener la velocidad angular como la fuente que genera el movimiento mecánico también se encuentra en el modelo los engranajes y la caja multiplicadora los cuales hacen que aumente la potencia mecánica, donde estos elementos harían la función de un transformador, en la siguiente ecuación se encuentra la relación de la salida de la velocidad angular con el torque.

$$\omega_1(t) * N_1 = \omega_2(t) * N_2$$

$$\frac{\omega_1(s)}{\omega_2(s)} = \frac{T_1(s)}{T_2(s)} = \frac{N_1}{N_2} \text{ (Ecuación 10)}$$

Un sistema de engranajes consiste en una relación de números de dientes, radio y paso diametral, ya que la función del engranaje es aumentar la velocidad angular o reducirla, así mismo cambia el torque. La relación de engranajes se puede calcular como la relación entre la velocidad angular del eje de salida entre el eje de entrada o como la relación entre el número de dientes a la entrada entre el número de dientes a la salida. En la figura 3-4 se muestra el diagrama del cambio de giro de engranajes en el cual se indica como ocurre el cambio de sentido del giro.

Figura 5-4: Diagrama Del Cambio de Giro de Engranajes.



Fuente: Sena, Elementos de Máquinas.

Por consiguiente, Al acoplar dos engranajes se obtienen cambios de dirección, velocidad y fuerza. Pero siempre que queramos incrementar alguna de estas variables la otra disminuirá proporcionalmente, La velocidad tangencial de un engranaje resulta de multiplicar la velocidad angular (o de giro) por el radio del engranaje. Cuando estudiamos la transmisión de un engranaje

a otro vamos a considerar que la potencia se transmite sin pérdidas. Existen pérdidas de potencia en la fricción de ejes y entre engranajes, pero la consideraremos despreciable.

$$\begin{aligned}\omega_2(t) - K_2(t)(\theta_g - \theta_h) &= J_2 \ddot{\theta}_g(t) \\ \omega_2(t) + K_2(t)\theta_h &= J_2(t)\ddot{\theta}_g + K_2(t)\theta_g \\ \omega_2(s) + K_2\theta_h &= (J_2s^2 + K_2)\theta_g(s) \\ \frac{\theta_g(s)}{\omega_2(s) + K_2\theta_h(s)} &= \frac{1/J_2}{s^2 + K_2/J_2} \quad (\text{Ecuación 11})\end{aligned}$$

En la ecuación 11 se muestra la relación de energía eléctrica. La transformación de energía mecánica a energía eléctrica será por medio del modelamiento del motor en sentido contrario, normalmente se realiza mediante un voltaje y una corriente que genera un movimiento mecánico en rpm, donde este será la entrada y el voltaje generado por el movimiento será la salida del sistema

$$\begin{aligned}J_g \dot{\omega}_g + \beta_2 \omega_g + \Omega_g - T_m &= 0 \\ J_g \dot{\omega}_g + \beta_2 \omega_g + \Omega_g &= T_m \\ J_g \dot{\theta}_g + \beta_2 \theta_g + \Omega_g &= T_m \\ \frac{T_m}{\theta_g} &= (J_g s^2 + \beta_2 s + \Omega_g) \quad (\text{Ecuación 12})\end{aligned}$$

En consecuencia, se establece la relación de entrada y salida del sistema por medio de la ecuación 12. La primera parte del motor tiene como salida el torque generado por la posición del ángulo en reacción a la velocidad angular.

$$\begin{aligned}i T &= k_m * T_m \\ \frac{i T}{T_m} &= k_m \quad (\text{Ecuación 13})\end{aligned}$$

Por medio de la ecuación 13, al conocer la constante de corriente y torque del motor se describe la relación de la energía mecánica.

Se dispone un modelo para el motor como se muestra en la siguiente ecuación en donde se tiene un circuito en serie en el cual la corriente que va circulando al momento que se realiza el movimiento del acople del motor, pasando por la bobina y la resistencia, en algunos modelos se desprecia dicha relación.

$$L \frac{di}{dt} + Ri = vm$$

$$LiT + RiT = Vm$$

$$\frac{Vm(s)}{iT(s)} = S = \frac{Ri}{L} \text{ (Ecuación 14)}$$

Por medio de la relación encontrada en la ecuación 14 se obtiene el modelo más cercano del comportamiento del aerogenerador.

Luego se reemplaza los valores de la ecuación 14, para llegar a obtener la función de transferencia.

$$\frac{Vm(s)}{Tm(s)} = \frac{S^3 k_m J_g + S^2 (k_m \beta_g J_g + R_i k_m J_R) + S (k_m \Omega_g + R_i k_m \beta_g) + \left(\frac{k_1^2 N_2}{J_2 J_r J_1} \right)}{S^6 + S^5 \frac{\beta_R}{J_g} + S^4 \frac{k_1 + \Omega_r + k_2}{k_1 J_2} + S^3 \frac{k_2 \beta_r}{J_1 J_r} + S^2 \frac{2k_2 (k_1 + \beta_r)}{k_1 J_2} + \frac{J_g J_r N_1}{\Omega_g k_m}} \text{ (Ecuación 15)}$$

Se realizan varias conversiones para simplificar lo más posible al momento de reemplazar, a continuación, se describe la ecuación:

$$\Lambda = k_m \beta_g J_g + R_i k_m J_R; \Theta = k_m \Omega_g + R_i k_m \beta_g$$

$$\Delta = \frac{k_1 + \Omega_r + k_2}{k_1 J_2}; X = \frac{k_1^2 N_2}{J_2 J_r J_1}; \partial = \frac{k_2 \beta_r}{J_2 J_r}$$

$$\Xi = \frac{2k_2 (k_1 + \beta_r)}{k_1 J_2}; T = \frac{J_g J_r N_1}{\Omega_g k_m}$$

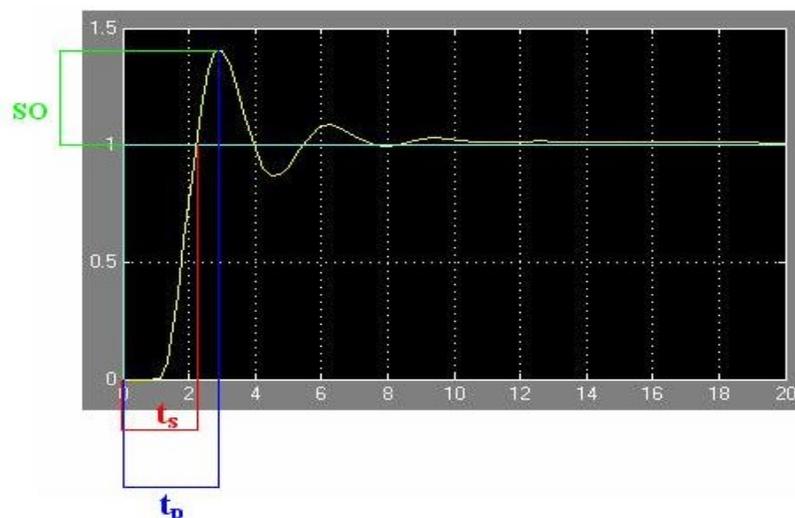
Para llegar a la función de transferencia se utilizan los valores de las especificaciones técnicas dados por el fabricante del aerogenerador y de esta manera reemplazando se obtiene.

$$\frac{Vm(s)}{Tm(s)} = \frac{S^3 k_m J_g + S^2 \Lambda + S \Theta + X}{S^6 + S^5 \frac{\beta_R}{J_g} + S^4 \Delta + S^3 \partial + S^2 \Xi + T} \text{ (Ecuación 16)}$$

Al obtener el modelo se diseña el controlador, para esto se tiene como punto de referencia las variables que se controlaran dentro del sistema, por lo tanto, utilizando el método de Mason el cual es un método para encontrar la relación entre dos variables o función de transferencia. El cual se utiliza con frecuencia en las teorías de control en este caso se implementó para llegar al diseño del controlador predictivo MPC que fue seleccionado como técnica de control debido a que es una metodología de control que hace uso del modelo del proceso para predecir las salidas futuras de los sistemas y con base en ello optimizar las acciones de control futuras.

En la respuesta al paso de la función de transferencia se logra encontrar un sistema subamortiguado ya que en el arranque del motor se pueden ver unos sobre picos, esta acción mecánica trae un control de posición internamente, por esto se estabiliza luego de 10-20 intervalos de tiempo según la velocidad de arranque del aerogenerador, teniendo en cuenta dicha simulación se realiza el diseño del controlador. En la figura 3-5 se observa el t_s el cual es el tiempo de retardo, t_p es el tiempo de pico y SO es la sobre oscilación.

Figura 5-5: Respuesta al Paso de la Función de Transferencia.



Fuente: Martin Daprotis, Función de Transferencia y Respuesta Imulsiva.

6 DISEÑO DEL CONTROLADOR

En esta sección solo se mostrarán las tipologías más usadas de controladores en sistemas solares y eólicos, y en secciones posteriores se profundizará más sobre el controlador en particular del cual se va a trabajar. Los investigadores dedicados al estudio del diseño de controladores para sistemas fotovoltaicos y eólicos, llegaron a la conclusión que la selección del controlador y técnicas de control a aplicar dependen del tipo de carga que se requiere alimentar.

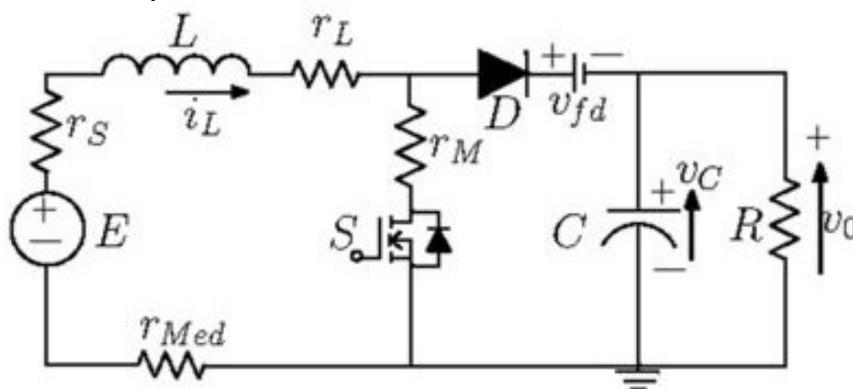
Por lo tanto, entre los controladores más utilizados está el Boost, los cuales estos se encuentran en la categoría de elevadores de tensión, los controladores Buck son reductores de tensión, y los controladores Buck-Boost poseen ambas características antes mencionadas.

6.1 Tipos de Convertidores

6.1.1 Convertidor Boost

Entre los diferentes convertidores DC/DC se encuentran los Boost, el cual es un elevador de tensión por medio de un circuito RLC como se observa en la figura 3-6, utiliza su característica de almacenamiento para elevar la corriente que proviene de la fuente para inyectarla al capacitor, en donde genera niveles de tensión elevados los cuales son superiores a los de la fuente.

Figura 6-1: Modelo de esquema de convertidor Boost.

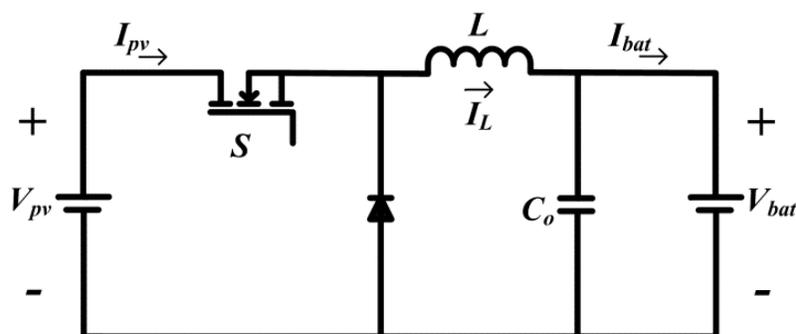


Fuente: Dinámica de un convertidor Boost, Scielo.sld.cu

6.1.2 Convertidor Buck

El convertidor Buck es un reductor el cual se caracteriza porque reduce la salida de voltaje a la señal de voltaje que se tienen en la entrada. En la figura 3-7 se observa cómo se representa de manera electrónica,

Figura 6-2: Modelo de esquema de convertidor Buck.

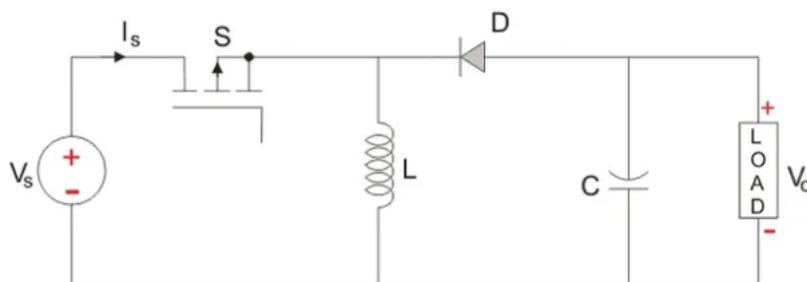


Fuente: Diseño de un cargador de baterías. Henry Rafael Gallardo (2014).

6.1.3 Convertidor Buck – Boost

Este convertidor combina las características de los convertidores mencionados anteriormente, de esta forma se puede tener el voltaje de salida ya sea mayor o menor que el voltaje de entrada. Como se muestra en la figura 4-1, la condición de operación será condicionada dependiendo del ciclo de conmutación denominado D , el cual controlará el transistor.

Figura 6-3: Modelo de esquema de convertidor Buck- Boost



Fuente: Convertidor Buck – Boost, Telcom.

6.2 Estrategias de Control

Las técnicas INC (Incremental Conductance) y P&O (Pertube and Observe) son las principales técnicas lo cual significa que este controlador hace trabajar al panel en su punto de máxima potencia, por lo que se obtiene una gran ventaja ante otros modelos ya que presenta una mayor eficiencia del sistema.

La técnica INC está basada en cambiar la potencia respecto al voltaje (dP/dV). Cuando se llega a encontrar la energía que genera los paneles en estado estacionario en ese punto el cambio de potencia será cero, teniéndose entonces $(dP/dV) = 0$.

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{\partial(I*V)}{\partial V} = \frac{\partial I*V + I*\partial V}{\partial V} = 0 \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$\frac{\partial I}{\partial V} = \frac{I}{V} \quad (\text{Ecuación 18})$$

En la ecuación 18, dI/dV significa la conductancia incremental y I/V representa la conductancia instantánea, cuando estas dos son iguales en ese momento la potencia no cambia, logrando tener el punto máximo de potencia. El método MPP requiere que se tenga un voltaje de referencia el cual va variando, el cual indica en donde se encuentra el punto máximo de potencia de un panel solar.

La técnica P&O esta se basa en medir la salida de voltaje del panel y luego compárala con la medida de potencia que se obtiene actual con otra medida realizada anteriormente. Si llega a variar el voltaje al mismo tiempo que disminuye la potencia, se realiza un cambio en el punto de operación por medio del sistema de control, cambiando el sentido de la dirección. En diferentes estudios esta técnica tiene otros usos como suministrar la referencia a bloques de control MPC, en un capítulo posterior se explicará más a detalle sobre esto.

6.3 Control en Sistemas conectados a la Red

Para el control de sistemas conectados a la red existen dos tipos el centralizado y distribuido. En el centralizado todos los equipos son controlados por un sistema principal, por medio del cual se reciben las señales y desde ahí se van controlando todos los equipos del sistema. Esto presenta una gran ventaja en sistemas que sean pequeños ya que se acumula toda la información en un solo dispositivo mientras que cuando los sistemas son más grandes se empieza a tener inconvenientes debido a que se requiere más capacidad computacional.

El control distribuido se basa en que se divide el sistema y se le asigna un control a cada equipo el cual se selecciona dimensiona dependiendo de los requerimientos de cada uno. De esta forma se evita los inconvenientes que se tienen con el control centralizado ya que no requieren tanta capacidad computacional.

Debido a que se puede presentan algunos inconvenientes con los tipos de control mencionados anteriormente, también existe en control jerárquico el cual tiene varios niveles y en cada uno de ellos se incluyen los tipos de control centralizado y distribuidos permitiendo la combinación de ellos. Los siguientes son los niveles del control jerárquico:

- Primer Nivel de Control: en este nivel se pueden controlar las variables de corriente y tensión, el punto máximo de potencia MPP y la sincronización. Este tipo de nivel será utilizado a lo largo de este trabajo ya que al controlar la potencia se necesita controlar las variables de corriente y tensión.
- Segundo Nivel de Control: este nivel va orientado a lograr mantener la calidad de la potencia, proteger la red cuando ocurran cortes inesperados.

- Tercer Nivel de Control: este nivel se enfoca más en monitorear los paneles, aerogeneradores y en predecir la potencia que recibirá el sistema.

En cada uno de los niveles de control se pueden utilizar técnicas de control como PID, PI, MPC. Para saber que función se le dará al controlador es importante saber si es una red aislada o conectada a la red. En este trabajo se controlará un sistema conectado a la red en el cual se controlará la sincronización de la energía entrante del sistema híbrido con la de la red.

6.4 Control del Sistema Híbrido Basado en MPC

En esta sección se tratará las generalidades del control MPC y las características principales que posee a diferencia de los otros tipos de controladores, el cual se va a ir reflejando a lo largo del desarrollo de este trabajo y como este es aplicado a las diferentes estrategias de control.

6.4.1 Definición del Controlador Predictivo Basado en Modelo MPC

Existen diferentes técnicas de control una de ellas es el control predictivo el cual es robusto y se implementa para sistemas no lineales y habitualmente que sean inestables, al tener un tipo de control MPC su fundamento es conocer de manera detallada el comportamiento del sistema basándose en el modelo de la misma, a pesar de ello en los dos casos la función principal de controlador es lograr minimizar el error del sistema lo mayor posible, en relación con la referencia que se tiene, para esto utiliza un optimizador que va refrescando los datos tomados y va mostrando el error en cada uno, por medio de esta forma cada vez se tiene menos margen de error en la predicción de los datos.

p =perturbacion

r =señal de referencia

z =ruido

y =salida

pnm =perturbacion no modelable

u =salida del controlador

Posteriormente se muestra la representación de la respuesta teniendo en cuenta las teorías de los sistemas dinámicos.

Donde:

Δu =son las variables de control

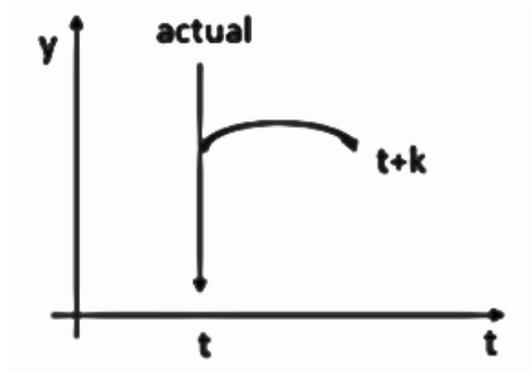
g_i =respuesta al escalon(planta)

Y_0 =salida inicial

$$y(t) = Y_0 + \sum_{i=1}^{\infty} g_i * \Delta u * (t - i) \text{ (Ecuación 19)}$$

Con el controlador predictivo se quiere generar una predicción de control donde se hace necesario que en el punto actual se mueva hacia el futuro, para esto se utiliza “K” el cual nos va a indicar la cantidad de pasos que se mueven hacia el futuro como se muestra en la figura 4-4.

Figura 6-4: Factor de Predicción K.



Fuente: Augusto Pereira, Análisis Predictivo de Datos.

Por consiguiente, para determinar el factor de predicción se tiene en cuenta la siguiente ecuación:

Donde:

\hat{y} =predicción

$t+k$ =tiempo futuro

t =tiempo actual

$$y(t) = \hat{y}^* \left[\frac{t+k}{t} \right] \text{ (Ecuación 20)}$$

Al reemplazar en la ecuación 20 se obtiene la siguiente ecuación:

$$y(t) = \hat{y}^* \left[\frac{t+k}{t} \right] = \sum_{i=1}^{\infty} g_i * \Delta u * (t + k - i) \text{ (Ecuación 21)}$$

suponiendo un $Y_0=0$

Se observa que la ecuación se divide en dos, esto es debido a que se tiene en los términos que son pasado y los que son futuro.

$$\hat{y}^* \left[\frac{t+k}{t} \right] = \sum_{i=1}^k g_i * \Delta u * (t + k - i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i * \Delta u * (t + k - i) \text{ (Ecuación 21)}$$

Por lo tanto, en la primera parte de la sumatoria Δu del futuro y en la segunda parte se tiene Δu del pasado.

Para definir el error de predicción actual se hace por medio de la siguiente ecuación:

Donde:

$Y_m(t)$ =es el tiempo real

$\hat{y} [t/\tau]$ =el tiempo estimado

$$n(t) = Y_m(t) - \hat{y} \left[\frac{t}{\tau} \right]$$

Para definir el error de predicción futura se hace por medio de la siguiente manera:

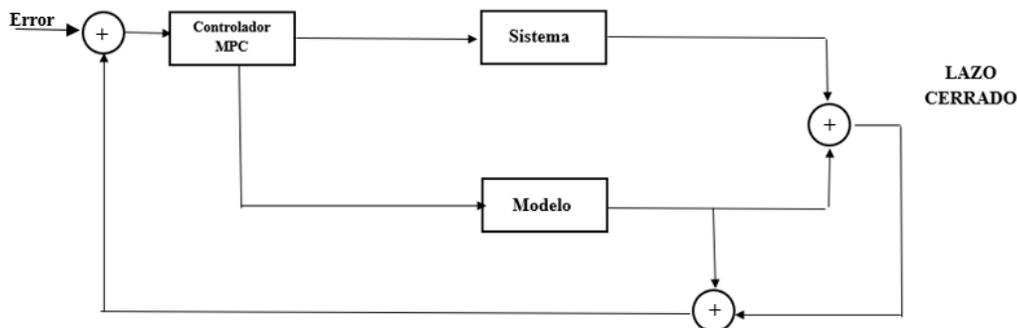
$$(T) = \check{n} \left[\frac{t+k}{\tau} \right]$$

$$\hat{y} * \left[\frac{t+k}{T} \right] = \sum_{i=1}^k g_i * \Delta u * (t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i * \Delta u * (t+k-i) + n(T)$$

$$\hat{y} * \left[\frac{t+k}{T} \right] = \sum_{i=1}^k g_i * \Delta u * (t+k-i) + \sum_{i=k+1}^{\infty} g_i * \Delta u * (t+k-i) + Ym(t) - \hat{y} * \left[\frac{t}{T} \right]$$

(Ecuación 22)

Figura 6-5: Error Para el Muestreo en Lazo Cerrado del MPC



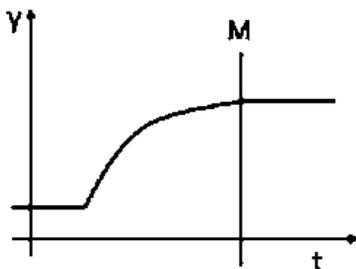
Fuente: Propia.

Al tener la respuesta forzada junto con la respuesta libre estas realizan cambios de límites y van determinado nuevos periodos reales de evaluación.

$$\hat{y} * \left[\frac{t+k}{T} \right] = \sum_{i=1}^k g_i * \Delta u * (t+k-i) + Ym(t) + \sum_{j=1}^M (g_{j+1} - g_j) * \Delta u(t-j) \quad (\text{Ecuación 23})$$

Es necesario aclarar que la utilización de M donde este es el punto el sistema deja de ser dinámico y llega a ser estable como se observa en la figura 4-6.

Figura 6-6: Respuesta Forzada



Fuente: José Enrique, Análisis Transitorios.

6.4.2 MPC Aplicados a Convertidores

El controlador MPC no sigue una estrategia de control en particular, sino que combina varias para lograr obtener una señal de control que minimice la función de costo. Existen varios métodos para utilizar el modelo de la planta. De tal forma que el modelo es usado para calcular una tensión de referencia que logre alcanzar un valor de la referencia que se desea que en este caso sería la corriente. Por medio de la modulación el valor de referencia lo genera el convertidor.

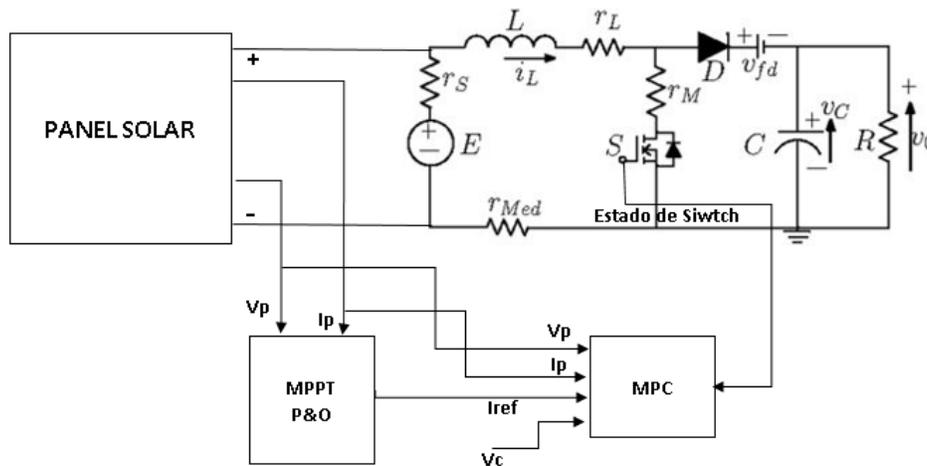
Para este trabajo se requiere hacer la simulación de un control predictivo con el fin de mejorar el comportamiento de un sistema híbrido solar-eólico, teniendo en cuenta la máxima potencia generada del sistema la cual es una variable fundamental para su funcionamiento. Se busca obtener una mejor eficiencia utilizando las estrategias P&O junto con la técnica de control predictivo en el cual se tendrá un seguimiento al punto máximo de potencia MPP.

Entre las ventajas que tiene el MPC aplicadas a controladores de potencia se tienen que presentar una respuesta rápida a condiciones inestables y se puede diseñar una función de costo con múltiples objetos. La función de costo recibe los valores de referencia, donde estos serán suministrados por la estrategia P&O, aunque es necesario aclarar que el último método mencionado solo entregara los valores de referencia, sin llegar a controlar el convertidor.

Se utilizará el tipo de convertidor Boost debido a que presenta un rango de resistencia más amplio que el tipo de convertidor buck.

En la figura 4-7 se observará un esquema electrónico el cual fue diseñado para realizar el seguimiento al MPP. En donde se puede observar el panel solar, teniendo como salidas V_p y I_p , donde estas alimentan el sistema MPPT, el cual crea el valor de referencia para el MPC.

Figura 6-7: Esquema de MPC para MPPT



Fuente: Elaboración Propia.

Se puede observar que las entradas para el MPC son la tensión y corriente del panel solar, la corriente de referencia que genera el MPPT y el voltaje del capacitor del convertidor Boost. Para la predicción de la variable $i_L(k+1)$ en todos los estados del Switch ($S=0, S=1$). Donde la función costo las evalúa comparando el valor obtenido de la variable estimada con el de referencia donde se expresa en la siguiente ecuación:

$$g_{s=0.01} = |i_{l s=0.01}(k+1) - i_{ref}(k+1)| \quad (\text{Ecuación 24})$$

En donde S es el estado del Switch del convertidor Boost, i_{ref} es la corriente de referencia que genera la estrategia P&O, $i_l(k+1)$ es la corriente del inductor la cual varía dependiendo del estado del Switch.

6.4.3 Diseño del Convertidor Boost

Los parámetros principales para el cálculo del convertidor son: el rango de tensión que se tiene en la entrada, la salida nominal de tensión que se requiere obtener y la máxima corriente de salida. Para el desarrollo del trabajo se toman los valores para el estudio de las especificaciones técnicas del panel que se seleccionó anteriormente.

- **Inductor**

Existen hojas de datos en donde se pueden encontrar los valores recomendados para la inductancia en estos sistemas. Cuando no se conoce este valor se puede calcular el rango de la inductancia por medio de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V_{in}(V_{out}-V_{in})}{f * i_r * V_{out}} \quad (\text{Ecuación 25})$$

En donde:

V_{in} = voltaje de la fuente

V_{out} = voltaje de salida del circuito

i_r = corriente de rizado

f = voltaje de salida del circuito

- **Capacitor**

Es recomendable en la práctica utilizar capacitores cerámicos, pero en este estudio como todo será simulado se puede utilizar la siguiente ecuación para seleccionar el valor del capacitor de salida del circuito.

siguiente ecuación:

$$C = \frac{I_{out}(V_{out}-V_{in})}{f * V_r * V_{out}} \quad (\text{Ecuación 26})$$

En donde:

I_{out} = corriente que sale del sistema

V_r = Tensión de rizado

- **Diodo**

En este estudio como se tomará para el convertidor Boost el diodo como un modelo, el cual se puede utilizar en su forma ideal, ya que no se va a tener un sistema real.

6.4.3.1 Diseño del Convertidor Boost

Luego de tener identificadas las ecuaciones necesarias para el diseño del convertidor se calculan los parámetros necesarios. Para esto se tiene en cuenta los datos que arrojan las fichas técnicas de los equipos seleccionados. Primeramente, se calcula la tensión que entra en el circuito el cual en este caso será el voltaje en su punto máximo de operación del panel solar, igual se realiza para calcular la corriente de entrada la cual será la corriente máxima en su punto de operación. Los cuáles serán:

$$V_{in} = 36,4 \text{ V}$$

$$I_{in} = 8,42 \text{ A}$$

Como el convertidor boost es un elevador se requiere calcular el voltaje de salida el cual se puede aproximar calculado la potencia total multiplicando el voltaje de entrada con la corriente de entrada, en donde luego se divide por la corriente máxima permitida la cual en este caso es de 9,69 A.

$$V_{out} = 41.6 \text{ V}$$

para calcular el valor de la inductancia y la capacitancia se necesita el valor de frecuencia el cual se tomará como referencia de 5000 HZ, también se tomara un valor de tensión de rizado del 1%

$$I_r = 0.01 * I_{in} = 0,0842$$

$$V_r = 0.01 * V_{in} = 0,364$$

Luego de calcular todos los datos anteriores se obtiene el valor de inductancia y capacitancia

$$L = 0,0108 \text{ H}$$

$$C = 8,02 * 10^{-4} \text{ F}$$

6.4.4 Estrategias de control con el MPC

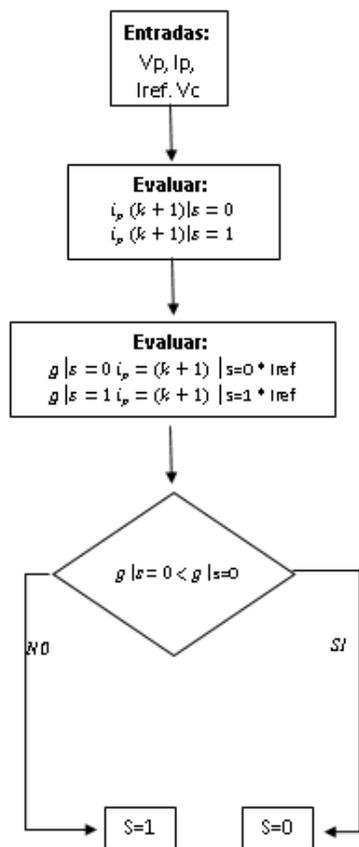
Se utilizarán dos estrategias de control con el MPC, una tendrá como objetivo mejorar la eficiencia del sistema y la segunda estrategia se comprobará cómo se comporta el sistema conectado a la red controlando las cargas que se conectan al sistema.

- **Seguimiento del punto máximo de potencia con el MPC**

Con esta estrategia se busca mejorar la eficiencia del sistema. Con las estrategias de P&O y INC se tiene una respuesta lenta sobre el comportamiento del punto máximo de potencia en ambientes donde las variables como tensión y corrientes no se mantienen constantes. Por lo tanto, se utiliza un controlador MPC el cual muestra mejores resultados y una respuesta más rápida en estado estacionario.

El principio de esta estrategia se basa en las corrientes estimadas como se explicó en los capítulos anteriores y la corriente que genera el MPP, en donde se calcula la función costo la cual permite obtener la diferencia entre el valor de corriente estimada y de referencia. Por medio de un diagrama de flujo como se observa en la figura 4-8, se describirá como funciona esta estrategia

Figura 6-8: Diagrama de flujo MPC.



Fuente: Elaboración Propia.

El diagrama de flujo que se muestra en la figura 4-8 explica el proceso que sigue el algoritmo perturbar y observar para el seguimiento del punto máximo de potencia MPP.

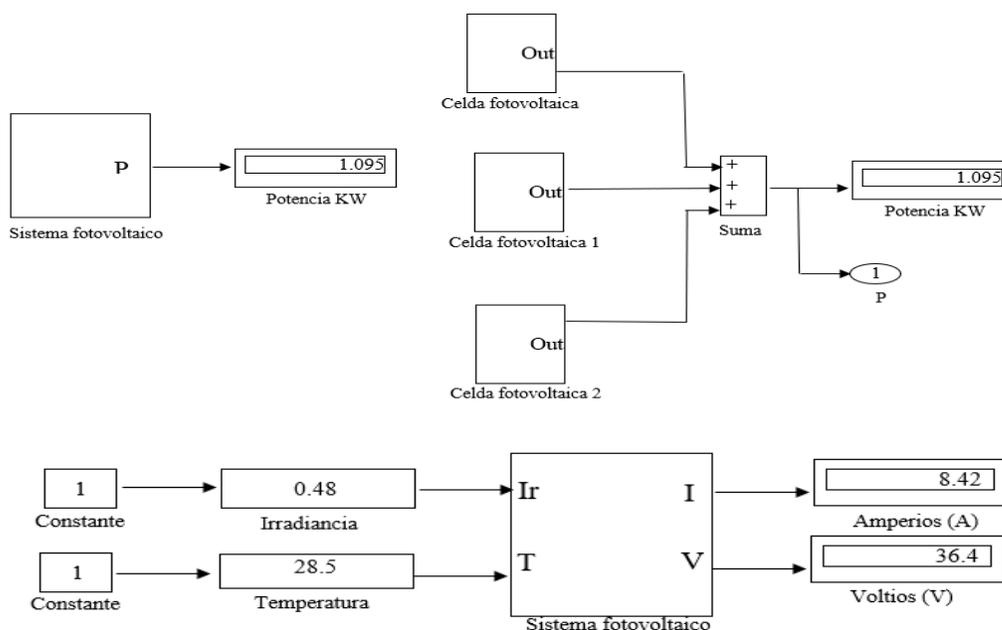
7 SIMULACION Y RESULTADOS

7.1 Esquemas De Simulación Sistema Híbrido

7.1.1 Esquemas De Simulación Del Panel Fotovoltaico

Con las ecuaciones obtenidas en el capítulo anterior y utilizando el software de simulación en donde se relacionan las ecuaciones con los valores reemplazados del fabricante, utilizando la potencia como primera medida por medio de la herramienta Simulink, que por medio de bloques es posible simular el sistema solar tomando dos valores de entrada, los cuales son la temperatura y la irradiación, logrando encontrar la potencia generada como se muestra en la figura 4-9.

Figura 4-9: Simulación del Panel Fotovoltaico en Simulink.



Fuente: Propia

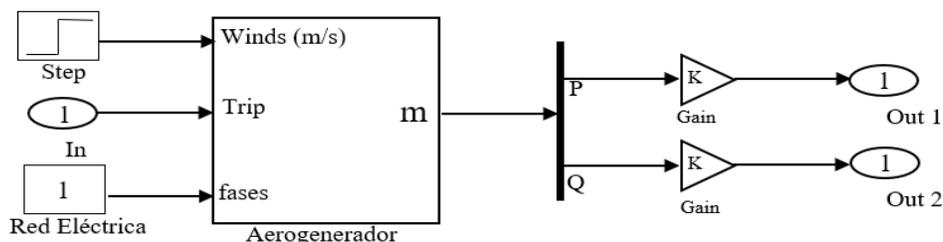
En la figura 4-9 se muestra que se utiliza la herramienta POWERGUI, la cual se utiliza para poder determinar la potencia del sistema fotovoltaico en Matlab por medio de la herramienta

Simulink que tiene variedad en sus librerías que permite encontrar elementos de potencia como motor y líneas de transmisión que ayudan a simular la energía generada.

7.1.2 Esquemas de Simulación del Aerogenerador

Para modelar los elementos del sistema se creó en el software de Matlab un esquema por medio de bloques utilizando la herramienta de simulink, se encontró un bloque de un aerogenerador predeterminado del software el cual posee los componentes de un aerogenerador hasta producir la salida con la generación de energía eléctrica, ofreciéndonos una gran ventaja al simular el comportamiento del aerogenerador ya que es mucho más difícil que la simulación del panel fotovoltaico, como se logró evidenciar en el modelado de las ecuaciones de transferencia el orden de la función del aerogenerador es mayor que la del panel fotovoltaico.

Figura 4-10: Simulación del Aerogenerador en Simulink.



Fuente: Propia.

En la figura 4-10 se observa una línea de transmisión con una carga simulada que permite evidenciar como es el comportamiento del arranque, verificando si el modelo realizado de manera manual por medio de fórmulas muestra un comportamiento correcto, se debe tener en cuenta que no se tomaron los mismos criterios ya que hay diferencias entre el modelo realizado por ecuaciones y el modelo establecido por los bloques, pero a pesar de ello se debe comportar de manera similar.

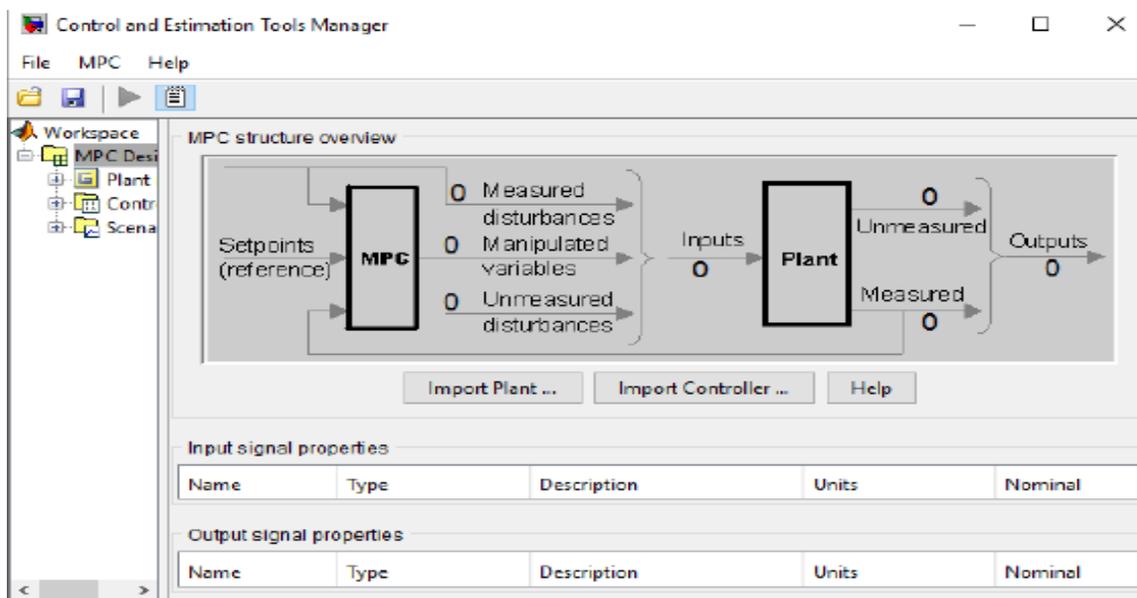
Para poder ejecutar los bloques de simulación que entrega la herramienta Matlab se hace por medio de bloques de parámetros, además se incorporan en el lenguaje de programación Labview el cual permite importar los códigos que genera Matlab por ende para poder describir

como es el comportamiento del aerogenerador se crea un gráfico que permita visualizar el aerogenerador.

7.2 Esquema de simulación del Controlador MPC

Para realizar el diseño del controlador fueron tomadas como referencia cada función de transferencia encontrada con los modelos matemáticos, se simulan por medio del software Matlab con ayuda de la herramienta Simulink y la función TOOL DESING MPC, el cual permite que las funciones sean importadas se empiezan a recrear todos los escenarios que se necesitan para diseñar el controlador, por medio de la herramienta TUNNING se va mejorando la matriz resultante de los primeros datos, la función de coste se toma para ingresar a la parte de diseño dependiendo de las necesidades y cuando se presentes perturbaciones en el sistema se pueda mejorar su comportamiento en la estabilidad.

Figura 5-1: Diseño del Controlador MPC en Matlab.



Fuente: Matlab.

En base a las simulaciones realizadas en el código que se encuentra en el ANEXO 2 se carga la matriz de la función de transferencia, en el cual se desean obtener diferentes contextos esto se realiza tomando periodos variables que sean posibles para el algoritmo que diseña el control.

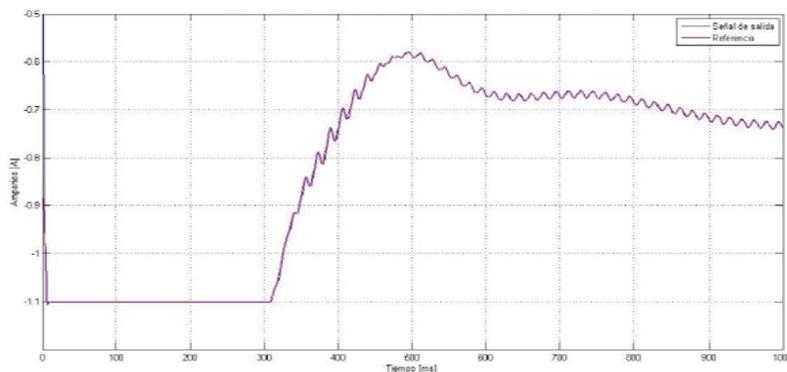
7.3 Escenario de Prueba

Cabe resaltar que este trabajo es netamente simulación y para esto se deben seleccionar cargas que son las que estarán conectadas a la red, en este caso serán resistivas, para seleccionarlas se tuvieron en cuenta documentos guías donde ya se encuentran caracterizados estas cargas domésticas, teniendo en cuenta que las cargas serían las de una vivienda conectada a la red.

7.3.1 Simulación del sistema híbrido

Para llevar a cabo la primera parte de las simulaciones se realiza por medio de una interfaz el cual nos permite simular los elementos que conforman el sistema híbrido tanto para el aerogenerador como el panel fotovoltaico, los datos utilizados para implementar el modelo son los que nos ofrece el fabricante pero además los obtenidos anteriormente con las ecuaciones matemáticas y las simulaciones en Matlab, utilizando software logramos recrea las curvas de voltaje y corriente para el panel fotovoltaico, además los ángulos y potencia que entrega el aerogenerador, en la figura 5-2 se puede visualizar en color blanco la potencia generada por el aerogenerador en (KW) y en rojo la potencia del viento en (KW), también se logra evidenciar el aumento torque a medida que va aumentando la velocidad del viento, siendo esta una variable de entrada.

Figura 7-2: Potencia Simulada del Aerogenerador.



Fuente: Propia.

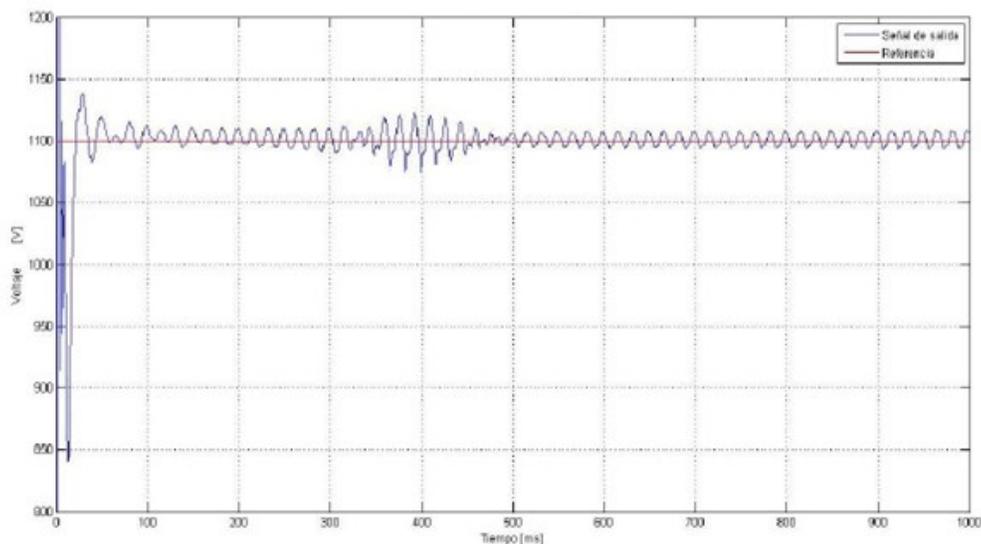
Los resultados obtenidos luego de realizar la simulación, se encontró que la potencia que arroja el sistema es la cantidad de corriente y voltaje producida en un periodo determinado, para poder tener los criterios para diseñar el controlador se debe tener claro la curva que se espera con respecto a la curva que se obtiene con la simulación, por esto se determina la gráfica obtenida con el sistema de forma ideal junto a la gráfica obtenida con el sistema que se modelo, encontramos que existe un margen de error en la amplitud lo cual nos lleva a decir que se tiene una menor potencia, esto se debe a que los componentes al modelarse toman valores aproximados, lo que indica que al implementarse de forma ideal pueden dar un valor cercano pero no igual.

Al controlar la velocidad del viento, radiación, el voltaje y corriente que entrega el sistema híbrido al convertidor Boost el cual va permitir tener tensiones de referencia las cuales les va permitir al controlador MPC comparar y mantener los valores necesarios del punto máximo de potencia MPP el cual es la variable más importante al tener en cuenta el funcionamiento de un sistema híbrido debido a que si ocurren fluctuaciones en la potencia se pueden tener pérdidas en el sistema y con inestabilidad proporcionando un mal funcionamiento.

7.3.2 Simulación con el controlador MPC

Para simular el sistema con el controlador, se utiliza como referencia la red eléctrica mencionado anteriormente, se obtiene como resultado que se comporta de manera ideal como se observa en la figura 5-3 no ocurre desfase entre los voltajes y corrientes, además solo existe un armónico fundamental de 60 Hz, después de que se estabiliza el sistema se observa que las tres fases tienen la misma amplitud y periodo. Al agregar el sistema híbrido con el controlador se debe tener como resultado la adición de potencia que entrega el sistema sin presentar ningún cambio en la estabilidad y calidad del servicio de energía eléctrica.

Figura 7-3: Simulación del Sistema Con el Controlador MPC en Matlab.



Fuente: Propia.

Se utiliza la herramienta Matlab para simular la respuesta del sistema y la salida del controlador, para lograr con una interfaz gráfica que el usuario vea como el controlador va mejorando el arranque y estabilidad manteniendo el MPP del sistema en solo unos segundos, este tipo de controlador que utilizamos posee una alta respuesta ante las perturbaciones, pero a pesar de ello observamos que perdió robustez frente a algunas perturbaciones como la velocidad, esto sucede cuando se presentan variaciones en las condiciones que se vieron afectadas durante un día,

pero a pesar de ello los resultados de que se esperaban en respuesta del sistema fueron los previstos durante el estudio.

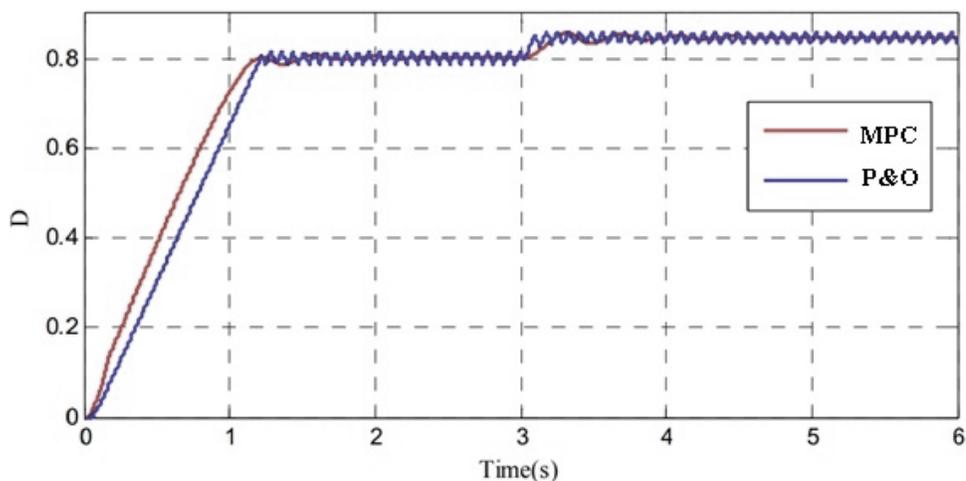
Como se observa en la figura 5-3 los armónicos disminuyeron, lo que produce que la estabilidad de la energía eléctrica que presenta el sistema mejore, también debe aumentar la eficiencia del sistema, las curvas del voltaje y corriente no se distorsionan, aunque no se utilizó el factor de arranque de diseño para el control del aerogenerador.

7.3.3 Simulación del sistema híbrido con la estrategia de P&O y el controlador MPC

La simulación del sistema híbrido se estudia de forma teórica ya que no se puede implementar, por medio de la simulación del controlador MPC y la técnica de Perturbación y Observación se le hará seguimiento al punto máximo de potencia MPP. Esta simulación se lleva a cabo teniendo en cuenta los sistemas anteriores mencionados en Matlab y Simulink, se presentarán algunas de las simulaciones realizadas en donde se verán los resultados de los algoritmos de perturbación y observación y el control MPC.

Los valores de referencia de irradiación y temperatura se tuvieron en cuenta los descritos en la sección de las fichas técnicas del panel solar.

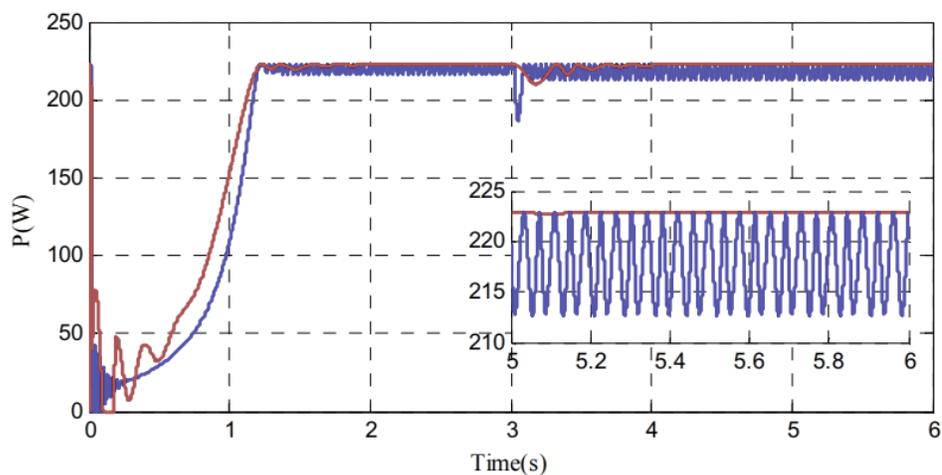
Figura 7-4: Comportamiento del ciclo de trabajo en P&O y MPC.



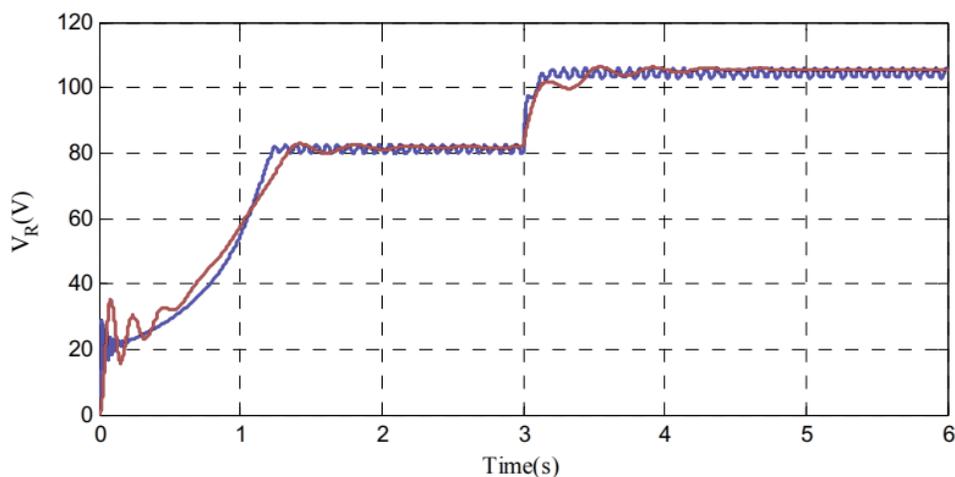
Fuente: Propia.

En la figura 5-4 se observa el cómo es el comportamiento del trabajo D del sistema, en donde el color rojo describe cómo se comporta la técnica MPC y el azul el comportamiento de la Perturbación y Observación.

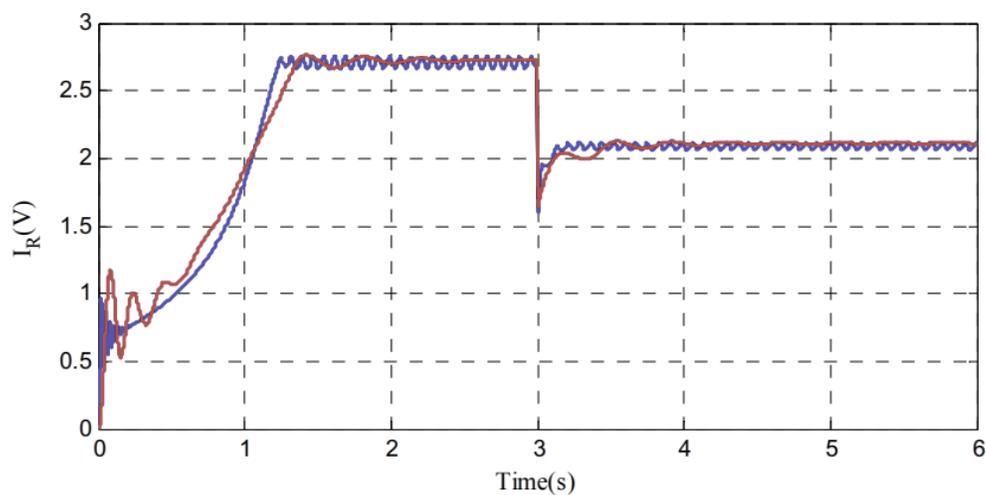
Figura 7-5: Comportamiento de la Potencia en P&O y MPC.



Fuente: Propia.

Figura 7-6: Comportamiento la tensión carga en P&O y MPC.

Fuente: Propia.

Figura 7-7: Comportamiento la corriente carga en P&O y MPC.

Fuente: Propia.

En la figura 5-5 se observa se observa el comportamiento de la potencia frente a estas técnicas de control logrando mantenerse constante a pesar de la variación que se pueden tener en la carga, ya que esta no será constante en donde le controlador varia el ciclo de trabajo del

convertidor logrando que se pueda mantener constante y en el sistema se pueda mantener la máxima potencia estable.

En la figura 5-6 y figura 5-7 se puede ver el comportamiento del voltaje de carga y corriente de carga, los resultados obtenidos en la simulación se logran evidenciar que las dos técnicas de control pueden tener un buen seguimiento de la máxima potencia del sistema, pero sin embargo como también se puede observar que la técnica del MPC presenta un mejor tiempo de respuesta, con menores oscilaciones y teniendo un seguimiento más exacto del punto máximo de potencia MPP.

CONCLUSIÓN

El realizar el modelamiento del sistema eólico y solar brinda una ayuda para lograr determinar y comprender el sistema al momento de interpretar las diferentes variables a controlar, tanto las variables independientes como lo pueden ser las diferentes variables que se pueden encontrar en los elementos de los sistemas. Cuando se va a modelar un sistema es importante tener claro tanto las entradas como todos los componentes que hacen parte del sistema ya que al momento de realizar la simulación se depende de la mayoría de los datos obtenidos en el modelamiento del sistema.

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema de control utilizando la técnica del control predictivo MPC para controlar un sistema híbrido solar- eólico, con el fin de obtener estabilidad y mejor eficiencia del sistema para esto se llevó el seguimiento del punto máximo de potencia MPP. El seguidor MPP, aunque presenta una cantidad de reglas reducidas presenta resultados óptimos con una alta precisión al momento de realizar el seguimiento del punto máximo de potencia, así como se pudo observar en los resultados de la simulación del sistema, logrando mejorar el seguimiento del punto máximo de potencia, de manera más eficiente que otras técnicas de control como se pudo demostrar con la perturbación y observación.

Por medio de la simulación se apunta a que los controladores llegan a ser más robustos cuando se tienen variaciones en las condiciones medias y bajas de tensión, pero cuando se presentan cambios bruscos se generan sobre picos que pueden llegar a afectar el comportamiento del sistema. Esta situación es poco probable que ocurra en la realidad cuando se implemente un sistema híbrido usando controladores, debido a que los recursos energéticos no llegan a tener tantas variaciones de forma instantánea.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Rodríguez , A. Sarmiento y M. Rodríguez, «Alternativas de generación eléctrica mediante fuentes renovables de energía para hoteles en Venezuela,» *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 19, nº 74, pp. 13-23, 2015.
- [2] E. Dalmazzo , B. Valenzuela y L. Espinoza , «Producción de energía renovable no tradicional en América Latina: economía y políticas públicas,» *Apuntes* , vol. 44, nº 81, pp. 67-87, 2017.
- [3] C. Estrada, «Transición energética, energías renovables y energía solar de potencia,» *Revista Mexicana de Física*, vol. 59, nº 2, pp. 75-84, 2013.
- [4] R. García y A. Bracamonte , «Acceso a los servicios de energía. Una crítica a la Agenda 2030 de México,» *Región y sociedad* , vol. 31, pp. 1-12, 2019.
- [5] D. González , «Las energías renovables al servicio de la humanidad,» *Arquitectura y Urbanismo* , vol. 36, nº 1, pp. 93-98, 2015.
- [6] I. Muñoz, Artist, *Modelo y control de un sistema híbrido PV Eólico para una micro-red eléctrica DC*. [Art]. Pontificia Universidad Javeriana, 2015.
- [7] M. Gutierrez , Artist, *Soluciones energéticas para la vida cotidiana*. [Art]. 2012.
- [8] E. Obando y R. Vargas , «Desempeño de un sistema fotovoltaico autónomo frente a condiciones medioambientales de una región en particular,» *Revista académica colombiana de ciencias exactas física* , vol. 40, nº 154, pp. 27-33, 2016.
- [9] S. Salamanca, «Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá,» *Revista científica* , vol. 30, nº 3, pp. 263-277, 2017.

- [10] Yamegueu, D. Azoumah, Y. Pyb, X. Zongo, N. (2011). Experimental study of electricity generation by Solar PV/diesel hybrid systems without battery storage for off grid areas, *Renewable Energy*, 36: 1780-1787.
- [11] Bajpai, P., & Dash, V. (2012). Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 2926-2939.
- [12] J. Lara , Artist, *Sistema Fotovoltaico Autónomo para Casa Rural*. [Art]. Universidad Carlos III de Madrid , 2014.

ANEXOS

ANEXO 1. CONDICIONES DE RIOHACHA, LA GUAJIRA.

HORAS	NUBOSIDAD	RAYOS DEL SOL
1	2	0
2	1	0
3	0	0
4	1	0
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	82
9	65	25
10	60	30
11	0	80
12	60	32
13	49	41
14	81	12
15	79	13
16	85	8
17	78	5
18	85	0

19	84	0
20	0	0
21	0	0
22	0	0
23	0	0
24	0	0

HORA S	RADIACCIO N DE ONDA CORTA	RADIACCIO N DE ONDA DIRECTA	TEMPERATUR A
1	0	0	280
2	0	0	275
3	0	0	270
4	0	0	265
5	0	0	263
6	0	0	260
7	0	0	261
8	120	70	300
9	300	200	330
10	80	0	300
11	110	0	298
12	140	0	302

13	295	20	300
14	120	0	295
15	50	0	270
16	50	0	260
17	70	0	270
18	120	50	280
19	48	30	270
20	0	0	280
21	0	0	275
22	0	0	260
23	0	0	255
24	0	0	250

HORAS	EVAPORACION	VELOCIDAD DEL VIENTO
1	0,1	0,11
2	0,1	0,14
3	0,1	0,1
4	0,1	0,06
5	0	0,05
6	0	0,07
7	0,1	0,09

8	2,1	0,11
9	8	0,15
10	4	0,31
11	5,7	0,33
12	6,2	0,22
13	10,2	0,24
14	5,3	0,2
15	2,8	0,15
16	1,6	0,1
17	2,3	0,12
18	4	0,12
19	1,6	0,1
20	0	0,04
21	0	0,07
22	0	0,11
23	0	0,2
24	0	0,15

ANEXO 2. CODIGO DE SIMULACIONES EN MATLAB

```
clear all

close all

clc

N=3.0;

Mw=2.00;

r_o=1.2250; %aire (kg/m3)

omega=1.8750; % (rad/s)

Tgd_max=14000; % (Nm) eje de velocidad alta

Rt=83.3; % relación de aspas

Ir=5.5e6; %(Kg*m2) eje de baja velocidad

Ktb=-17.50e4; % (Nm/s)

Kto=-14.0e5; %(Nm/(rad/s))

Ktv=2.10e5; %(Nm/(m/s))

Ab=tf(1,1); % segundos

Rb=40.00; % radio de hoja (m)

Kh=2.3e4; %velocidad del eje (Nm)

K1=160e6; %perdida de velocidad de eje (Nm)

Bh=36; %velocidad del eje (Nm)

Bl=25000; %eje de alta velocidad (Nm)

Ktbmax=-1.18e4; % (Nm/deg)

Ktomax=-3.75e3; %(Nm/(rad/s))
```

Ktvmax=2.61e4;%(Nm/(m/s))

Ig=60; %velocidad de eje (Kg*m2)

Iw=0.0;%velocidad de eje (Kg*m2)

At=tf(1,1); %segundos

set(cstprefs.tbxprefs,'Frecuencia unitaria','rad/s')

nmu1=tf([Ig*Iw Bh*Iw+Ig*Bl+Ig*Bh*Rt^2 Bh*Bl+Ig*Kl+Ig*Kh*Rt^2+Kh*Iw Kh*Bl+Bh*Kl
Kh*Kl],1),

nmu2=tf([-Bh*Rt*Bl -Rt*(Kh*Bl+Bh*Kl) -Kh*Rt*Kl],1),

dtf=tf([Ir*Iw*Ig (Ir*Ig*Bl+Bh*Ir*Iw+Ir*Ig*Bh*Rt^2+Bl*Iw*Ig)-(Ig*Iw)*Kto

(Kl*Iw*Ig+Bh*Ir*Bl+Bl*Ig*Bh*Rt^2+Kh*Ir*Iw...

+Ir*Ig*Kl+Bl*Bh*Iw+Ir*Ig*Kh*Rt^2)-(Bh*Iw+Ig*Bl+Ig*Bh*Rt^2)*Kto

(Bl*Kh*Iw+Kl*Ig*Bh*Rt^2+Kh*Ir*Bl+Bh*Ir*Kl+Kl*Bh*Iw+Ig*Bl*Kh*Rt^2)-

(Bh*Bl+Ig*Kl+Ig*Kh*Rt^2+Kh*Iw)*Kto...

(Ig*Kl*Kh*Rt^2+Kh*Ir*Kl+Kl*Kh*Iw)-(Kh*Bl+Bh*Kl)*Kto -Kh*Kl*Kto],1), %%%

D1=minreal((Ktv*nmu1)/dtf);

P=minreal((Ktb*nmu1*Ab)/dtf);

H=minreal((nmu1*At)/dtf);

Gs=tf([-18.6 -34.41 -3.255],[1 0.65 0]);

Tgd=5;

Gt1=feedback(H,D1);

step(Gt1);

CODIGO DEL AEROGENERADOR

$F=60$; $T_{em}=12732$;

$v=1/3$;

$V_r=2070$;

$S_{max}=1/3$;

$V_s=690$;

$I_s=1760$;

$P_s=2e6$;

$n=1500$; 2

$P=3$;

$V_{r1}=(V_r*S_{max})*v$;

$R_s=2.6e-3$;

$L_{si}=0.087e-3$;

$L_m=2.5e-3$;

$R_r=2.9e-3$;

$L_s=L_m+L_{si}$;

$L_i=L_m+L_{si}$;

$V_2=V_{r1}*sqrt(2)$;

$\Sigma=1-L_m^2/(L_s*L_i)$;

$F_s=V_s*sqrt(2/3)/(2*T_{em})$;

$J=127$; $D=1e-3$;

$F_s=4e3$;

$$T_s = 1/F_{sw}/50;$$

$$t_{av} = (\sigma * L_i)/R_r;$$

$$\tau = 0.05/4;$$

$$W_{n1} = 100 * (1/t_{av});$$

$$W_n = 1/t_{av};$$

$$k_p = (2 * W_{n1} * \sigma * L_i) - R_r;$$

$$k_i = (W_n^2) * L_i * \sigma;$$

$$k_p = (2 * W_n * J)/P;$$

$$k_i = ((W_n^2) * J)/P;$$

MODELADO

$$N = 100;$$

$$R = 42;$$

$$R_o = 1.225;$$

$$\beta = 0;$$

$$id_2 = 1;$$

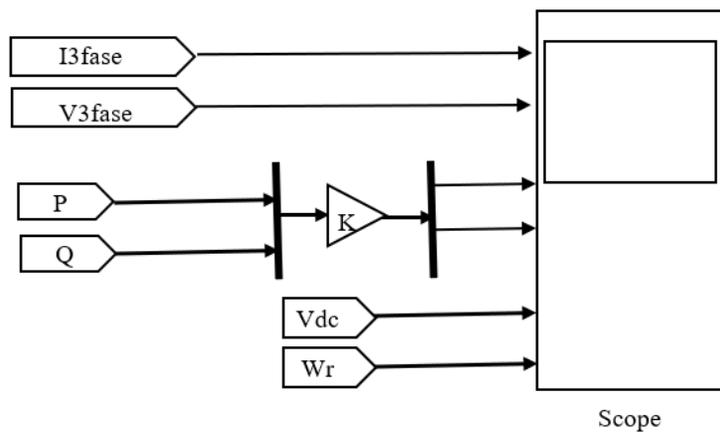
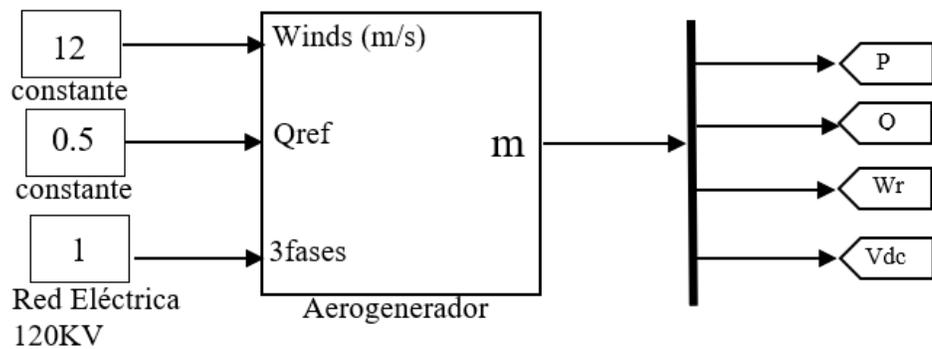
$$tab_lamda = [0.1:0.01:11.8];$$

$$C_p = 0.44;$$

$$\lambda = 7.2;$$

$$R_{opt} = ((0.5 * R_o * \pi * (R^5) * C_p) / (\lambda^3));$$

ANEXO C. ESQUEMAS DE SIMULACIONES EN SIMULINK



ANEXO 4. GRAFICAS DEL ERROR ENTRE EL CONTROLADOR MPC VS EL PID