



DISEÑO DE UN SISTEMA CONTROL MPPT PARA LA MÁXIMA GENERACIÓN
DE POTENCIA MEDIANTE LA REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD
ESPECÍFICA ÓPTIMA EN UN AEROGENERADOR

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

JUAN GUILLERMO RAMOS MOSQUERA

DIRECTOR:

PhD. ALEJANDRO PAZ

PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA DE CALI
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA Y CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
CALI, VALLE DEL CAUCA 2021

*“Lo que distingue a las mentes verdaderamente originales
no es que sean las primeras en ver algo nuevo, sino que
son capaces de ver como nuevo lo que es viejo,
conocido, visto y menospreciado por todos”*

Friedrich Nietzsche

RESUMEN

En el presente trabajo inicialmente se realiza una breve contextualización de la situación actual de la producción de energía eléctrica en el mundo y la importancia de la generación eólica en la actualidad, seguido de esto se presentan conceptos generales acerca de una turbina eólica, tipos elementos que la componen, clasificaciones etc. Luego se expone la teoría básica acerca de los fenómenos aerodinámicos en una turbina que son necesarios para comprender el flujo de la potencia a través del sistema y como esta se ve afectada por distintos factores.

En las secciones siguientes se profundiza en los distintos tipos de elementos eléctricos y electrónicos, que son implementados en los sistemas de turbinas eólicas, así como los diferentes tipos de algoritmos MPPT más conocidos. Seguido, se muestran los mecanismos por medio de los cuales se explica la modificación en la extracción de potencia por parte de los algoritmos MPPT.

Hacia el final del documento se muestra el modelo de turbina eólica implementado en Simulink, se detallan los elementos del sistema y se realizan mediciones de la potencia de salida con el fin de determinar las mejoras en la extracción que proporciona el añadir un algoritmo tipo P&O. Adicionalmente, se identifican zonas potenciales para la explotación del recurso eólico en el territorio colombiano según el recurso de vientos anual que presente.

CONTENIDO

RESUMEN.....	3
CONTENIDO.....	4
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
1 INTRODUCCIÓN	10
2 OBJETIVO GENERAL.....	11
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
3 CONTEXTO Y REVISIÓN DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA....	12
4 GENERALIDADES DE TURBINAS EÓLICAS.....	17
4.1 Historia de las turbinas eólicas.....	17
4.2 Que es un aerogenerador o turbina eólica.....	18
4.3 Tipos de Turbinas.....	19
4.4 Elementos de una turbina eólica.....	19
4.5 Clasificación según número de palas.....	21
4.6 Clasificación según el nivel de potencia.....	21
5 TEORÍA DE AEROGENERADORES.....	22
5.1 Potencia debida a la energía cinética del viento. [30]	23
5.2 Rendimiento de generadores eólicos.....	25
5.3 Velocidad Óptima de Giro.....	27
6 GENERADORES ELÉCTRICOS.....	28
6.1 Generadores síncronos.....	29
6.1.1 Generador de rotor bobinado. [35].....	29
6.1.2 Generador de imán permanente. [35].....	30
6.2 Generadores asíncronos o de inducción. [34].....	30
6.2.1 Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla. [36].....	31
6.2.2 Generador de inducción con rotor bobinado.....	31
6.2.3 Generadores de deslizamiento variable. [35]	31
6.2.4 Generadores doblemente alimentados. [37].....	32
7 CONVERTIDORES DE POTENCIA	33
7.1.1 Convertidor con diodos. [40].....	34
7.1.2 Convertidor Back to Back. [40].....	34
7.1.3 Convertidores matriciales. [40]	35

7.1.4	Convertidores con fuente Z. [40].....	36
7.1.5	Convertidores multinivel. [40]	37
8	ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DE MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA (MPPT).....	39
8.1	Tipos de algoritmos MPPT.	40
8.1.1	Hill Climb Search o perturbar y observar (P&O).	40
8.1.2	Lookup table.	40
8.1.3	MPPT basado en lógica difusa o Fuzzy.	41
8.1.4	Algoritmos basados en Redes neuronales.	41
8.1.5	Métodos teóricos.....	41
8.1.6	Métodos alternativos.	42
8.1.7	Otros enfoques.....	42
9	COVERTIDOR DC-DC.....	43
10	RELACIÓN MPPT CON LA TEORÍA DE TURBINAS EÓLICAS	46
11	SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA.....	48
11.1	Sistema eólico simplificado.	50
12	MODELO COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO DEL SISTEMA EÓLICO.	51
12.1	Descripción de los elementos del modelo.	51
13	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	59
13.1	Turbina sin MPPT.	59
13.2	Turbina sin MPPT con carga menor.	60
13.3	Sistema con algoritmo MPPT a 10m/s.....	61
13.4	Sistema con algoritmo MPPT frente a cambios de velocidad del viento.	61
14	ZONAS CON POTENCIAL EÓLICO EN COLOMBIA.	63
14.1	Régimen de vientos en Colombia.....	64
15	TRABAJOS FUTUROS	65
16	CONCLUSIONES	65
17	BIBLIOGRAFÍA.....	66
18	ANEXOS.....	76
18.1	Anexo 1. Modelos de turbinas.	76
18.2	Anexo 2. Datasheet completo del generador de 10KW.....	77
18.3	Anexo 3. Código Script para gráfica y filtrado resultados.	78

18.4	Anexo 4. Código algoritmo P&O implementado.....	79
18.5	Anexo 5. Sistema sin MPPT.....	80
18.6	Anexo 7. Simulación sin MPPT a 10m/s con carga 764Vrms.	81
18.7	Anexo 8. Simulación con MPPT a 10m/s.....	81
18.8	Anexo 9. Simulación con MPPT a cambio de velocidad (10m/s,7m/s,9m/s)....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Diagrama básico de turbina eólica. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]</i>	13
<i>Figura 2. Diagrama de bloques de una turbina actual. Fuente: Chen, Z. & Guerrero, Josep & Blaabjerg, F. [7].....</i>	13
<i>Figura 3. Mecanismo de control de Pitch. Fuente: Jabir, Muhammad & Illias, Hazlee & Raza, Safdar & Mokhlis, Hazlie. [8].....</i>	15
<i>Figura 4. Mecanismo de control de Pitch. Fuente: International Hellenic University. [9]</i>	15
<i>Figura 5. Turbinas de eje vertical y de eje horizontal. Fuente: Hassam Nasarullah Chaudhry, John Kaiser Calautit, Ben Richard Hughes. [23].....</i>	19
<i>Figura 6. Elementos principales de una turbina eólica. Fuente: U.S Department of Energy. [25].....</i>	20
<i>Figura 7. Flujo del aire a través del aerogenerador ideal. Fuente: EADIC, Universidad de Alcalá. [29].....</i>	22
<i>Figura 8. Máximo valor del coeficiente de potencia vs el factor de ralentización “a”. Fuente: Manuel Franquesa Voneschen. [30]</i>	24
<i>Figura 9. Eficiencias de componentes de una instalación eólica. Fuente: Manuel Franquesa Voneschen. [30].....</i>	26
<i>Figura 10. Potencia generada vs giro del rotor (considerar $\Omega=n$). Fuente: Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis. [32]</i>	28
<i>Figura 11. Mapa conceptual Generadores Eléctricos. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración Propia].....</i>	33
<i>Figura 12. Topología convertidor de diodos. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40].....</i>	34
<i>Figura 13. Topología convertidor back to back. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40].....</i>	35
<i>Figura 14. Topología convertidor matricial. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40].....</i>	36
<i>Figura 15. Topología convertidor fuente Z. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40].....</i>	37

<i>Figura 16. Topología convertidor multinivel. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40].....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 17. Mapa conceptual convertidores. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]... 39</i>	<i>39</i>
<i>Figura 18. Topología de un convertidor Buck. Fuente: Wikipedia. [60].....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 19. Curva coeficiente de potencia vs relación de velocidad en punta de pala. Fuente: Mouna Ben Smida, Anis Sakly. [66].....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 20. Curva potencia mecánica vs velocidad del generador(rotor). Fuente: Mohamed Zribi, Muthana Alrifai and Mohamed Rayan. [67].....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 21. Esquema sistema eólico. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 22. Diagrama sistema eólico simplificado. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 23. Sistema eólico implementado en Simulink. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 24. Parámetros técnicos del generador eléctrico modelado. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 25. Especificaciones de la Carga. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 26. Voltajes de salida rectificadas del generador. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 27. Diagrama de flujo de algoritmo P&O. Fuente: L. Badreddine, S. Zouggar, M. L. Elhafyani and F. Z. Kadda. [78].....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 28. Diagrama de flujo de del algoritmo a implementar. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 29. Respuesta sin MPPT a 10m/s. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 30. Respuesta sin MPPT con carga de 764Vrms a 10m/s. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 31. Respuesta con MPPT a 10m/s. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 32. Respuesta con cambios de velocidad de viento. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia].....</i>	<i>62</i>

Figura 33. Mapa de vientos anuales (Colombia, región Caribe). Fuente: Sistema ATLAS, Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales (IDEAM). [81]..... 63

Figura 34. Mapa de vientos anuales (Colombia). Fuente: Sistema ATLAS, Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales (IDEAM). [81]..... 64

1 INTRODUCCIÓN

La energía eólica está catalogada como una de las más atractivas formas de energía renovable debido a las características que posee, cero generaciones de residuos, nula contaminación al medio ambiente, altas capacidades de producción de energía (zonas con potencial eólico) y sus atractivos costos de implementación, son algunas de sus ventajas.

Gracias a sus atractivas condiciones, con el avance de las ciencias y la ingeniería, los sistemas eólicos han alcanzado una alta tecnificación en la que se desea que estas máquinas sean lo más eficientes posibles con el fin de sacar mayor provecho del recurso eólico.

Según la teoría de aerogenerador es conocido que una turbina eólica bajo condiciones determinadas del viento, carga, etc, puede operar en diferentes zonas o puntos de su curva de potencia, con lo que existen técnicas de control que permiten hallar y ubicar a la turbina dentro de estos puntos. Estos sistemas de control que permiten optimizar al máximo la transferencia de energía de las corrientes de viento a electricidad y mantener a la turbina en el punto de máxima generación de potencia, son conocidos como MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Los sistemas de control MPPT pueden ser implementados a través de algoritmos, mediante diferentes lógicas, variables y enfoques, según el tipo de algoritmo en cuestión, estos algoritmos conducen y mantienen al sistema eólico operando en el punto de máxima extracción de potencia. Aunque en los últimos años la literatura acerca de estos algoritmos ha tenido un gran desarrollo; comparaciones, pruebas de funcionamiento, estudios de estabilidad, es frecuente encontrar que la mayoría de estos trabajos no muestran de manera clara o cuantitativa cual es la mejora en la eficiencia que se puede obtener al implementarlos.

Este hecho aunque básico, puede ser un aspecto de vital importancia al considerar añadir o no un sistemas MPPT en la turbina eólica, especialmente cuando se requiere construir sistemas eólicos de baja potencia, en los cuales generalmente no se cuentan con tanta tecnificación. Tener estudios que evidencia las mejoras obtenidas a través de los algoritmos MPPT puede ayudar a resaltar la vitalidad de estos sistemas en la generación eólica.

2 OBJETIVO GENERAL

Diseñar e implementar un prototipo de sistema de control MPPT que se encargue de maximizar la transferencia de potencia en una turbina eólica de menos de 100KW, esto mediante algoritmos MPPT que regulen la velocidad de giro específica de la turbina a distintas velocidades del viento.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Diseñar un sistema de control MPPT.
- Evaluar mediante modelos computacionales de turbinas eólicas un prototipo del sistema de control diseñado.
- Comparar la transferencia de potencia de la turbina eólica con el sistema de control MPPT diseñado con respecto a cuando este no es utilizado.
- Identificar regiones de Colombia donde sea posible el aprovechamiento del recurso eólico con explotaciones de baja potencia (menores 100kW).

ALCANCES.

- Construir un prototipo del sistema de control diseñado.
- Evaluar el funcionamiento del prototipo del sistema mediante modelos computacionales de turbinas eólicas de menos de 100kW.
- Exponer la potencialidad en zonas interconectadas de Colombia donde este tipo de sistemas sean aplicables, es decir, donde sea posible y atractiva la explotación eólica.

3 CONTEXTO Y REVISIÓN DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN EÓLICA.

Panorama energético actual a nivel mundial.

El consumo y producción de energía puede verse como uno de los indicadores más dicentes acerca del nivel de desarrollo y crecimiento económico-industrial de un país, de manera que el rápido incremento en las economías actuales va de la mano con un aumento en la demanda de generación de energía eléctrica. Esta situación se ve evidenciada en países con un alto índice de desarrollo como Noruega, Suiza, Australia, Islandia, Canadá Estados Unidos y Finlandia, los cuales a su vez se encuentran entre los países con mayor consumo de energía eléctrica per cápita [1] [2]. Entre los años 2006 y 2016 el consumo mundial paso de 130TWh a alrededor de 155TWh, un 19% de aumento. Se espera que para el año 2030 el incremento sea de un 52% [3].

Actualmente las formas más ampliamente extendidas para suplir este gigantesco consumo de energía eléctrica se basan en fuentes convencionales de generación, mediante la explotación de recursos no renovables como los hidrocarburos, carbón, petróleo, gas natural, entre otros. Para el año 2017, el 75.5% de la producción de energía eléctrica fue suplida mediante fuentes no renovables, mientras el 24.5% restante corresponde a los emergentes sistemas de generación con fuentes alternativas, dentro de este porcentaje se encuentra la tradicional explotación hidroeléctrica [4].

Aunque comúnmente siempre se ha atribuido como causa de la no masificación de las fuentes renovables de generación eléctrica a el alto costo de implementación y bajas tasas de retorno de inversión de estas fuentes. Sin embargo, estudios realizados por el Foro económico mundial en el cual se analizan los costos de instalación y puesta en marcha de sistemas renovables en 30 países, revelan que estos costos ya se equiparan con los de sistemas de generación eléctrica mediante combustibles fósiles [5].

El que los sistemas de generación renovables sea una opción viable para los inversionistas juega un papel vital en su masificación, posicionando a estas fuentes como fuertes competidoras de las formas de generación eléctrica no renovables que aunque parecen ser atractivos por su menor costo y gran retribución monetaria frente a las renovables, generan diferentes daños y problemáticas en el medio ambiente, cuya solución o posterior mitigación incurre también en gastos que por lo general no son considerados en sus costos totales de implementación. Sumado a esto, también hay que considerar el inminente agotamiento de materia prima de las plantas de generación no renovables (hidrocarburos y material radioactivo) las cuales son finitas en el planeta.

Representando, hasta el 2016, el 4% del total producido con fuentes renovables, se encuentran los sistemas de generación eólica, una de las formas alternativas que presentan mayor desarrollo. En el periodo entre año 2005 al 2015 la capacidad de generación eólica global aumento en un 63% con una generación de 433GW [5]. Para el año 2019 la generación eólica se convierte en cerca del 25% del total generado con fuentes renovables [6].

Sistemas de generación eólica.

Con el amplio desarrollo de la ciencia y la tecnología, específicamente en el campo de la electrónica y dispositivos semiconductores, la electrónica de potencia comienza a jugar un papel crucial a la hora de hacer viables y eficientes estos sistemas de generación a través de fuentes no convencionales como los sistemas de generación eólica.

De forma general un sistema de generación eólica consiste en un rotor, una caja de engranajes, y generadores de velocidad fija, los cuales buscan aprovechar la fuerza y velocidad del viento para mover las aspas conectadas al rotor e inducir con este movimiento corriente eléctrica en el generador. Figura 1.

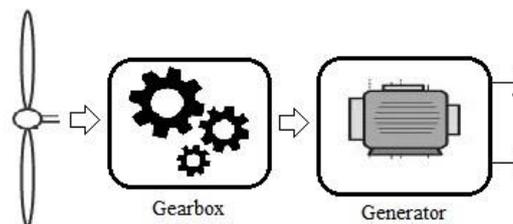


Figura 1. Diagrama básico de turbina eólica. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

En la actualidad los diseños más robustos de turbinas eólicas ya incluyen dispositivos electrónicos de potencia como convertidores, inversores, transformadores, filtros e incluso sistemas de censado y control que permiten explotar al máximo el recurso eólico además de permitir una adecuada interconexión de las turbinas con la red.

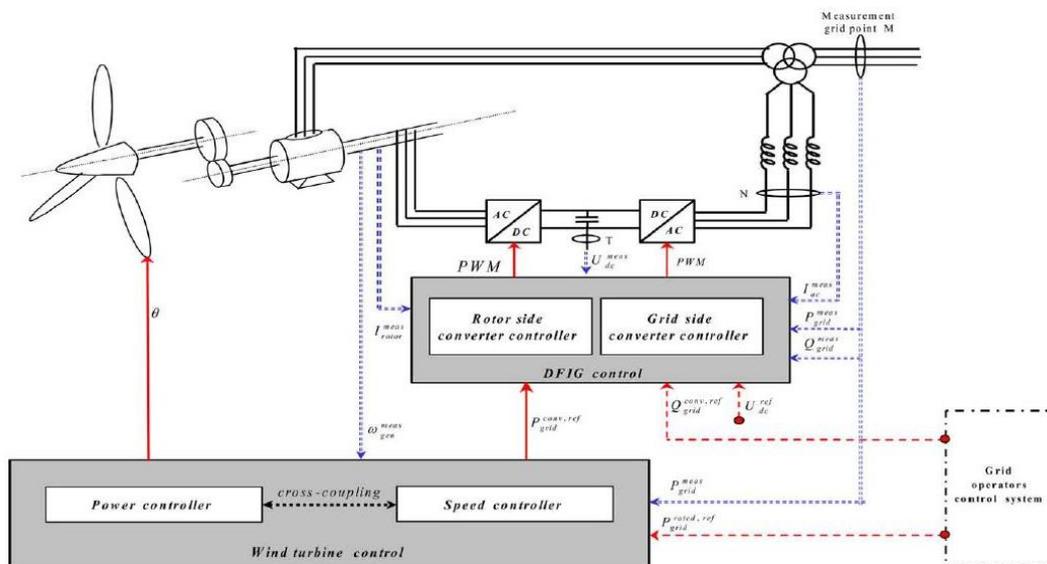


Figura 2. Diagrama de bloques de una turbina actual. Fuente: Chen, Z. & Guerrero, Josep & Blaabjerg, F. [7]

La Figura 2 muestra un ejemplo de un posible diseño dentro de la gran variedad de distintas configuraciones que pueden ser implementadas en la actualidad.

Conversión energía mecánica a eléctrica.

La turbina por medio de aspas es el elemento encargado de aprovechar la fuerza y velocidad del viento para proporcionar un movimiento mecánico giratorio, el cual hace posible la conversión de energía mecánica a energía eléctrica con un generador eléctrico. Entre estos dos procesos generalmente se utiliza una caja de engranajes que multiplica la velocidad de giro hacia el generador debido a que las gigantescas turbinas utilizadas para la generación eólica giran a velocidades bajas con alto par, las cuales no son aptas para inducir la generación de energía en el generador.

Un aspecto importante en las turbinas eólicas consiste en que no es recomendable que estas giren a velocidades muy superiores a sus velocidades nominales máximas, esto causa tensiones mecánicas excesivas sobre la caja de engranes, aspas e incluso sobre la torre pudiendo generar deterioros y posibles colapsos de la estructura. Por esta razón las turbinas modernas cuentan con controles de potencia (velocidad de giro) que se gestionan aerodinámicamente mediante el giro de las aspas. Además, este control a su vez permite limitar la potencia que se genera en la turbina en aras de no alterar los niveles de voltaje inyectados a la red.

Mecanismos de control aerodinámico.

En cuanto al control a través de la aerodinámica existen dos maneras comunes en las que realiza esta tarea, una de ellas es mediante el control de ángulo de paso “Pitch control”, en el cual se rotan las aspas a través de un eje longitudinal que permite rotar de forma libre el ángulo de incidencia con el viento de manera que cuando se supere una cierta velocidad de giro (en ocasiones se tiene de antemano la potencia con respecto a la velocidad de la turbina por lo que se mide directamente la potencia) se modifique el ángulo de paso y se disminuya. Figura 3.

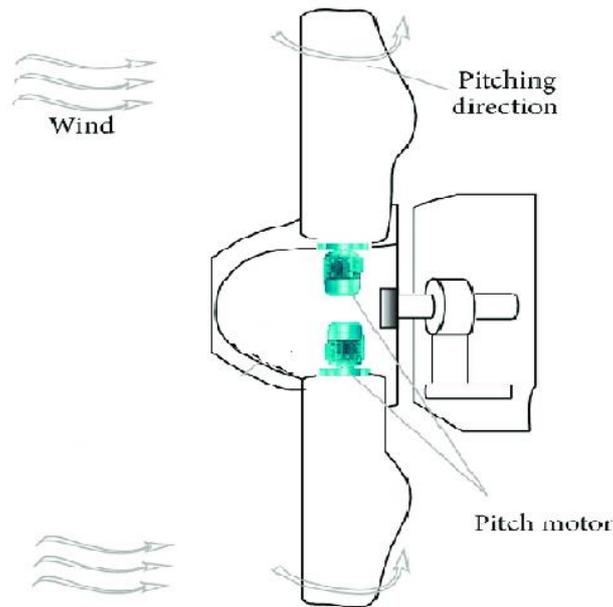


Figura 3. Mecanismo de control de Pitch. Fuente: Jabir, Muhammad & Illias, Hazlee & Raza, Safdar & Mokhlis, Hazlie. [8]

Otra técnica consiste en la regulación por pérdida aerodinámica o “Stall control”, esta corresponde a un control pasivo ya que las aspas están construidas de manera que, si el viento supera una cierta velocidad, la aerodinámica del aspa causa una pérdida de sustentación debida al aumento de la turbulencia tras las aspas y por tanto una disminución de la velocidad de giro o detención total de la turbina. Figura 4.

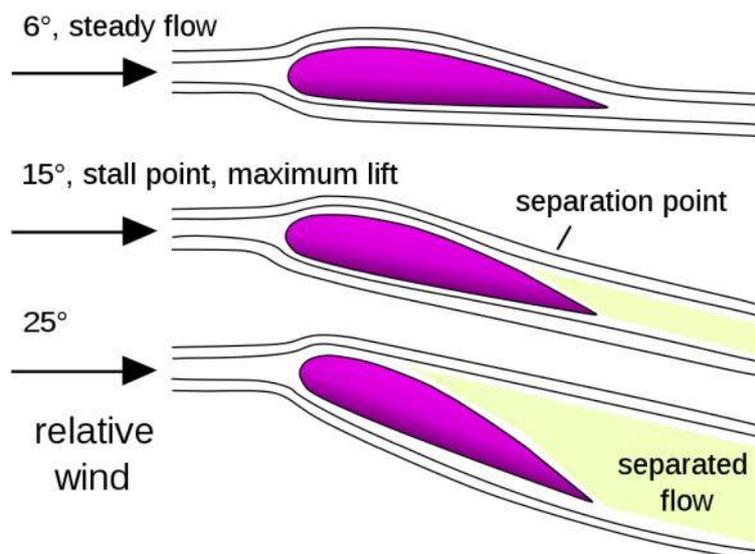


Figura 4. Mecanismo de control de Pitch. Fuente: International Hellenic University. [9]

Generación eléctrica.

Los generadores eléctricos dentro un sistema eólico juegan un importante papel, estos pueden ser de diferentes tipos según sus principios de funcionamiento como son los síncronos y asíncronos. Los generadores síncronos por lo general se basan en imanes permanentes o electroimanes conectados con tensión en DC que polariza el estator, estos al girar generan energía eléctrica en una frecuencia fija sincronizada con la de la fuente de polarización, son ampliamente utilizados por pueden operar fácilmente a distintas velocidades de viento

Por otra parte, están los generadores asíncronos o de inducción, son fabricados con configuraciones llamadas jaulas de ardilla por su similitud a este objeto, se caracterizan por tener un rango de operación a distintas velocidades de viento bastante bajo, debido a que en distintas velocidades de viento generan frecuencias variables. Estos inconvenientes pueden ser solventados con convertidores de potencia.

Electrónica de potencia.

Desde el campo de la electrónica se conoce que los dispositivos convertidores pueden ser diseñados con distintas topologías, configuración y/o aplicación de diferentes técnicas con el fin de resolver distintas problemáticas que enfrentas los sistemas eólicos como la mejora en la eficiencia, la calidad de la energía y operación en mayor rango de velocidades de viento, compensación de energía reactiva, entre otros.

Con respecto a los generadores de inducción, para conservar la explotación del viento en distintas velocidades, es necesario introducir en la turbina un dispositivo de electrónica de potencia conocido como convertidor Back to Back el cual se encarga de convertir la energía AC de frecuencia variable a la salida del generador a una señal DC para luego nuevamente ser convertida en AC, esta vez a frecuencia fija de la red.

Conexión a la red/filtrado.

La conexión de la turbina con la red también es un aspecto de importancia debido a que a través de estas redes el sistema de generación puede proporcionar la energía eléctrica generada hacia los usuarios finales. Esta correcta conexión debe garantizar que la energía que es generada e inyecta a la red tenga ciertos parámetros de calidad, como lo son bajos contenidos armónicos, niveles de frecuencia y de tensión regulados iguales a los de la red, evitando así inconvenientes e interferencias entre ambos sistemas.

Por otra parte, los generadores que en principio eran conectados de manera directa a la red para alimentar la potencia reactiva necesaria para la inducción en el generador, requieren de sistemas de compensación de potencia reactiva (SVC, STATCOM) que como su nombre indica se encarga de absorber potencia reactiva en caso de que el voltaje hacia la red aumente y entregar potencia reactiva en caso de que el voltaje disminuya nivelando siempre los niveles de tensión hacia la red.

Elevación de voltajes.

Finalmente, en los sistemas eólicos se utilizan transformadores que elevan la señal a altos voltajes y bajas corrientes para que pueda ser transmitida reduciendo al máximo las pérdidas por transmisión.

Maximización de la extracción de potencia.

En cuanto a la cantidad de potencia que es extraída, debido a que una turbina eólica puede funcionar a velocidades distintas, este hecho causa que el sistema se ubique en distintos puntos de operación en la curva de potencia. Debido a lo anterior es necesario diseñar sistemas de rastreo de punto de potencia máxima MPPT que permitan a los sistemas eólicos ser más eficientes. Existe una amplia variedad de estos algoritmos o técnicas MPPT, entre los más usados están el Perturb and observe (P&O), Optimal Torque Control (OTC), Power Signal Feedback (PSF), Hill Climbing Search (HCS), and Fuzzy Logic control (FLC), Tip Speed Ratio (TSR) [10] [11].

4 GENERALIDADES DE TURBINAS EÓLICAS

4.1 Historia de las turbinas eólicas.

Desde tiempos antiguos la humanidad ha utilizado las fuerzas de la naturaleza para realizar trabajos complejos que requieren mayor trabajo del que el hombre puede realizar, como lo es la fuerza del viento o recurso eólico. Las formas más antiguas de aprovechamiento del viento se tienen aplicadas en las velas de embarcaciones egipcias en el V milenio antes de cristo. 17 siglos antes de cristo civilizaciones como la persa, iraquí, egipcia y la china, contaban con molinos de viento, los cuales consistían en rotores verticales en palas de madera conectados directamente a la muela o piedra del molino, estos eran utilizados para regar las llanuras y en la trituration de granos [12].

En la edad media los molinos comenzaron a ser usados comúnmente en el noroeste de Europa, a partir de año 1180. Aunque se piensa que los cruzados trajeron la tecnología de los molinos desde oriente hasta Europa, esto es poco probable debido a la gran diferencia en los diseños de los molinos popularizados en Europa, que eran principalmente de tipo eje horizontal [13].

En algunos países europeos como Holanda se perfeccionaron los diseños de molinos, la explotación de este recurso llego a tener una gran importancia para actividades agrícolas a tal punto que para el siglo XVIII en territorio holandés existían 20.000 molinos en funcionamiento los cuales proporcionaban alrededor de 20kW por separado [12].

Para el siglo XIX, en Escocia se construye la primera turbina eólica utilizada para la generación de electricidad, el profesor James Blyth en 1887 construye la turbina de 10m para alimentar de electricidad su casa de campo. Sin embargo, para este entonces la tecnología aún era muy costosa para ser implementada comercialmente [14].

En América, Estados Unidos, para el año 1883 Steward Perry diseña la turbina más vendida de la historia conocida comúnmente como el multipala americano, el cual se utilizaba principalmente para el bombeo [12]. En 1890 se perfecciona el diseño y construcción de los multipala y se comienza a utilizar para la generación de electricidad en casa granjas y empresas lo que conlleva a su vez la aparición de varias empresas relacionadas con las turbinas eólicas [15]. Más tarde, luego de un descenso en el desarrollo eólico en el año 1990, el mercado norte americano de la energía eólica se repotencia gracias a la maduración de las tecnologías en el área, los incentivos económicos dados a las empresas que incluyeran en su portafolio el recurso eólico y el cambio de actividades económicas por parte de granjeros que vieron en la generación de electricidad mayores ingresos que en la agricultura [16].

En la actualidad con el aumento de la demanda mundial de energía eléctrica y las claras problemáticas en cuanto a contaminación ambiental, aumento de precios y naturaleza limitada de los recursos de la producción de electricidad a través de carbón y gas, están causando que las energías renovables tomen un papel protagónico en el aporte a la oferta mundial. La reducción de los costes de generación eléctrica a través de energía eólica impulsados por el gran desarrollo y capacidad que han tenido las turbinas eólicas, han sido en gran parte las responsables del auge de este recurso renovable en la actualidad. Durante el transcurso del año 2020 se tiene previstos el desarrollo e instalación de turbinas de una capacidad individual de hasta 15MW y en el año 2030 que los parques eólicos suministren un total de 16,02GW a la energía eléctrica mundial [17].

Entre los años 2013 y 2014 la energía eólica había aumentado en 52.7GW en la generación eléctrica mundial, siendo la eólica marítima la forma con mayor crecimiento superando incluso lo aportado por la eólica terrestre al total mundial [18]. Para inicios del año 2019 la capacidad total instalada alcanzaba los 597GW [19] y para el año 2020 la capacidad total instalada se encuentra cerca de alcanzar el doble del total del año 2014, llegando a los 650.8GW en el primer trimestre del 2020 [20].

4.2 Que es un aerogenerador o turbina eólica.

Una turbina eólica es una máquina que se encarga de transformar la energía proveniente del viento, en otro tipo de energía, ya sea mecánica para trabajos de agricultura o electricidad que es en lo que son usadas en la actualidad [21].

4.3 Tipos de Turbinas.

Eje de Rotación

Según la posición que tiene el eje de rotación con respecto al viento las turbinas eólicas pueden clasificarse en 2 grandes grupos [22]:

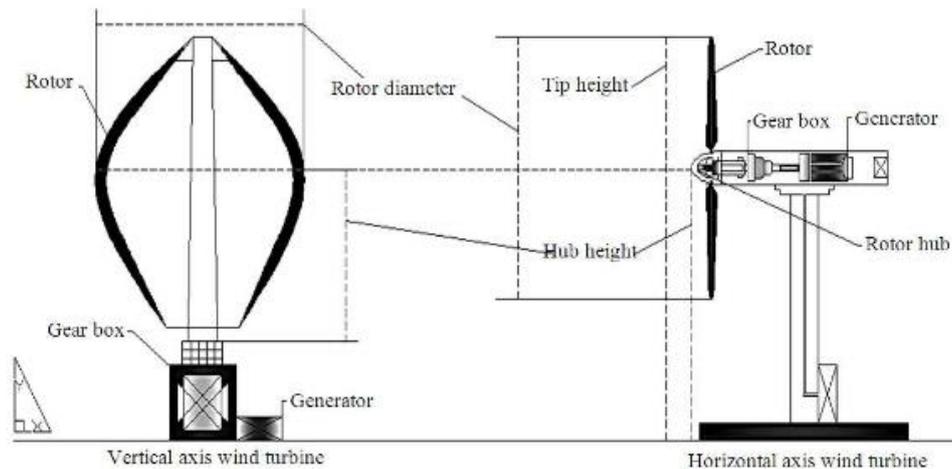


Figura 5. Turbinas de eje vertical y de eje horizontal. Fuente: Hassam Nasarullah Chaudhry, John Kaiser Calautit, Ben Richard Hughes. [23]

Turbinas de eje horizontal: El eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. Estas se han desarrollado con más popularidad debido a que han permitido obtener mayor eficiencia en la conversión que las de eje vertical. Las palas pueden estar ubicada tanto en proa(adelante) como en popa(atrás) de la navecilla o góndola.

Turbinas de eje vertical: Aunque estas no alcanzan las eficiencias obtenidas con turbinas de eje vertical, poseen algunas ventajas nada despreciables, como que no necesitan sistemas de orientación y por lo tanto no están sometidas a esfuerzos en los cambios de orientación, lo que mejora la durabilidad de la turbina. Dentro de esta categoría las más comunes son los diseños Savonius y Darrieus.

En la actualidad existen empresas que ya están trabajando en diseñar y comercializar turbinas que no utilizan palas, sino que atrapan la energía a través del aprovechamiento de patrones giratorios causados por principios de vorticidad [24].

4.4 Elementos de una turbina eólica.

Cada turbina, según su diseño puede tener elementos distintos y con distintas configuraciones sin embargo los principales elementos que la conforman son los siguientes [25]:

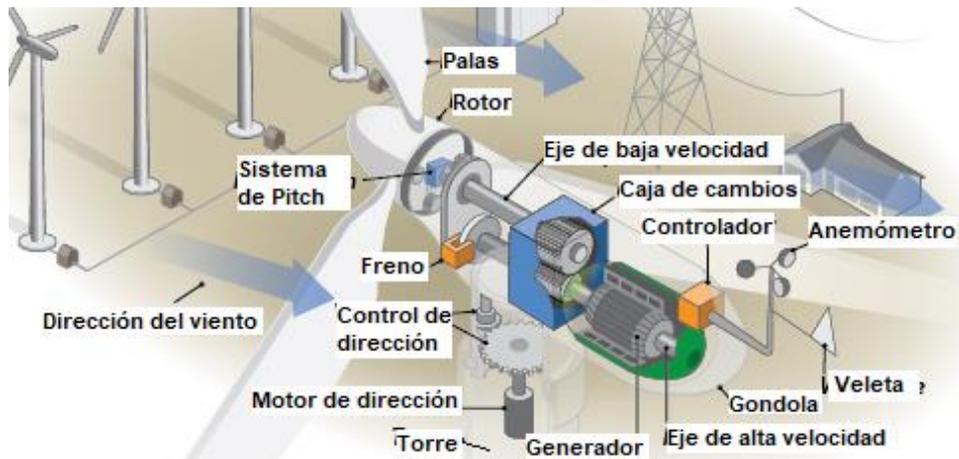


Figura 6. Elementos principales de una turbina eólica. Fuente: U.S Department of Energy. [25]

- **Torre:** Se encarga de sostener la góndola y el rotor.
- **Góndola:** Dentro de ella se encuentran ubicados la mayoría de los elementos que conforman la turbina.
- **Rotor:** Formado por las palas y el buje que las une entre sí.
- **Palas:** También conocidas como hélices se encargan de atrapar la fuerza del viento.
- **Anemómetro:** Medidor de la velocidad del viento. Este va incluido en turbinas que cuenta con sistemas de control que utilizan esta información.
- **Frenos:** Son utilizados para el freno mecánico de la turbina en caso de emergencia, pueden ser hidráulicos o eléctricos.
- **Caja de cambios o multiplicadora:** Se encarga de aumentar la baja velocidad de rotación del rotor a una velocidad alta que pueda inducir electricidad en el generador eléctrico.
- **Generador:** Transforma el movimiento rotacional en energía eléctrica. Se usan tanto generadores asíncronos como generadores síncronos.
- **Controlador:** Es un controlador electrónico que monitorea las condiciones de funcionamiento de la turbina tales como temperaturas, presiones, vibraciones, etc, y en algunas turbinas pueden llegar a tomar decisiones de control.
- **Sistema de control de Pitch:** Se encarga de realizar un control de la velocidad de giro de la turbina por medio de la variación en el ángulo de paso de las aspas.
- **Dirección:** Se refiere al mecanismo que orienta a la turbina para que el viento incida perpendicularmente sobre ella.
- **Veleta:** Mide la dirección en la que sopla el viento.

Típicamente también se han añadido otros elementos como convertidores de potencia, transformadores, que contribuyen a la mejora en la calidad de energía y conexión a la red [26].

4.5 Clasificación según número de palas.

Según el número de palas o aspas con que cuenta la turbina eólica, pueden clasificarse en los siguientes grupos [27]:

Turbina monopala: Las turbinas con una sola pala a pesar de que tiene ventajas en cuanto el ahorro en materiales de construcción y mayores velocidades en el rotor, también tiene desventajas importantes que la hacen menos atractiva frente a otras, desventajas como que requieren un contrapeso para compensar la única pala, generan más ruido sonoro y alto desequilibrio aerodinámico.

Turbinas bipala: En este tipo de turbinas la presencia de una nueva hélice disminuye el desequilibrio aerodinámico en comparación con las monopala, sin embargo, continúan presentando esfuerzos dinámicos que tiene que ser tratados con dispositivos especiales para disminuir el estado de carga, lo cual al final aumenta el costo de estas turbinas.

Turbinas tripala: Son las más comunes, ya que además de generar menor contaminación auditiva debido a su baja velocidad de rotación, los efectos de esfuerzos y desequilibrios de rotor sobre la estructura son casi nulos lo que a su vez tienen gran acogida por la reducción en mantenimientos de la turbina.

Turbina multipalas: También conocido como turbinas “tipo americana”, en sus inicios fueron muy conocidas por ser usadas en el bombeo de agua en estados unidos, se caracterizan por tener un alto par de arranque y generalmente poseer una hélice en popa para la orientación hacia el viento.

4.6 Clasificación según el nivel de potencia.

Según la potencia nominal que desarrolle la turbina, la cual va muy de la mano con el diámetro del rotor, es posible clasificarlas en algunos grupos como lo son [28]:

P_n: Potencia nominal y R: radio de las palas del rotor.

Micro: $P_n < 1\text{kW}$ y $R < 1\text{m}$. Usadas para aplicaciones de Embarcaciones, sistemas de comunicación, refugios de montaña, iluminación.

Mini: P_n entre 1kW - 10kW y R entre 1m - 3m . Usadas para aplicaciones de Granjas, viviendas aisladas (sistemas EO-FV), bombeo.

Baja: P_n entre 10kW-100kW y R entre 3m-9m. Usadas para aplicaciones de Comunidades de vecinos, PYME´s (sistemas mixtos EO-diésel), drenaje, tratamiento de aguas.

Media: P_n entre 100kW-1000kW y R entre 9m-27m. Usadas para aplicaciones de Parques Eólicos (terreno complejo).

Alta: P_n entre 1MW-10MW y R entre 27m-81m. Usadas para aplicaciones de Parques Eólicos (terreno llano, mar adentro).

Muy alta: $P_n > 10MW$ y $R > 81m$. Se encuentran en fase de desarrollo e investigación.

5 TEORÍA DE AEROGENERADORES

La potencia generada por una turbina eólica es resultado de la transformación de la energía cinética contenida en el viento a energía eléctrica producida por el giro del rotor del generador. Sin embargo, la energía cinética total del viento no puede ser aprovechada en su totalidad debido a que, si fuera así, el viento al atravesar las palas del aerogenerador tendría una velocidad igual a cero, lo cual no sucede en la realidad.

En cierta forma el hecho de que no se pueda aprovechar toda la energía del viento hace que sea posible que gire la turbina eólica. Este límite de aprovechamiento está explicado por la ley de Betz. A lo largo de este capítulo se expondrá esta teoría, vital a la hora de comprender dicho límite.

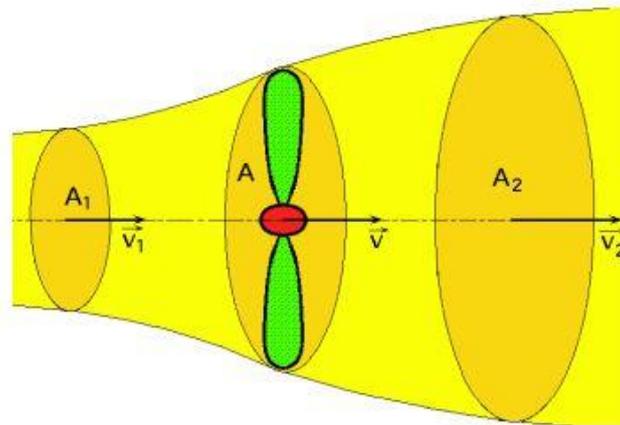


Figura 7. Flujo del aire a través del aerogenerador ideal. Fuente: EADIC, Universidad de Alcalá. [29]

Como se puede ver en la Figura 7, el viento posee una velocidad v_1 con la que atraviesa el área 1 (A_1), una velocidad v con la que atraviesa el área cubierta por las palas (A) y finalmente al atravesar las palas el viento cuenta con una velocidad v_2 . Donde $v_2 < v < v_1$.

5.1 Potencia debida a la energía cinética del viento. [30]

La potencia total disponible en una masa de aire que atraviesa una cierta área A , se mueve a una velocidad v , con densidad ρ , está dada por la siguiente ecuación [29]:

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

En el desarrollo de su teoría, Betz, asumió varias condiciones ideales de trabajo, bajo las cuales son totalmente válidos sus resultados. Estas condiciones son [30]:

- No existen pérdidas de carácter mecánico ni aerodinámico en el rotor y el diseño de las palas es el óptimo.
- El aire es considerado como un fluido incompresible y carente de fricción.
- Que el generador al extraer energía del aire no perturba el flujo del mismo, es decir que las líneas de flujo del viento son laminares, paralelas entre si y perpendiculares a el plano del rotor.

Teniendo en cuenta estas condiciones se puede asumir que:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (2)$$

Como se ha mencionado, corriente abajo (flujo después del rotor) la velocidad del viento es menor que corriente arriba (antes de pasar por el rotor). Betz entonces, define el factor de ralentización como:

$$a = \frac{v}{v_1} \quad (3)$$

Finalmente utilizando las Ecuaciones (1), (2), (3) se puede llegar a expresar la potencia útil que el generador puede extraer como:

$$P_{\text{Útil}} = \frac{1}{2} * \left[1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] * \left[1 + \frac{v_2}{v_1} \right] * P_w \quad (4)$$

$$P_{\text{Útil}} = 4 * (a^2 - a^3)P_w \quad (5)$$

La Ecuación (5) muestra que la velocidad aprovechable del viento por el aerogenerador depende del factor de ralentización y de la potencia total disponible en el viento. Lo anterior muestra como con una determinada potencia del viento, es posible extraer diferentes potencias según el factor de ralentización.

El factor de ralentización que produce la máxima potencia puede ser hallado de manera analítica despejando a de $\frac{dP_{\text{Útil}}}{da} = 0$. Este valor es conocido también como el factor de ralentización óptimo.

$$a_{\text{opt}} = \frac{2}{3} = 0.67 \quad (6)$$

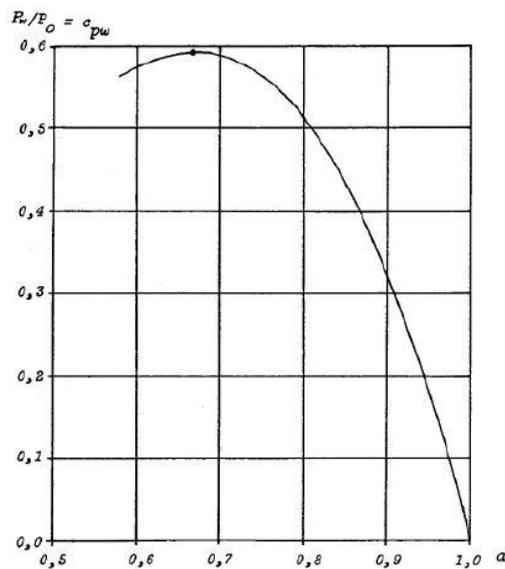


Figura 8. Máximo valor del coeficiente de potencia vs el factor de ralentización “a”.
Fuente: Manuel Franquesa Voneschen. [30]

Reemplazando este valor en la Ecuación (5) finalmente se llega al límite de Betz, el cual indica que la potencia máxima extraída por un aerogenerador ideal será:

$$P_{\text{Útil}} = \frac{16}{27} P_w = 0.5926 * P_w \quad (7)$$

Donde la relación entre $P_{\text{Útil}}$ y P_w es el factor de potencia del aerogenerador:

$$C_p = \frac{P_{\text{Útil}}}{P_w} \quad (8)$$

El factor de potencia máximo será $C_{pmax} = 0.5926$.

Una expresión conveniente que involucra el área efectiva, parámetro de construcción del aerogenerador, es:

$$P_{\text{Útil}} = C_p * \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} v^3 \quad (9)$$

5.2 Rendimiento de generadores eólicos.

Además de la limitación para la explotación de la potencia del viento introducida con límite de Betz, este límite simboliza un valor máximo teórico bajo condiciones ideales. En la práctica una turbina eólica consta de más elementos que a su vez también tienen respectivas eficiencias las cuales afectan la producción de potencia al final de la cadena.

En el proceso se tienen pérdidas mecánicas en los ejes de transmisión, engranajes correas de transmisión, fricción pérdidas eléctricas en el generador eléctrico, el alternador, elementos de potencia, sistemas de almacenamiento, líneas de transmisión. Y pérdidas aerodinámicas correspondientes a la acción del viento sobre las palas tales como la resistencia al movimiento por parte de las palas, ralentización no ideal, turbulencias en el extremo de las palas debido al giro de las mismas, la compresibilidad del viento, etc.

A pesar de que dentro del campo de la energía eólica se utilice más el concepto de coeficiente de potencia para denominar el rendimiento de una turbina, también puede definirse la eficiencia de la turbina de la siguiente manera:

$$\eta_w = \frac{P_{\text{Útil}}}{P_{\text{ÚtilMax}}} \quad (10)$$

$$C_p = 0.5926 * \eta_w \quad (11)$$

Debido a las pérdidas mencionadas el rendimiento de la instalación eólica completa se ve disminuido. Cada uno de los elementos que conforman un aerogenerador introduce una eficiencia la cual contribuye a la eficiencia total. Si cada elemento tiene una eficiencia $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$, la eficiencia total será $\eta_T = \eta_w * \eta_1 * \eta_2 * \dots * \eta_n$.

<i>Denominación</i>	<i>Rendimiento (η)</i>
<i>Rotor eólico</i>	<i>30 – 80</i>
<i>Engranaje</i>	<i>50 – 80</i>
<i>Generador eléctrico (alternador)</i>	<i>50 – 98</i>
<i>Bomba a pistón</i>	<i>60 – 80</i>
<i><u>Sistema acumulador:</u></i>	
<i><u>Eléctrico</u></i>	
<i>Condensador</i>	<i>hasta 50</i>
<i>Electroquímico</i>	
<i>Batería</i>	<i>60 – 80</i>
<i><u>Químico</u></i>	
<i>Hidrógeno H₂ (gas)</i>	<i>20 – 50</i>
<i>Hidrógeno H₂ (líquido)</i>	<i>20 – 40</i>
<i><u>Mecánico</u></i>	
<i>Volante de inercia</i>	<i>85 – 95</i>
<i>Aire comprimido</i>	<i>hasta 65</i>

Figura 9. Eficiencias de componentes de una instalación eólica. Fuente: Manuel Franquesa Voneschen. [30]

En la Figura 9 se observa una tabla con valores comunes para la eficiencia que se tiene por cada elemento que intervienen en la instalación eólica. Las eficiencias totales en las que rondan las instalaciones eólicas modernas (2010-2013) corresponden a valores alrededor del 46% [29].

A pesar de no parecer un porcentaje tan alto, se encuentra por encima de las eficiencias obtenidas en otras populares formas de generación eléctrica como los motores de combustión interna a gasolina (Ciclo Otto) que máximo pueden alcanzar un 30% según las leyes de la termodinámica. Adicionalmente, la energía eólica proporciona la enorme ventaja de que no genera residuos contra el medio ambiente y el “combustible” (viento) es totalmente gratuito, lo que pone a la energía eólica muy por delante de la producción de energía por quema de hidrocarburos.

Igualmente, otras fuentes de energías renovables también se quedan por debajo en cuanto a eficiencias, como es el caso en paneles fotovoltaicos cuya eficiencia a pesar de que en configuraciones especiales han alcanzado más del 44% (unión cuádruple) en laboratorios especializados, comercialmente sus eficiencias son menores al 20% [31].

5.3 Velocidad Óptima de Giro.

Las palas de un aerogenerador trabajan óptimamente, esto es producen la potencia máxima, cuando giran a una velocidad determinada. Esta velocidad se conoce como velocidad específica, aunque realmente es un coeficiente a dimensional, relaciona la velocidad de las palas con la velocidad del viento y depende de parámetros de construcción del aerogenerador como el número de palas, las inclinaciones o ángulos de paso, curvaturas, entre otros factores.

$$\lambda_0 = \frac{u_0}{v} \quad (12)$$

u_0 : velocidad en punta de pala

v : velocidad del viento

Dicho lo anterior la eficiencia del aerogenerador y a su vez la potencia producida depende de esta velocidad específica.

$$P_{\text{útil}}(\lambda_0) = 0.37 * \eta(\lambda_0) * Av^3 \quad (13)$$

La velocidad específica puede ser expresada en términos de la velocidad de giro del aerogenerador (n en [r.p.m]) de la siguiente manera:

$$u_0 = \frac{2\pi R}{60} n \quad (14)$$

$$\lambda_0 = \frac{\pi D}{60v} n \quad (15)$$

La Ecuación (15) muestra como dependiendo de la variación de la velocidad de rotación del rotor se pueden obtener diferentes valores de velocidad específica lo que presume la

posibilidad de obtener la velocidad específica óptima a partir del control de la velocidad de rotación n .

Es posible conocer qué velocidad de giro hace que la velocidad específica sea la óptima despejando n de la Ecuación (15) y utilizando para el cálculo la velocidad específica dada por el fabricante del aerogenerador.

$$n_{opt} = \frac{60 \lambda_{opt} v}{\pi D} \quad (16)$$

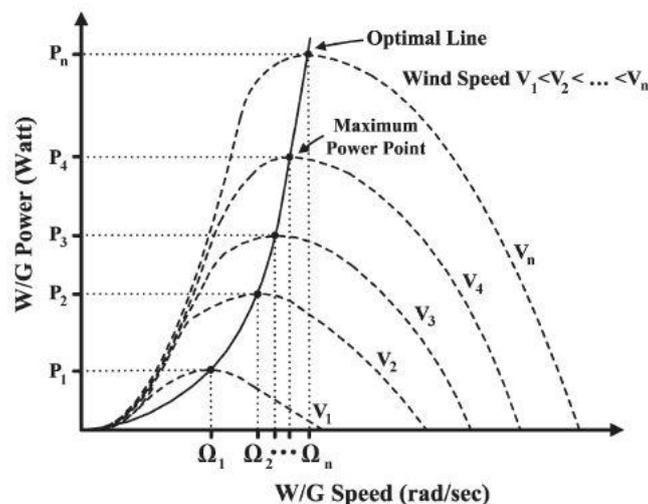


Figura 10. Potencia generada vs giro del rotor (considerar $\Omega=n$). Fuente: Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis. [32]

Esto demuestra que, con una determinada turbina eólica, para cada velocidad del viento existe una velocidad de giro a la cual debe funcionar el generador eólico para que la potencia sea maximizada. Ver Figura 10.

6 GENERADORES ELÉCTRICOS

Al implementar turbinas eléctricas estas pueden tener diferentes configuraciones en sus componentes, en cuanto al generador eléctrico se refiere este puede ser síncrono o asíncrono. Generalmente la decisión de implementar uno u otro depende de aspectos como las características del viento, la potencia que se desea generar, el terreno en donde se encuentra la turbina, entre otros; por lo que no se puede determinar de manera absoluta cual es la

mejor configuración sin hacer un estudio respectivo en el lugar específico donde estas turbinas van a operar [33].

6.1 Generadores síncronos.

Son conocidos con el nombre de generadores síncronos debido a que la velocidad de rotación del campo magnético es igual a la velocidad a la que gira el rotor, lo que a su vez hace que la frecuencia de salida del generador dependa de la velocidad de rotación del rotor.

Es un tipo de máquina eléctrica que, mediante un campo magnético giratorio en el rotor, induce en el estator voltajes los cuales son aprovechados para la generación de electricidad. Este campo magnético es producido mediante imanes permanentes en el rotor o mediante la aplicación de corrientes en el rotor para crear un electroimán.

Debido a que es necesario suministrar esta corriente DC en los devanados del rotor, los cuales en funcionamiento del generador estarán girando, se utilizan escobillas y anillos rozantes que permiten suministrar esta corriente con una fuente externa de forma continua mientras el generador está en movimiento. Adicionalmente, otra estrategia utilizada para suministrar esta corriente es acoplar directamente la fuente en el eje del rotor, también conocidos como excitadores.

Sin embargo, los excitadores por su complejidad y tamaño suelen ser montados en generadores de gran tamaño mientras las escobillas son utilizadas en generadores pequeños por su bajo costo, a pesar de que necesitan más mantenimiento y en generadores de gran potencia generarían grandes caídas de voltaje [34].

Los generadores síncronos se dividen en: generadores de rotor bobinado (wind rotor synchronous generator o WRSG) y generadores de imán permanente (permanent magnet synchronous generator o PMSG).

6.1.1 Generador de rotor bobinado. [35]

En este generador el campo eléctrico es producido por el flujo de corriente a través del bobinado del rotor esto causa que el generador gire a una velocidad sincrónica. Esta velocidad depende de la frecuencia con la cual rota el campo eléctrico y del número de polos en el rotor.

Ventajas:

No necesitan sistemas para la compensación de la potencia reactiva.

No necesita implementarse con caja de engranajes.

Desventajas:

Por no utilizar caja de cambios deben ser utilizados generadores grandes y pesados con convertidores de escala completa.

6.1.2 Generador de imán permanente. [35]

Estos generadores utilizan un estator bobinado y un imán permanente en el rotor para generar el campo magnético por lo que su producción de energía es más eficiente que otros generadores ya que no requiere una fuente de energía para producir dicho campo. Sus aplicaciones van desde turbinas eólicas en zonas rurales hasta parques eólicos offshore, en el mar.

Ventajas:

Mayor eficiencia al no necesitar una fuente para generación del campo magnético.

No utiliza cajas de engranajes.

Generación de potencia a cualquier velocidad del viento.

Desventajas:

Alto costo de los materiales que son necesarios para la construcción de los imanes permanentes.

Requiere convertidores de escala completa.

Puede causar problemas de inicio en la sincronización y regulación de voltaje

Requiere sistemas de refrigeración debido a que los materiales magnéticos son sensibles a la temperatura.

6.2 Generadores asíncronos o de inducción. [34]

A este tipo de generadores se les conoce como de inducción debido a que el voltaje necesario en el rotor para producir el campo magnético es inducido al devanado del rotor, análogamente a como sucede en un transformador, siendo el primario el devanado del estator y el secundario el devanado del rotor.

En este tipo de generadores la velocidad del rotor y la de los campos magnéticos no puede ser la misma a menos que el rotor se encuentre detenido. La velocidad del campo magnético depende de la frecuencia del voltaje conectado al estator.

El voltaje generado en el rotor es producido mediante el movimiento mecánico del rotor (conectado a una fuente mecánica de energía) en relación con el campo magnético en el

estator. Por tanto, si la velocidad del rotor es la misma que la velocidad del campo no habrá voltaje inducido sobre el rotor y la frecuencia será igual a 0.

Lo anterior establece un límite en donde el generador de inducción solo puede acelerar hasta una velocidad cercana a la velocidad de sincronismo, pero no llegar a ser igual, ya que al acercarse a la velocidad de sincronismo el rotor desacelera por acción de la fricción, pero una vez disminuido su velocidad vuelve a girar a una velocidad específica, que es menor a la del campo magnético del estator.

En cuanto a la construcción física de estos generadores, son similares a los generadores síncronos, la diferencia se encuentra principalmente en el rotor.

Los generadores de inducción se dividen según el tipo de rotor con el cual se construyan en:

6.2.1 Generador de inducción con rotor de jaula de ardilla. [36]

Este generador está construido con un rotor compuesto por barras metálicas las cuales ayudan a mejorar vibraciones. Opera en rangos muy pequeños de velocidades del viento debido a esto es considerado como un generador de velocidad fija. En ocasiones puede ser empleado para generación a velocidad variables del viento usando convertidores de escala completa.

Ventajas:

No requieren cepillos o escobillas lo que mejora su mantenimiento.

Tiene construcción robusta debido a su simplicidad mecánica.

Desventajas:

Se requieren convertidores de escala completa para su uso a velocidades variables.

6.2.2 Generador de inducción con rotor bobinado.

Los generadores de inducción con rotor bobinado se dividen en, generadores de deslizamiento variable o Optislip induction generators (OSIG) y en generadores doblemente alimentados Doubly-fed induction generator (DFIG).

6.2.3 Generadores de deslizamiento variable. [35]

Estos generadores tienen la característica de tener un deslizamiento variable con lo que es posible configurarlos a un deslizamiento óptimo que causa disminución en fluctuaciones de

torque y potencia de salida. Este control del deslizamiento se realiza a través de una resistencia externa conectada al rotor. En estos generadores los convertidores se controlan de manera óptica con lo que no se requiere anillos de deslizamiento.

Ventaja:

Topología circuital simple en su implementación.

Reduce el estrés, cargas mecánicas y fluctuaciones de potencia producidas por ráfagas de vientos.

Desventajas:

Requiere sistemas para la compensación de potencia reactiva.

Típicamente el control alcanzado sobre la potencia reactiva y activa es deficiente.

Menor eficiencia debido pérdidas de energía por disipación de potencia en la resistencia de deslizamiento.

6.2.4 Generadores doblemente alimentados. [37]

Este generador de inducción se encuentra alimentado tanto en el devanado de rotor como en el estator, el rotor se encuentra conectado a el voltaje del convertidor de potencia conectado a la red y el estator se encuentra conectado directamente a la red. Entre otras cosas esta configuración presenta mayores ventajas que los demás generadores debido a que puede operar en grandes rangos de velocidades, es uno de los más usados en la industria de turbinas eólicas de gran potencia [36].

Ventajas:

La capacidad de controlar la potencia reactiva y activa de forma independiente.

Puede magnetizarse no solo a través del estator conectado a la red sino también a través del rotor.

El convertidor de lado de la red permite entrega adicionalmente potencia reactiva al estator.

Adecuado para redes débiles donde el voltaje fluctúa debido a que se puede configurar para que absorba o entregue potencia reactiva de la red para estabilizar el voltaje.

Desventaja:

Requiere caja de engranes ya que este generador no es viable a baja velocidad.

Mayor complejidad en el diseño de los sistemas de control.

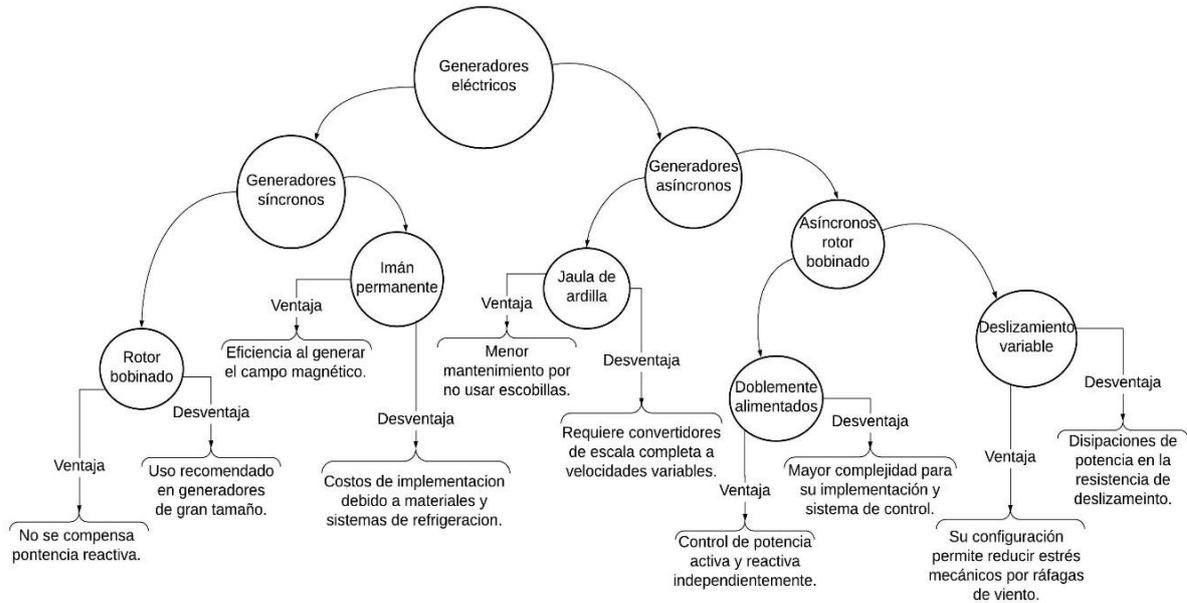


Figura 11. Mapa conceptual Generadores Eléctricos. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración Propia]

La Figura 11 muestra un resumen de los tipos de generadores vistos, así como las ventajas y desventajas que se han presentado para cada uno de ellos.

7 CONVERTIDORES DE POTENCIA

Los convertidores de potencia son topologías circuitales a partir de elementos semiconductores e inductivos y capacitivos los cuales se encargan de convertir o transformar un tipo de energía eléctrica a otro tipo.

Las aplicaciones de este tipo de convertidores van desde el control de la velocidad de motores, fuentes ininterrumpidas hasta compensadores de energía reactiva, sin embargo, últimamente han adquirido gran relevancia en el campo de las energías renovables debido a las mejoras en la eficiencia que proveen en estos sistemas [38].

En los convertidores de potencia los elementos semiconductores operan bajo el modo de funcionamiento conmutado mientras que los elementos lineales como capacitores e inductancias son usados para almacenamiento intermedio de energía además de servir como filtros. Estos últimos representan principalmente el tamaño y peso del convertidor.

Ya que un convertidor puede ser analizado como una fuente, un aspecto importante que lo caracteriza es el tipo de fuente, estas fuentes pueden ser de corriente o voltaje. Para los convertidores como fuentes de voltaje estos deben ser capaces mantener un voltaje para

cualquier demanda de corriente por lo que su impedancia en serie debe ser cero y las fuentes de corriente son aquellas que pueden mantener una corriente independientemente del voltaje y su impedancia en serie es infinita [39].

7.1.1 Convertidor con diodos. [40]

Este convertidor transforma el voltaje de frecuencia y magnitud variable proveniente del generador a un voltaje DC. Este funcionamiento se refiere a un dispositivo rectificador, en este caso implementado a partir de diodos. La señal con voltaje DC luego es elevado para que sea convertido a un voltaje con frecuencia igual a la de la red. Generalmente implementado en WRSG y PMSG.

Ventajas:

Sencillez para implementar y construir además de que los componentes requeridos son de bajo costo.

Desventajas:

El rectificador a partir de diodos produce gran cantidad de armónicos que afectan el rendimiento y eficiencia del sistema. Además, solo permite el control de potencia en una sola dirección, del generador hacia la red.

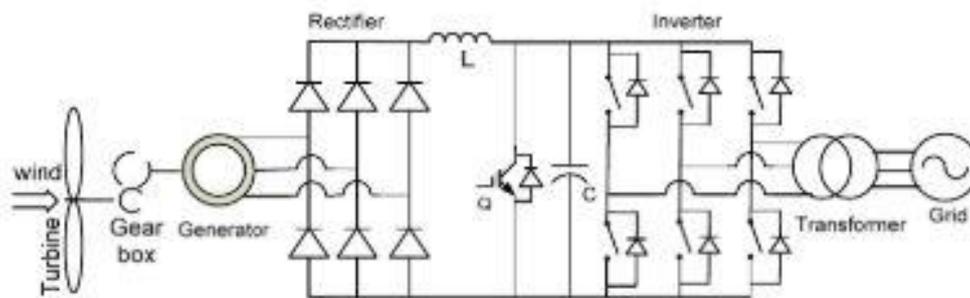


Figura 12. Topología convertidor de diodos. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40]

7.1.2 Convertidor Back to Back. [40]

Este convertidor conocido como back to back consta de un rectificador e inversor, pero a partir de dispositivos controlables. Este control en la etapa de rectificación proporciona un control bidireccional de potencia, además de reducir la introducción de armónicos.

El inversor permite controlar la potencia entregada a la red tanto reactiva como activa, también ayuda a reducir la distorsión armónica total mediante la regulación del voltaje en el capacitor de enlace. El rectificador por su parte, lado del generador, permite a través de él proveer la magnetización requerida y controlar la velocidad deseada en el rotor. Es aplicable para generadores PMSG, SCIG y DFIG.

Ventajas:

Control bidireccional de potencia.

Control independiente entre el convertidor del lado del generador y el convertidor del lado de la red.

El enlace DC permite elevar el voltaje para que sea mayor al de la red y controlar completamente las corrientes de la red.

Bajo costo de los dispositivos.

Desventajas:

La necesidad de un gran y pesado capacitor en el enlace DC hace que el sistema tenga menos vida útil del sistema.

Introducción de pérdidas debido a más componentes de conmutación.

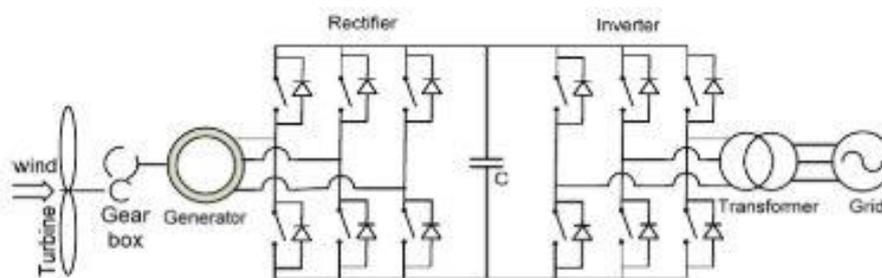


Figura 13. Topología convertidor back to back. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40]

7.1.3 Convertidores matriciales. [40]

Este tipo de convertidores han ganado gran interés porque proporcionan ventajas importantes en comparación a los convertidores antes mencionados. Esto se debe a que convierte de AC a AC de manera directa sin pasar por DC, lo que elimina la necesidad de bancos de condensadores y enlaces DC que introducen tamaño y pesos en las turbinas. Los convertidores matriciales utilizan interruptores bidireccionales en las fases de entrada y salida, del lado de la red es necesario un filtro que evita que los armónicos generados en la

conmutación se propaguen a la entrada. Es implementado en configuraciones con generadores de velocidad variable, SCIG y DFIG.

Ventajas:

Reducción significativa en el tamaño y pesos del sistema de convertidores.

Las pérdidas por conmutación pueden llegar a ser menores que en los back to back, dependiendo del desempeño de los switches bidireccionales.

El estrés térmico de los componentes es menor en este tipo de convertidores.

Desventajas:

El voltaje de entrada no puede ser elevado significativamente como en el convertidor back to back.

Con la ausencia del enlace DC la entrada y la salida no están desacopladas por lo que voltajes distorsionados y no balanceado en la entrada, así como cargas no balanceadas se verán como voltajes y corrientes distorsionadas reflejados en la salida.

Las técnicas y sistemas de control son más complejos que en inversores con control por PWM convencionales.

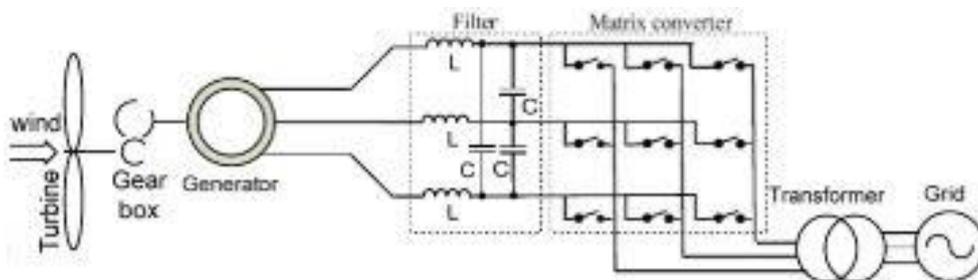


Figura 14. Topología convertidor matricial. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40]

7.1.4 Convertidores con fuente Z. [40]

Los convertidores de fuente Z o también llamados convertidores con fuente de impedancia, utiliza una red de dos puertos compuesta de dos inductores y dos capacitores dispuestos en forma de "x" con el fin de acoplar la fuente de voltaje DC proporcionada por el rectificador con el convertidor del lado de la red. Esta configuración proporciona reducción de costos en la implementación y una alta eficiencia en el sistema de conversión.

Generalmente es usado unidireccionalmente, sin embargo, es posible adaptarlo para que sea bidireccional y pueda funcionar con generadores DFIG y puede ser implementado en convertidores de CC a CC, AC a CC, CC a AC y de AC a AC.

Ventajas:

El voltaje en la salida puede estar entre cero e infinito independientemente del valor de voltaje de la entrada.

Debido a que no solo utiliza componentes capacitivos, los inductores y capacitores en la fuente de impedancia pueden ser diseñados óptimamente para que tengan menor peso y su costo sea menor.

Alta eficiencia.

Desventajas:

Mayor riesgo de averías y daños en el sistema debido a que este convertidor no es capaz de suprimir los picos de corriente y las resonancias en los componente inductivos y capacitivos durante el periodo de arranque.

Es un convertidor que solo funciona de manera unidireccional.

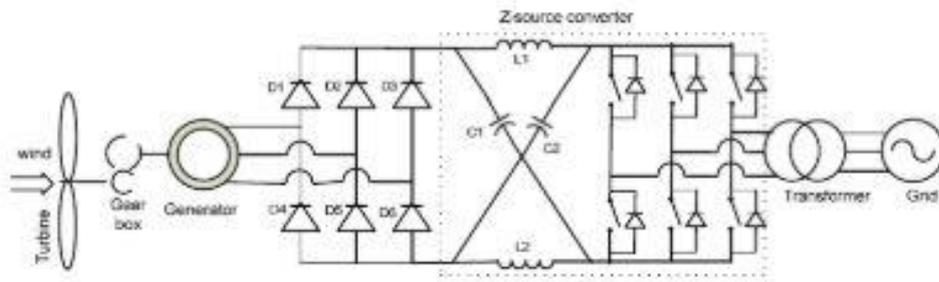


Figura 15. Topología convertidor fuente Z. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40]

7.1.5 Convertidores multinivel. [40]

Con el aumento de la capacidad de conversión de potencia que han alcanzado las fuentes renovables como las turbinas eólicas y los arreglos de celdas fotovoltaicas, los semiconductores se han visto desafiados para soportar estas altas potencias, un convertidor multinivel utiliza dispositivos semiconductores de media y baja potencia para hacer arreglos que permitan funcionar a grandes niveles de voltajes. Además, los convertidores multinivel pueden funcionar como rectificadores o inversores. Principalmente son utilizados en sistemas de generación de media y alta potencia.

Los altos niveles de voltaje que pueden ser logrados en la salida del convertidor multinivel eliminan la necesidad de utilizar transformadores especialmente en configuraciones de alto nivel a partir de convertidor de puente ha conectados en serie o SCHB.

Las principales topologías multinivel son los convertidores de punto neutro (NPC), condensador de vuelo (FC) y convertidores de puente H conectado en serie (SCHB).

Ventajas:

Manejar grandes niveles de voltaje con dispositivos de voltajes bajos.

Permite que los elementos usados en el filtrado sean de menor tamaño.

Es posible eliminar el transformador de salida.

Desventajas:

La mayor cantidad de dispositivos controlados hace más complejo el control y la topología circuital.

Flujo de corrientes desiguales en los dispositivos semiconductores.

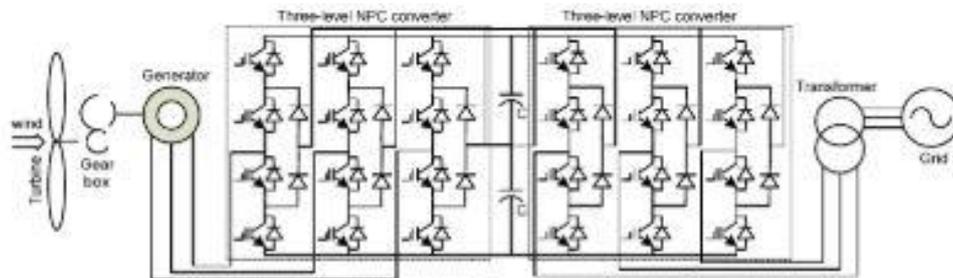


Figura 16. Topología convertidor multinivel. Fuente: Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu. [40]

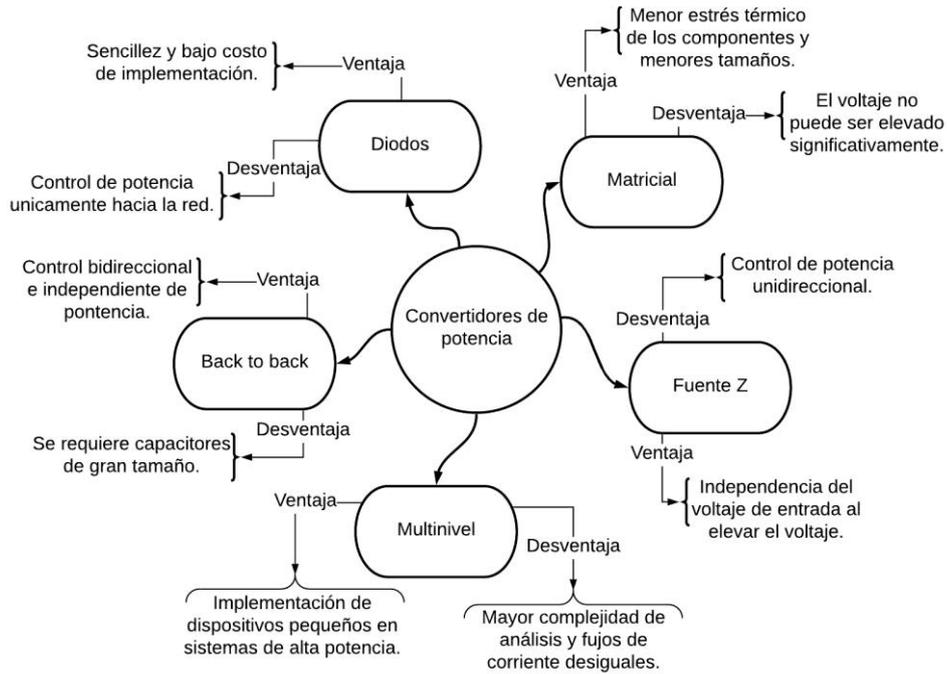


Figura 17. Mapa conceptual convertidores. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

La Figura 17 muestra un resumen de los tipos de convertidores vistos, así como las ventajas y desventajas que se han presentado para cada uno de ellos.

8 ALGORITMOS DE SEGUIMIENTO DE MÁXIMO PUNTO DE POTENCIA (MPPT)

Como ya se ha mencionado los algoritmos MPPT son técnicas que permiten ubicar el sistema en su punto de máxima generación de potencia y seguir este punto cuando cambien las condiciones de las cuales depende la generación como lo es la temperatura, la radiación en los paneles fotovoltaicos o el viento en el caso de la en turbinas eólicas y la carga de operación en ambos casos.

Existe un variado número de algoritmos los cuales pueden ser clasificados a partir de aspectos como su complejidad, números de sensores estrategias de seguimiento, entre otros. Por ejemplo, según su estrategia de seguimiento pueden ser indirectos y directos; los directos miden únicamente variables físicas de operación del sistema mientras los indirectos utilizan tablas o datos almacenados los cuales contiene información del comportamiento del sistema [41].

Estas tablas de información caracterizan el comportamiento del sistema, generalmente son proporcionadas por el fabricante. Estos métodos indirectos suelen ser menos eficientes y

más complejos que los métodos directos. También existen algoritmos híbridos que usan una combinación de ambos métodos directo e indirecto [42].

8.1 Tipos de algoritmos MPPT.

8.1.1 Hill Climb Search o perturbar y observar (P&O).

También es conocido como Perturb & Observe (P&O), este método busca generar cambios en las variables del sistema, ya sea de voltaje, corriente o en la velocidad del rotor, con el objetivo de producir una perturbación que dé cuenta del estado en el que se encuentra operando el sistema para así determinar la dirección de la siguiente perturbación y alcanzar el punto de máxima potencia.

Si al aumentar el voltaje del generador la potencia aumenta el algoritmo decide que la siguiente perturbación será igualmente un aumento en la potencia, en caso de que la potencia disminuya la decisión será de disminuir el voltaje. De esta manera el algoritmo va escalando en la curva de potencia de la turbina.

A pesar de que la lógica del algoritmo es bastante sencilla, cuando es integrado al sistema eólico, deben tenerse en cuenta varios aspectos importantes como la inercia del sistema, oscilaciones en las señales medidas, condiciones atmosféricas de variaciones rápidas y la selección de tamaño de paso adecuado, etc [43].

Este algoritmo es de los más populares y utilizados dentro de los algoritmos MPPT debido a que no requiere conocimiento previo del sistema como características de la turbina incluso de variables como el viento y velocidad del generador, mientras otros métodos deben reconfigurarse para algunos cambios en los parámetros del sistema [44].

8.1.2 Lookup table.

Este método se basa en la búsqueda de la salida del sistema (voltaje de referencia, ciclo de trabajo, velocidad del generador) a partir de valores de las entradas, estos valores de las salidas son precalculados y almacenados en tablas (bases de datos) las cuales relacionan que salida corresponde a ciertos valores de las entradas que deben ser medidas por el algoritmo. Estos datos pueden ser generados a partir de información brindada por el fabricante de la turbina o por simulaciones y mediciones prácticas [45].

Una de las ventajas de este método es el menor tiempo de cálculo frente a otros algoritmos, sin embargo, para que el sistema tenga una buena resolución y por ende sea preciso, la construcción de la base de datos es un factor que es más laborioso [46].

8.1.3 MPPT basado en lógica difusa o Fuzzy.

Un controlador Fuzzy, consta de principalmente 3 secciones como son la sección de fuzzyficación, en la cual las variables medidas de característica numérica son convertidas a variables lingüísticas a través de funciones de pertenencia que asignan estos valores dentro de subconjuntos con valores lingüísticos. La sección de la búsqueda de las reglas, en la cual se tienen predefinidas y almacenadas las salidas correspondientes según la variable lingüística a la que corresponde la entrada. La sección de defuzzyficación, en la cual se genera nuevamente a través de funciones de pertenencia, un valor numérico en la salida [47].

Este tipo de sistema ha ganado popularidad con la mejora de los microcontroladores y sobre todo por la ventaja que proveen de no requerir modelos matemáticos del sistema a controlar y su buen desempeño en condiciones de no linealidad [48].

8.1.4 Algoritmos basados en Redes neuronales.

Las redes neuronales han ganado conseguido gran auge por su capacidad de proporcionar modelos de solución alternativos a complejas ecuaciones y modelos matemáticos. Estas redes constan de 3 elementos principales, la capa de entrada, capa de salida y la capa oculta., las cuales pueden tener 1 o más nodos según el diseño. Adicionalmente cuentan con ventajas como que no necesitan conocimiento previo del sistema y presentan mejor tolerancia a fallos y cambios en parámetros del sistema [49].

Para el enfoque MPPT, la implementación de redes neuronales es muy similar a lo que se hace con la lógica fuzzy, a diferencia que en este caso las entradas del algoritmo pasan por un modelo de red neuronal previamente entrenada el cual genera un valor de salida según la referencia para la cual se esté diseñando (voltaje, ciclo de trabajo, velocidad de rotor, o torque). Por ejemplo, en este estudio [50] se desarrolla un modelo de red neuronal que según la velocidad el viento genera un valor de torque electromagnético en el que debe estar el generador eléctrico para maximizar la potencia.

8.1.5 Métodos teóricos.

Este método consiste en el conceto de establecer relaciones meramente teóricas y matemáticas entre las distintas variables, sin necesidad de hacer uso de modelos que cambien la naturaleza de las variables como lo hace fuzzy y las redes neuronales. Evidentemente la desventaja de estos métodos está en la dificultad de hallar dichas relaciones teóricas entre las variables, lo cual generalmente suele resultar en complejos modelos matemáticos. En [51] por ejemplo, se desarrolló un sistema de maximización en el

que se describen en profundidad el modelamiento teórico matemático del funcionamiento de la turbina y sistema de control.

8.1.6 Métodos alternativos.

Con la finalidad de mejorar el desempeño de los sistemas de control MPPT, se han desarrollado sistemas híbridos que hacen uso de varios métodos para aprovecharse de las ventajas de cada uno y mejorar subsanar las desventajas que ellos conllevan. En [52] se desarrolla un método Hill Climb modificado y que cuenta con características adaptativas a través de tablas de consulta programables. En [53] se propone un algoritmo de paso adaptativo que mejora la carga mecánica sobre la turbina que además cuenta con un controlador fuzzy para mejorar las características de amortiguación de la turbina eólica.

8.1.7 Otros enfoques.

De los métodos anteriormente presentados se puede evidenciar que los distintos tipos de algoritmos MPPT comparten sustancialmente la misma metodología general. Es decir, todos al final de cuentas buscan a través de un convertidor cambiar el voltaje del generador, lo cual causa que la velocidad del generador se modifique y así encontrar el punto en donde genera la máxima potencia.

Los métodos que tienen como variable de ajuste o referencia directamente la relación velocidad de punto son conocidos como “Tip speed ratio control”, estos requieren conocimiento de esta variable con la potencia [54]. Los que utilizan directamente la medición de la señal de potencia generada para realizar las acciones de control son conocidos como “Power signal feedback” [55]. Otros como el “Optimal torque control” se enfocan en medir y mantener un control óptimo del torque [56].

Los distintos tipos de algoritmos difieren en las variables que se miden, en la forma de cálculo y partes del sistema en las cuales se enfocan para generar estos cambios; aunque también es preciso decir que estos distintos enfoques hacen que tengan entre sí cualidades y desempeños diferentes. En [57] se compara el rendimiento entre un algoritmo basado en lógica fuzzy, Tip Speed ratio y Hill Climb. En [58] se prueban en generadores de imanes permanentes enfoques MPPT que necesitan sensores contra otros que no los requieren. En [59] se hace una comparación exhaustiva de varios algoritmos comunes utilizados en sistemas de turbinas eólicas.

9 COVERTIDOR DC-DC

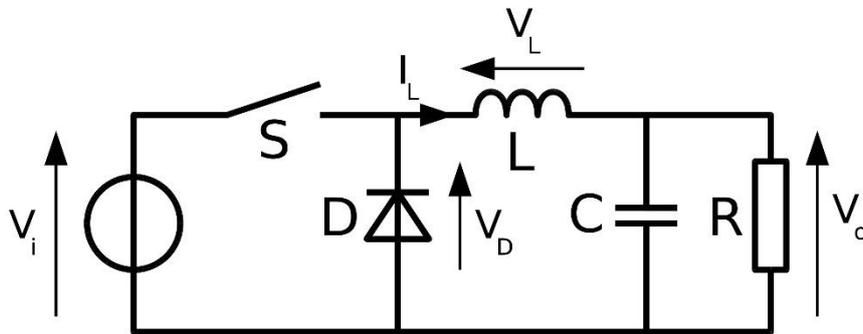


Figura 18. Topología de un convertidor Buck. Fuente: Wikipedia. [60]

El convertidor tipo buck es un dispositivo que convierte una señal de voltaje DC a otra DC de menor valor. De manera más detallada, el funcionamiento del convertidor DC puede ser analizado a través de las leyes de Kirchoff aplicadas en ambos estados del circuito, cuando el dispositivo de conmutación está “on” (corto circuito) y cuando está “off” (circuito abierto). En la Figura 18 se presenta la topología circuital para un convertidor DC-DC tipo Buck. Para el estado o tiempo de computación “on” la potencia entregada a la carga es suministrada por la fuente, los componentes reactivos como la inductancia y el capacitor almacena energía durante este periodo. Para el estado donde “off” la fuente se desconecta del circuito restante con lo que la carga es alimentada con la energía almacenada en la inductancia y el capacitor [61].

El comportamiento de las variables de importancia en el convertidor como la energía que es transferida al capacitor e inductancia, relaciones de corrientes, voltajes y cómo estas interaccionan en el emparejamiento de impedancia entre la fuente y la carga, están descritas a través del siguiente análisis matemático [62] [63]:

D: Ciclo de trabajo.

t_{off} : tiempo de comunation "off".

t_{on} : tiempo de comunation "on".

V_{dc_s} : Voltaje de la fuente o del generador (rectificado).

V_{dc_c} : Voltaje DC en el capacitor.

$$V_{dc_s}t_{on} = V_{dc_c}t_{off} \quad (17)$$

El voltaje del capacitor esta dado por:

$$V_{dc_c} = DV_{dc_s} \quad (18)$$

Con:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} - t_{off}} \quad (19)$$

Tal como ya se mencionó el convertidor conectado a una carga puede ser analizado como una impedancia variable vista desde el lado del generador (R_{dc_s}). Su relación con el voltaje y la corriente obedecen a la ley de Ohm, esta relación se muestra en la Ecuación (20).

$$I_{dc_s} = \frac{V_{dc_s}}{R_{dc_s}} \quad (20)$$

La potencia es la misma a la entrada y a la salida del convertidor (Ecuación (21)), lo que permite que este mismo análisis puede ser realizado del lado de la carga, a la salida del convertidor, con lo que obtendremos una relación idéntica para la impedancia de la carga. Se muestra en la Ecuación (22).

$$V_{dc_s}I_{dc_s} = V_{dc_{RL}}I_{dc_{RL}} \quad (21)$$

$$I_{dc_{RL}} = \frac{V_{dc_{RL}}}{R_L} \quad (22)$$

Sustituyendo la Ecuación (18) en la Ecuación (21) se obtiene:

$$V_{dc_s}I_{dc_s} = DV_{dc_s} I_{dc_{RL}} \quad \rightarrow$$

$$I_{dc_s} = D I_{dc_{RL}} \quad (23)$$

Retomando la Ecuación (18) si se divide ambos lados entre I_{dc_RL} se obtiene:

$$\frac{V_{dc_C}}{I_{dc_RL}} = D \frac{V_{dc_S}}{I_{dc_RL}} \rightarrow$$

$$R_L = D \frac{V_{dc_S}}{I_{dc_RL}} \quad (24)$$

Si en la Ecuación (24) se reemplaza la equivalencia para I_{dc_RL} de la Ecuación (23) se obtiene:

$$R_L = D \frac{DV_{dc_S}}{I_{dc_S}} \rightarrow$$

$$R_L = D^2 \frac{V_{dc_S}}{I_{dc_S}} \quad (25)$$

Introduciendo R_{dc_S} en la Ecuación (25) se obtiene:

$$R_L = D^2 R_{dc_S} \rightarrow$$

$$R_{dc_S} = \frac{R_L}{D^2} \quad (26)$$

Finalmente, la Ecuación (26) evidencia la relación que existe entre las impedancias en el sistema y como puede ser modificada mediante la variación del ciclo de trabajo del convertidor.

El convertidor en esta aplicación puede entenderse como el actuador por medio del cual los algoritmos MPPT pueden perturbar y generar cambios en la extracción de potencia tanto en turbinas como paneles fotovoltaicos. Este efecto es posible gracias a que los convertidores al variar su ciclo de trabajo cambian el voltaje y corriente de salida de la fuente permitiendo así modificar la impedancia aparente que es vista por el generador (matching), lo a su vez permite emparejar las impedancias entre una fuente generadora y una carga [63].

10 RELACIÓN MPPT CON LA TEORÍA DE TURBINAS EÓLICAS

Debido a que los sistemas de energía renovable generalmente cuentan con eficiencias bajas y capacidades de generación baja, es crucial para estos sistemas, fotovoltaicos, eólicos, hidroeléctricos, etc; poder maximizar cuanto sea posible la extracción de potencia y la eficiencia. Por lo anterior los algoritmos de rastreo de punto de máxima potencia o MPPT son de gran interés en ámbito de las energías renovables.

En turbinas eólicas los algoritmos MPPT, a través de convertidores, permiten controlar la velocidad de giro del rotor por medio de la variación del voltaje del generador cuando la velocidad del viento cambia modificando el punto de operación del sistema. A su vez, modificar la velocidad de giro cambia la relación de la velocidad en punta de pala o TSR, tip speed ratio en inglés. El coeficiente de potencia de la turbina depende principalmente de la TSR y la potencia es proporcional al coeficiente de potencia, con lo que de esta manera el algoritmo MPPT proporciona una técnica para maximizar la extracción de potencia en la turbina [64].

Matemáticamente el mecanismo explicado está dado de la siguiente forma [65]:

$$P = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v^3 \quad (27)$$

La Ecuación (27) indica la potencia según un cierto coeficiente de potencia $C_p(\lambda, \beta)$, el cual si se toma en cuenta que las aspas no tiene pitch o inclinación, el valor de β es igual a 0 con lo que el coeficiente de potencia depende solo de λ o TSR. Lo anterior indica que existe un valor de λ o λ_{opt} que hace máximo el valor de C_p . El comportamiento de C_p vs λ se muestra en la siguiente Figura 19.

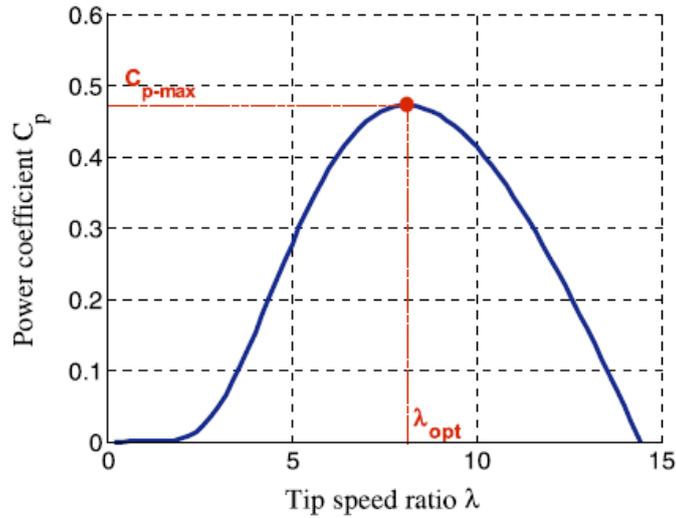


Figura 19. Curva coeficiente de potencia vs relación de velocidad en punta de pala.
Fuente: Mouna Ben Smida, Anis Sakly. [66]

Como se aprecia en la Figura 19 se obtiene un valor máximo de alrededor de 0.45 de coeficiente de potencia, este es el valor máximo logrado en la práctica, aunque la teoría indique que este tiene como máximo un valor de 0.59 [64].

$$C_p(\lambda) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 5e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \right) \quad (28)$$

Con:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda} - 0.035 \quad (29)$$

En las Ecuaciones (28) y (29) ya está presente la consideración de $\beta = 0$, las palas tienen una inclinación fija.

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (30)$$

En la Ecuación (30) se evidencia que es posible variar el valor de λ mediante el cambio en la velocidad de giro del generador eléctrico ω , ya que dada una turbina eólica determinada no es posible cambiar R radio de las aspas o v que es la velocidad del viento¹.

Al final la potencia generada depende del voltaje de salida y este a su vez depende de la velocidad del generador (Figura 20), la cual es posible controlar por medio de convertidores de potencia con algoritmos MPPT.

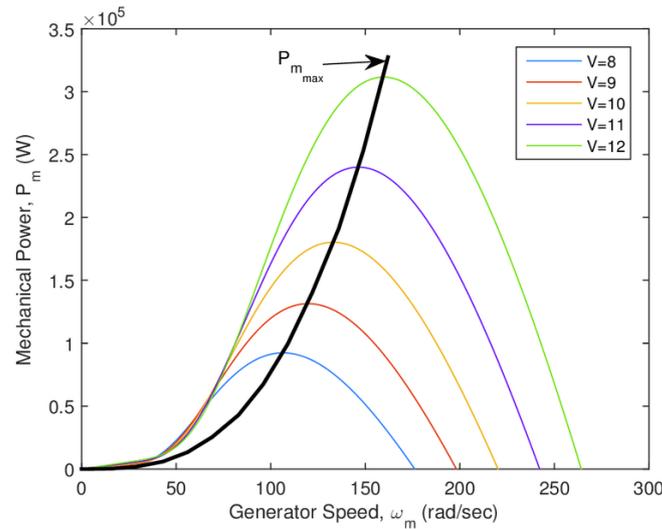


Figura 20. Curva potencia mecánica vs velocidad del generador(rotor). Fuente: Mohamed Zribi, Muthana Alrifai and Mohamed Rayan. [67]

11 SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICA

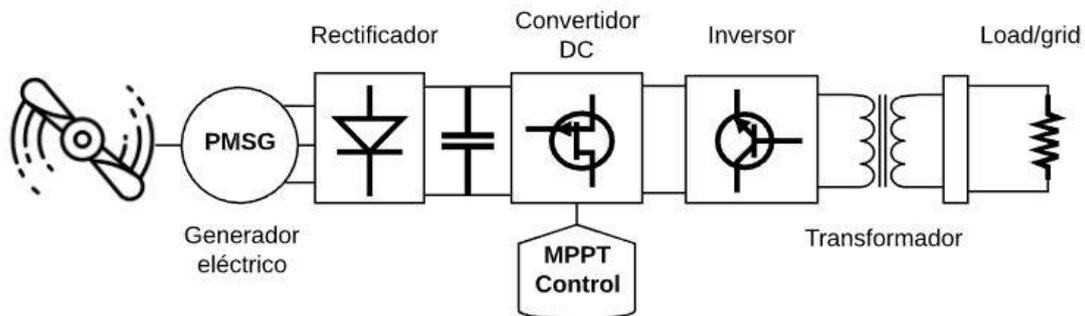


Figura 21. Esquema sistema eólico. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

¹ Nota: Para más detalles de la teoría matemática revisar el capítulo de Teoría de aerogeneradores.

En la *Figura 21* se presenta un diagrama completo de un sistema eólico, el generador eléctrico de imanes permanentes genera corriente trifásica que es convertida a DC a través de un rectificador de diodos no controlado a partir de diodos, este rectificador se conecta hacia el convertidor DC-DC por medio de un capacitor, también llamado DC link. El convertidor DC-DC permite controlar el flujo de potencia que proviene del generador con lo que a partir de este es posible implementar sistemas de control que permitan maximizar esta extracción de energía, en este caso se encuentra conectado un sistema con control MPPT.

A partir de este punto la señal de potencia en DC es convertida a AC por medio de un inversor que generalmente debe ser controlado debido a que es necesario poder establecer el voltaje y la frecuencia de salida, los cuales serán determinados por los de la red a la que se encuentre conectado el sistema eólico. Luego con un transformador los voltajes son elevados de manera que sea compatible con las líneas de alto voltaje de la red y además puedan recorrer distancias sin incurrir en grandes pérdidas por trayecto a través de las líneas de cableado eléctrico.

La configuración y elementos en un sistema eólico dependen en gran medida del tipo de generador eléctrico que se esté usando, el cual a su vez depende del nivel de potencia en el que funcionará la turbina. Con el fin de determinar el tipo de generador adecuado en el rango de baja potencia en el que se está trabajando, se hizo una revisión de modelos comerciales de marcas populares en el mercado de turbinas eólicas, se encontró que la mayoría de estas turbinas de baja potencia optan por implementar un generador de imanes permanentes (PMSG). En cuanto a la electrónica de potencia, en rangos bajos de potencia no suelen ser utilizadas complejas configuraciones de convertidores [68]

A continuación, se presentan los modelos de turbinas revisados (Información detallada de los modelos en los enlaces del Anexo 1):

Turbina eólica	Potencia	Generador eléctrico	Gearbox
XANT M-24	95 KW	Imán permanente	Direct drive
Aeolos-H	100 KW	Imán permanente	Direct drive
AVATAR-V	5 KW	Imán permanente	Direct drive
Hummer H13.2	30 KW	Imán permanente	Direct drive
Aeolos-H	50 KW	Imán permanente	Direct drive
Aeolos-V	1 KW	Imán permanente	Direct drive
Aeritalia AIT 03	17 KW	Imán permanente	Epicyclic
AIRCON 10 S	9.8 KW	Imán permanente	Direct drive
Anelion SW 3.5 GT	3.5 KW	Imán permanente	Direct drive
Hummer H6.4	5 KW	Imán permanente	Direct drive

11.1 Sistema eólico simplificado.

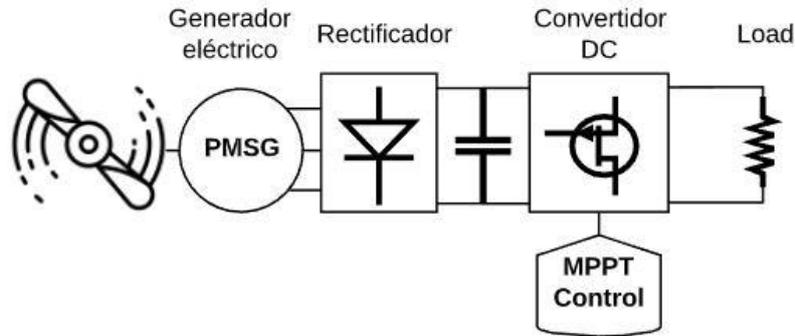


Figura 22. Diagrama sistema eólico simplificado. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

La maximización la extracción de potencia no es el único tema a mejorar en las turbinas eólicas, un sistema eólico completo conectado a la red añade más problemáticas como las inestabilidades de voltajes en la turbina debidos a variaciones en el nivel de voltaje de la red, reducción del factor de potencia por incidencia de potencia reactiva, control de calidad de la energía asociados a perturbaciones en la frecuencia cantidad de armónicos, inestabilidades en el comportamiento dinámico del sistema, las cuales requieren el desarrollo de sistemas de compensación de potencia reactiva, sistemas de control para el inversor, arrancadores suaves, controladores de la calidad de energía entre otros elementos [69] [70] [71].

El sistema de la *Figura 21* muestra un diagrama completo de un sistema eólico, sin embargo, para los propósitos del trabajo presente este sistema introduce varios elementos adicionales que no son necesarios en la consecución de los objetivos propuestos, los cuales buscan evidenciar la maximización en la extracción de potencia del generador a través de un sistema de control MPPT. Por esta razón, es posible simplificar el sistema de la forma que se muestra en la *Figura 22*.

12 MODELO COMPUTACIONAL IMPLEMENTADO DEL SISTEMA EÓLICO.

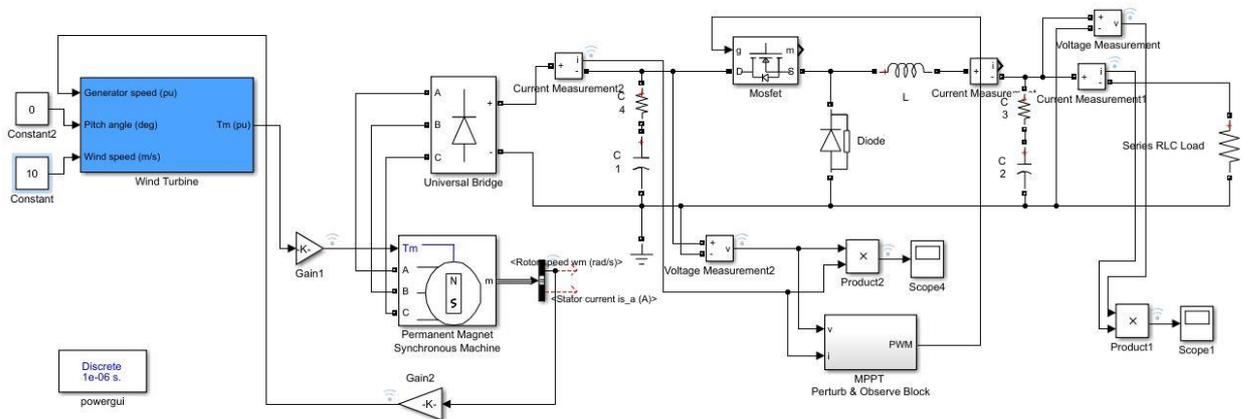


Figura 23. Sistema eólico implementado en Simulink. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

En la Figura 23 se muestra la implementación del sistema de generación eólica que fue indicado anteriormente en la Figura 22. El sistema ha sido implementado y simulado a través de la herramienta Simulink del software Matlab.

Simulink es la herramienta más popular y utilizada para el modelamiento prueba y simulación de estos sistemas de generación, debido a que cuenta con amplias librerías y sobre todo modelos predefinidos que agilizan y facilitan su estudio.

12.1 Descripción de los elementos del modelo.

Turbina

La turbina y su interacción con el viento es simulado a través del bloque predefinido “Wind Turbine” el cual modela una turbina que tiene como salida una cantidad de torque que será entregado al generador. El bloque recibe como entradas una referencia de la velocidad del generador que sirve para darle una ganancia a esta velocidad, en este caso se ha fijado en 1 por defecto. Adicionalmente es posible indicar el ángulo de pitch de las aspas de la turbina en caso de que esta cuenta con control de pitch, se ha fijado en 0 lo que indica que las palas no son rotatorias (sin control de pitch).

Generador.

En el sistema eólico presentado el generador trifásico de imanes permanentes se ha modelado con el bloque “Permanent Magnet Synchronous Machine” el cual recibe como

entrada una cantidad de torque y como salidas las tres respectivas fases. Ha sido configurado para modelar un generador con una potencia nominal de 10KW a una velocidad de viento nominal de 10m/s.

<i>Parámetros técnicos del generador eléctrico(PMSG)</i>	
Potencia nominal	10KW
Velocidad rotacional nominal	300rpm
Polos	20
Torque nominal	318Nm
Tipo de bobinado	Y (estrella)
Tipo de rotor	Saliente
Constante de torque	16,051
Inercia	0,2308Kgm ²
Resistencia por fase	0,926Ohm
Ld	11,55mH
Lq	21,7mH

Figura 24. Parámetros técnicos del generador eléctrico modelado. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

En la Figura 24 se muestran los parámetros necesarios para la modelación del generador eléctrico, mediante el bloque de Simulink. Estos datos fueron proporcionados por una empresa fabricante de generadores.

Revisar Anexo 2 para ver el datasheet completo.

Rectificador.

Como se menciona en la sección de convertidores, en los rangos de baja potencia los fabricantes generalmente implementan convertidores sencillos que no aumenten el costo y complejidad de la turbina [68]. El rectificador simulado a través del bloque “Universal Bridge”, corresponde a un puente rectificador trifásico de onda completa no controlado a partir de diodos.

Convertidor (Tipo Buck).

El convertidor como ya se puede intuir es la parte más importante del sistema y en este se concentra prácticamente todo el diseño del sistema de control. La metodología utilizada para este diseño es la propuesta en [72].

Para el siguiente diseño se asume que la turbina es requerida para cargar un banco de baterías DC que tiene un voltaje de carga de 300v y soporta una potencia de carga de 10KW, con lo que se tiene una corriente máxima de carga de 33,33A. La variación en el voltaje de carga aceptado es entorno a un 1%.

Carga (Banco de baterías)	
Voltaje de carga	300V
Potencia de carga	10KW
Corriente	33,33A
Rizado	1%

Figura 25. Especificaciones de la Carga. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

Para establecer los criterios en la entrada del convertidor, voltaje máximo esperado en la entrada, se realizó una medición del voltaje de salida del generador eléctrico en 10m/s.

Salida del generador PMSG		
Velocidad del viento	Voltaje (rectificado)	Amplitud del rizado
10m/s	836V	122V

Figura 26. Voltajes de salida rectificadas del generador. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

A partir de lo establecido anteriormente y de lo especificado en la metodología de diseño elegida, se puede proseguir con el diseño de la siguiente manera:

D_{max} : Ciclo de trabajo máximo.

$V_o = 300V$; voltaje de salida del convertidor.

$V_{inmax} = 836V$; *voltaje máximo de entrada.*

$$D_{max} = \frac{V_o}{V_{inmax}} = 0,75$$

Inductancia.

L_{min} : *Inductancia mínima.*

$f_{sw} = 20KHz$; *frecuencia de comutación del convertidor.*

$\Delta I_{Lpp} = 1A$; *Rizado de la corriente en la inductancia.*

$$L_{min} = D_{max} * \frac{V_{inmax} - V_o}{\Delta I_{Lpp} * f_{sw}} = 20,1mH$$

Capacitor de entrada.

C_{inmin} : *Capacitor de entrada mínimo.*

ESR_{max} : *máxima resistencia en serie equivalente del capacitor.*

$\Delta V_{inpp} = 1,66V$; *rizado de voltaje aceptado en la entrada.*

$\Delta I_{inpp} = 5A$; *rizado de corriente aceptado en la entrada.*

$$C_{inmin} = \frac{\frac{D_{max}}{f_{sw}}}{\frac{\Delta V_{inpp}}{\Delta I_{inpp}} * ESR_{max}}$$

Para el capacitor de entrada la ESR debe ser:

$$ESR_{max} \leq 0,5 * \frac{\Delta V_{inpp}}{\Delta I_{inpp}}$$

$$ESR_{max} \leq 0,166\Omega$$

Por tanto:

$$C_{inmin} = \frac{\frac{D_{max}}{f_{sw}}}{0,5 * \frac{\Delta V_{inpp}}{\Delta I_{inpp}}} = 225\mu F$$

Capacitor de salida.

C_{omin} : Capacitor de salida mínimo.

ESR_{max} : máxima resistencia en serie equivalente del capacitor.

$\Delta V_{opp} = 0,1V$; rizado de voltaje aceptado en la salida.

$\Delta I_{opp} = 1A$; rizado de corriente aceptado en la salida.

$$C_{omin} = \frac{\frac{D_{max}}{f_{sw}} * \Delta I_{opp}}{\Delta V_{opp} - (\Delta I_{opp} * ESR_{max})}$$

Para el capacitor de salida la ESR debe ser:

$$ESR_{max} \leq 0,36 * \frac{\Delta V_{inpp}}{\Delta I_{inpp}}$$

$$ESR_{max} \leq 0,036\Omega$$

Por tanto:

$$C_{omin} = \frac{\frac{D_{max}}{f_{sw}}}{0,36 * \frac{\Delta V_{opp}}{\Delta I_{opp}}} = 585,94\mu F$$

Requerimientos de potencia de los elementos del convertidor [73].

Inductancia.

$$I_L = I_o = 33,33A$$

I_L , Corriente que deben soportar los bobinados de la inductancia, corresponde a la corriente máxima que suministra el convertidor a la carga.

Capacitor de entrada.

$$V_C = V_{inmax} + \frac{\text{rizado}}{2} = 836 + \frac{122}{2} = 897V$$

V_C , voltaje mínimo que debe soportar el capacitor de entrada.

Capacitor de salida.

$$V_C = V_o = 300V$$

V_C , voltaje mínimo que debe soportar el capacitor de salida.

Diodo.

$$I_D \geq I_o * 1,1 = 33,33A * 1,1$$

I_D , es la corriente que debe soportar el diodo, la cual corresponde a la misma corriente de salida, sin embargo, como criterio de diseño suele establecerse en 1,1 veces ese valor.

$$V_{rv} \geq V_{inmaxp} * 1,2 = 897V * 1,2$$

V_{rv} , es el voltaje inverso mínimo que debe soportar el diodo. El factor de 1,2 también es debido a criterios de diseño.

Mosfet.

$$V_{DS} \geq V_{inmaxp} * 1,2 = 897V * 1,2$$

$$I_D \geq I_o = 33,33A$$

V_{DS} , Voltaje Drain-Source del mosfet e I_D , corriente que debe soportar el mosfet a través del Drain.

Algoritmo perturbar y observar (P&O).

Como ya se mencionó anteriormente, el algoritmo perturbar y observar es de los más usados en lo que concierne a seguimiento de puntos de máxima potencia y eso se debe a la sencillez de implementación que tiene, además de la ventaja de que en teoría no necesita modelos matemáticos ni conocimiento de las características de la turbina ni del sistema en general.

El algoritmo P&O no solo es común en las turbinas eólicas, también es ampliamente utilizado en paneles fotovoltaicos, de hecho, debido a que los paneles fotovoltaicos han sido mayormente más estudiados que las turbinas, existe mucha más literatura de estos algoritmos aplicada a paneles. En [74] [75] son algunos ejemplos de trabajos donde se describen sistemas de generación fotovoltaica que hacen uso de algoritmos MPPT tipo perturbar y observar, incluso es común encontrar trabajos como [76] [77] donde se modifica y compara este algoritmo frente a su versión básica.

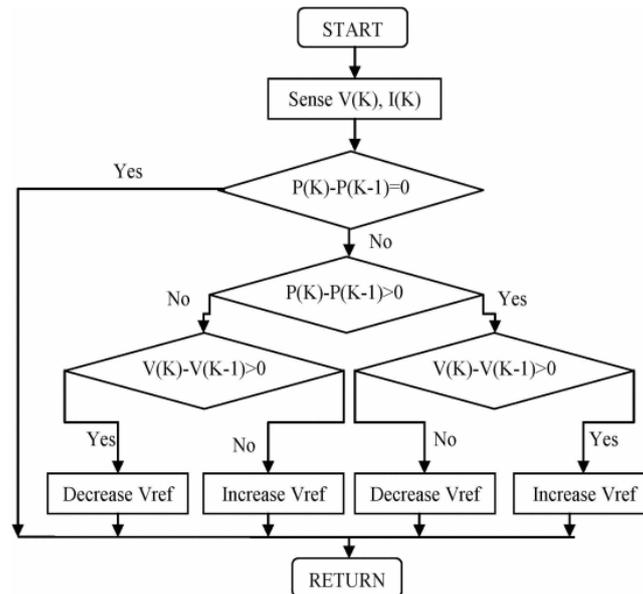


Figura 27. Diagrama de flujo de algoritmo P&O. Fuente: L. Badreddine, S. Zouggar, M. L. Elhafyani and F. Z. Kadda. [78]

En la Figura 27 se observa el mecanismo de funcionamiento a través de un diagrama de flujo del algoritmo perturbar y observar. En este caso el algoritmo tiene como variable de salida el voltaje del generador, como se indica la salida final es incrementar o reducir “Vref”.

También es posible referenciar el algoritmo con respecto a otra variable, como podría ser la corriente, la velocidad del generador, la potencia. Cualquiera de estos enfoques tiene que generar un cambio en el ciclo de trabajo del convertidor, con lo que es posible diseñar un algoritmo P&O cuya lógica considere directamente un cambio en el ciclo de trabajo.

P&O propuesto (diagrama de flujo).

La Figura 28 muestra el diagrama de flujo que describe el funcionamiento y enfoque general que tiene el algoritmo implementado en el presente trabajo. El algoritmo tiene en cuenta directamente el valor de potencia generada para realizar una acción de control, la cual se basa en un aumento o disminución del ciclo de trabajo.

Inicialmente el algoritmo usa la medida de voltaje y corriente del generador para calcular la respectiva potencia extraída, luego calcula la diferencia entre la potencia medida en ese momento y la potencia medida en el tiempo de muestreo anterior con el fin de determinar si la potencia aumentó o disminuyó. Cuando la diferencia de potencia es positiva significa que la perturbación tuvo un efecto de aumento en la potencia por tanto el algoritmo debe seguir perturbando en la misma dirección (aumentando el ciclo de trabajo), lo contrario sucede si la diferencia es negativa. Si no hay diferencia el algoritmo genera una nueva perturbación dejando el mismo ciclo de trabajo. Finalmente se actualiza el valor de potencia “anterior” y se repite el ciclo. Es necesario también considerar la medición de la diferencia

de voltaje dentro de la lógica ya que no necesariamente un aumento de voltaje con lleva a un aumento en la potencia.

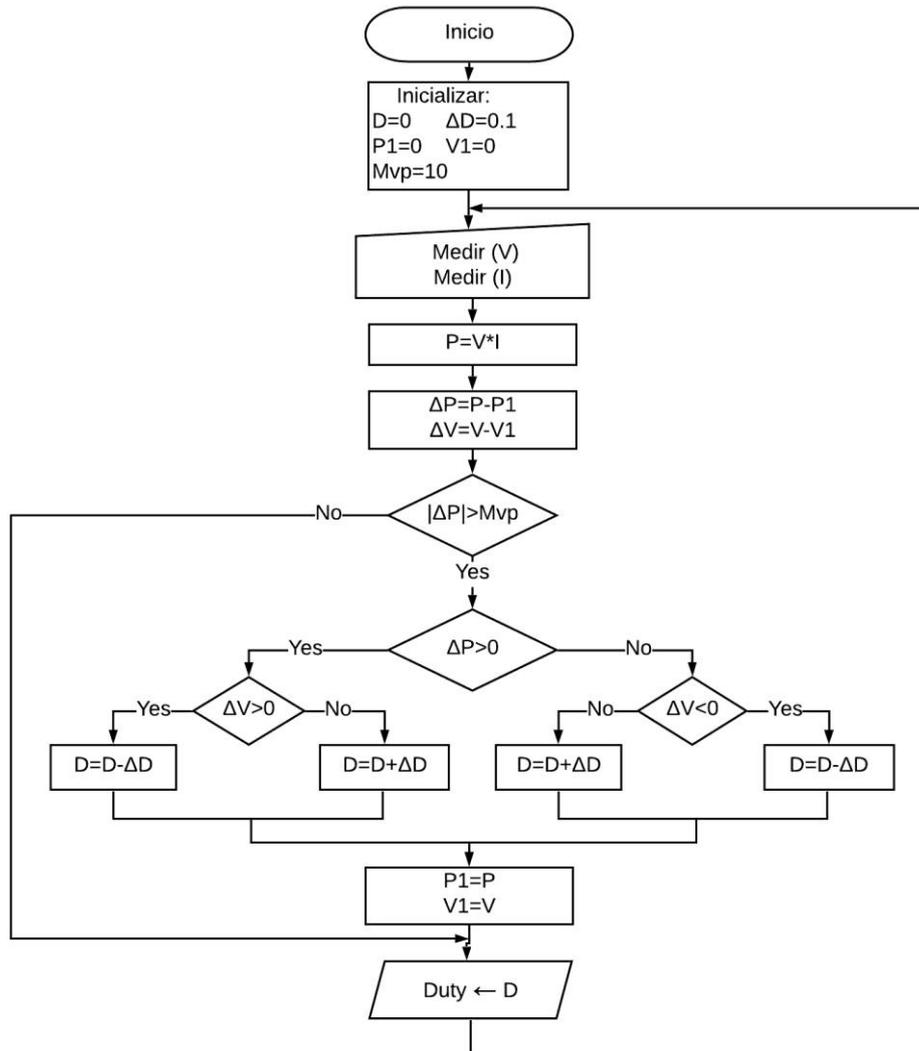


Figura 28. Diagrama de flujo de del algoritmo a implementar. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

Adicionalmente se ha establecido un umbral mínimo (“Mvp”) que debe superar la diferencia de potencia para que el algoritmo actúe (cambie el ciclo de trabajo), esto con el fin evitar acciones frente a variaciones en la señal de potencia que no representen realmente un cambio en el punto de operación como lo son oscilaciones, armónicos, ráfagas de viento, entre otras.

El algoritmo se ha implementado a través del bloque “Function block” que permite ejecutar código en el entorno de Simulink. Revisar el Anexo 4.

13 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Con la finalidad de conocer si el sistema de control en efecto se encuentra operando correctamente se decidió realizar una comparación del funcionamiento de la turbina sin el sistema de control y con el sistema implementado.

13.1 Turbina sin MPPT.

En esta prueba sea simulado la turbina sin el sistema de control MPPT a una velocidad de viento de 10m/s.

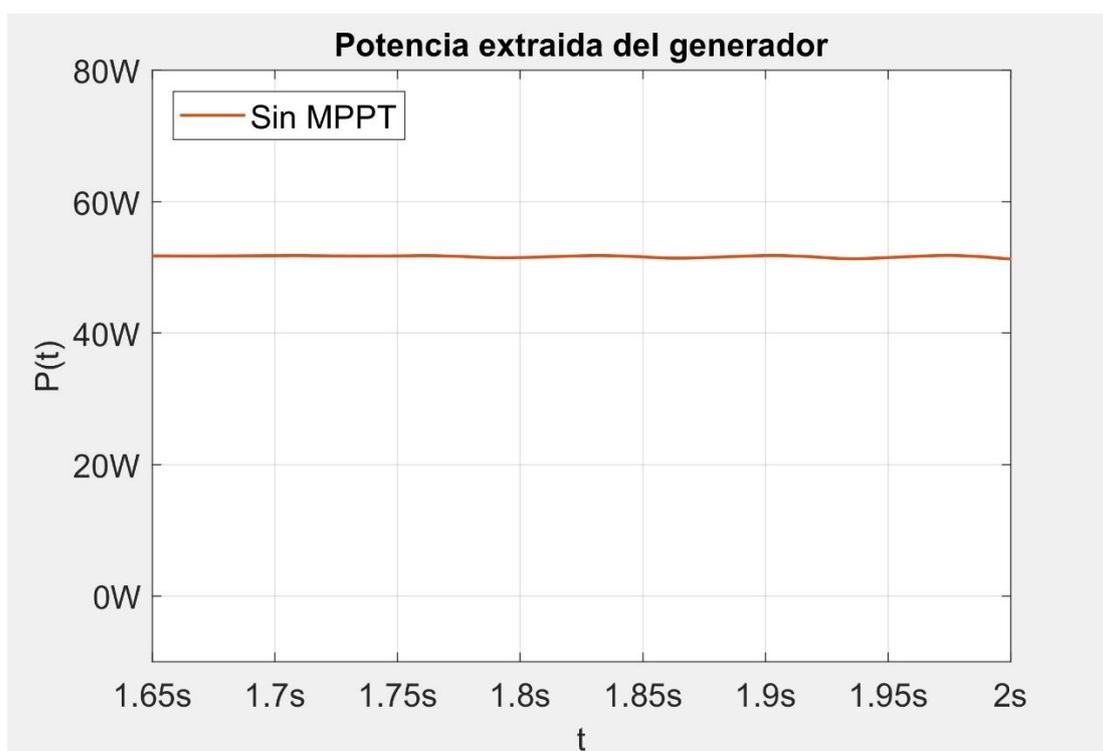


Figura 29. Respuesta sin MPPT a 10m/s. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

Para esta prueba la turbina tiene conectada la misma carga estipulada para el diseño del sistema del convertidor, la cual corresponde a 300V. Se puede observar que los niveles de potencia obtenidos, 51,8W en promedio, son muy inferiores al orden de potencia en el cual debería operar la turbina.

Este comportamiento se debe a que la turbina, sin un sistema que le permita acoplar adecuadamente las cargas, es prácticamente incapaz de suministrar la demanda de corriente

hacia la carga utilizada en la prueba, con lo que se obtiene una caída considerable en la potencia.

13.2 Turbina sin MPPT con carga menor.

Debido al comportamiento anteriormente observado se decidió, buscar manualmente la carga óptima para la turbina, lo cual significa disminuir la demanda de corriente de manera que la potencia no se vea disminuida.

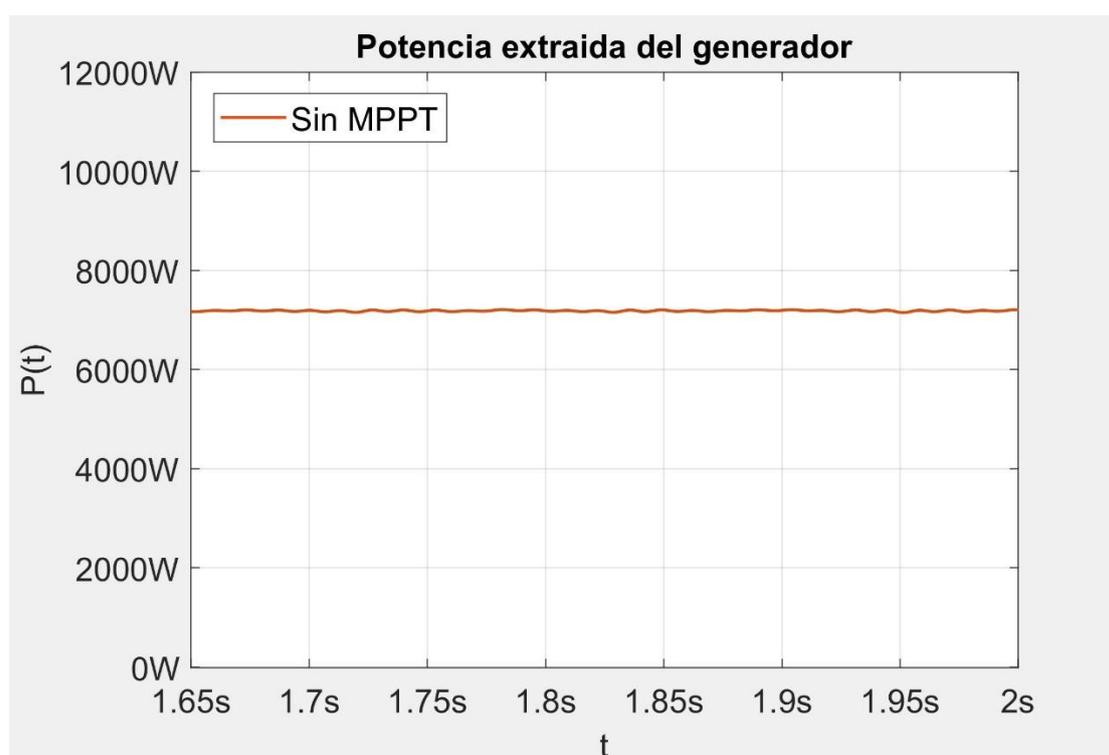


Figura 30. Respuesta sin MPPT con carga de 764Vrms a 10m/s. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

Para una velocidad de viento de 10m/s la turbina puede alcanzar un máximo de 7.186W promedio cuando es conectada a una carga de 764Vrms de 10KW. Lo cual incluso deja a esta configuración sin MPPT a solo un 72% de la potencia nominal.

Es necesario resaltar que para esta prueba fue necesario buscar de manera manual (ensayo y error) la carga que generaba la mayor potencia en la velocidad de 10m/s, lo que infiere que esta configuración es inviable para alimentar una carga específica a distintas velocidades de viento, lo cual es lo deseado para una implementación en la práctica.

13.3 Sistema con algoritmo MPPT a 10m/s.

Se ha simulado el sistema con MPPT a una velocidad de viento de 10m/s.

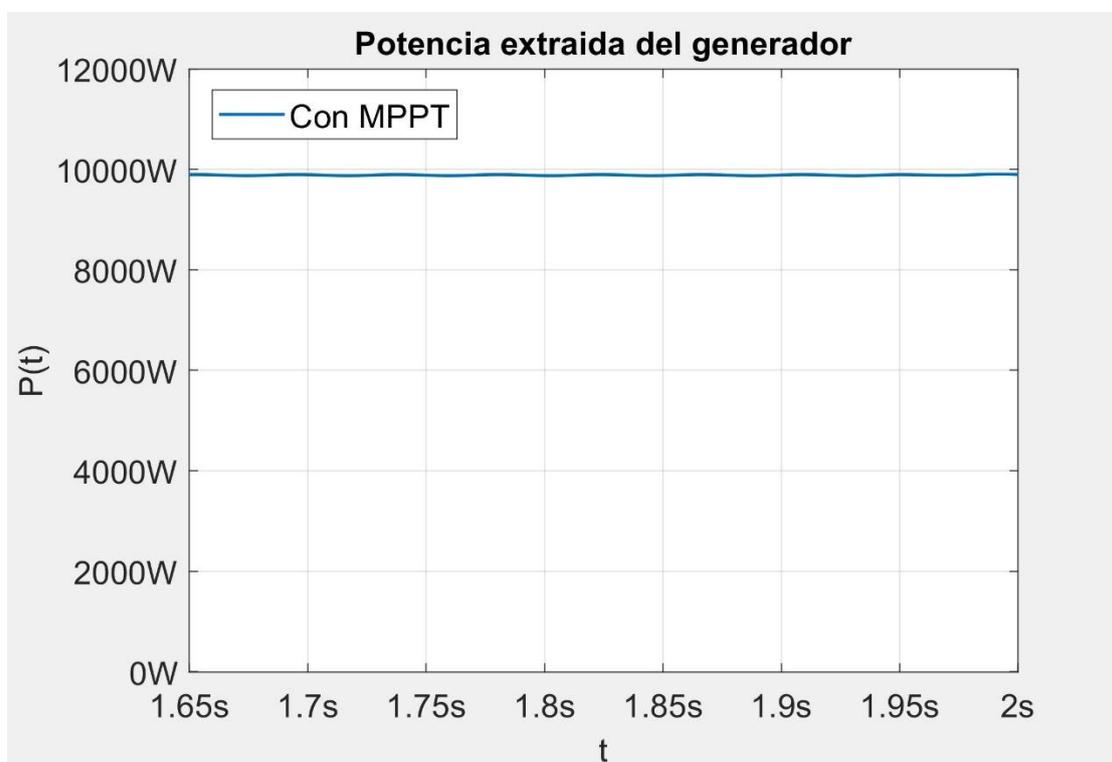


Figura 31. Respuesta con MPPT a 10m/s. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

La Figura 31 muestra el nivel de potencia alcanzado por el sistema cuando es implementado el sistema de control MPPT, la carga conectada es la especificada en el diseño con valor de 300Vrms. El nivel de potencia alcanzado es prácticamente el nominal, de 9.887W promedio.

13.4 Sistema con algoritmo MPPT frente a cambios de velocidad del viento.

En esta prueba el objetivo es visualizar el comportamiento del sistema de control cuando la velocidad del viento disminuye y aumenta.

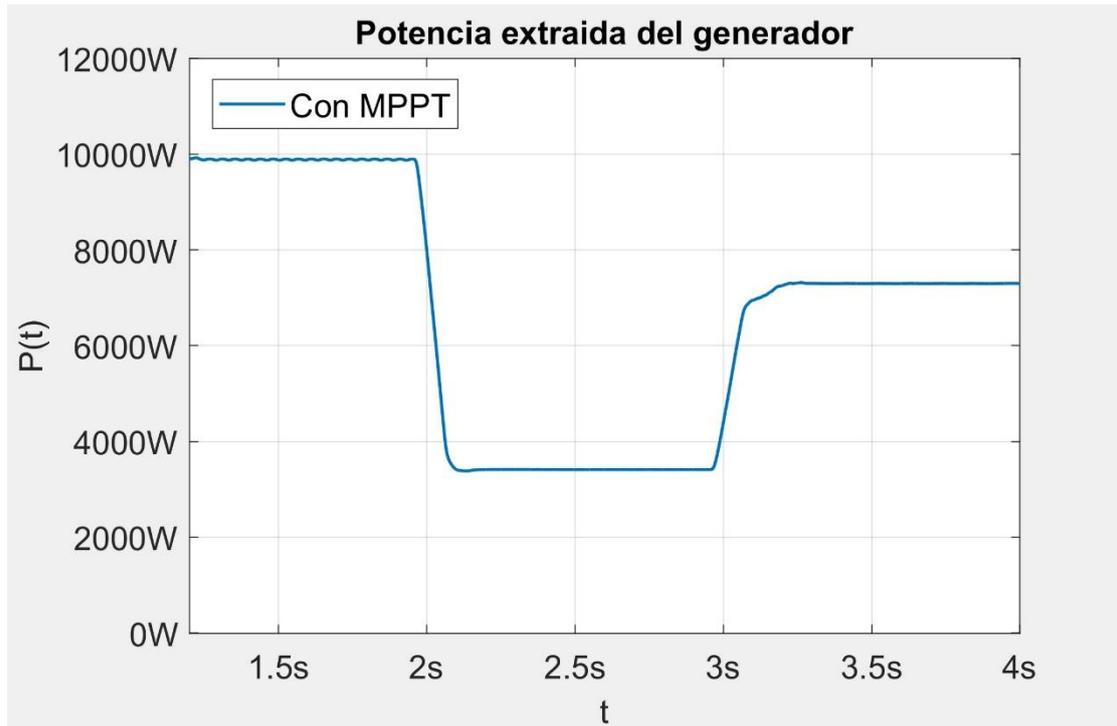


Figura 32. Respuesta con cambios de velocidad de viento. Fuente: Ramos J. G. [Elaboración propia]

La Figura 32 presenta los resultados obtenidos de la potencia media cuando la velocidad del viento cambia. En el intervalo de 0 a 2s la velocidad de viento corresponde a 10m/s, de 2 a 3s la velocidad del viento cae a 7m/s y partir de 3s la velocidad del viento es de 9m/s.

Como se puede observar tanto el caso cuando la velocidad del viento disminuye como cuando aumenta, el sistema de control permite que la turbina continúe suministrando potencia de manera estable hacia la carga. Para el intervalo donde la velocidad del viento es 10m/s, el nivel de potencia promedio es 9.887W; para el intervalo de 7m/s la potencia pasa a 3.413W; para el intervalo de 9m/s la potencia promedio es 7.297W.

Nota: Los datos de las gráficas de las Figura 31, Figura 32, Figura 31 y Figura 32 han sido filtrados con un promedio móvil con el objetivo de observar el comportamiento de la respuesta obtenida en términos de potencia media. Los resultados originales se muestran en los Anexos al final de este documento.

14 ZONAS CON POTENCIAL EÓLICO EN COLOMBIA.

Debido a la variabilidad en la climatología de Colombia con periodos de fuertes sequías en algunas épocas del año y sequías en otras, sumado al alza en los costos de generación térmica por el agotamiento de recursos, es de vital importancia que en el país se comiencen a considerar seriamente fuentes alternativas de generación eléctrica que además de no contribuir en la contaminación ambiente, ayuden a ampliar la matriz energética y suplir las faltas de la generación eléctrica actual [79].

La situación anterior hace evidente la vulnerabilidad de los precios y de la oferta de la energía eléctrica del sistema Interconectado Nacional (SIN) actual que está constituido principalmente por fuentes hidroeléctricas, con un 68.67%, alrededor de un 22% por carbón y gas; del restante porcentaje solo el 1% corresponde a fuentes renovables (eólica, fotovoltaica) [80].

A pesar de que el recurso eólico en Colombia no es de los mejores, existen ciertas zonas del país las cuales brindan un régimen de vientos bastante favorables para proyectos que planteen la explotación de energía a través del viento. El departamento de la guajira es el más popular cuando se habla de este recurso natural, contando en las zonas de la alta guajira con promedios de viento al año de entre 10m/s y 12m/s a 80m [81].

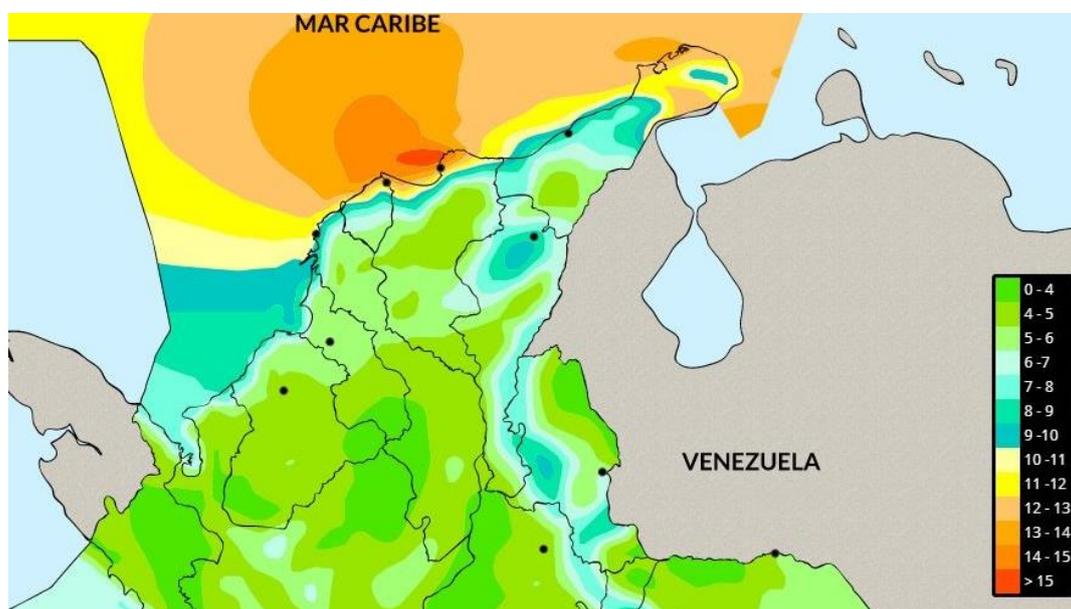


Figura 33. Mapa de vientos anuales (Colombia, región Caribe). Fuente: Sistema ATLAS, Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales (IDEAM). [81]

En la guajira se instalado el primer parque eólico de Colombia en 2004 contando con una capacidad de generación 50GW al año [82]. Adicionalmente, a partir de 2014 con la aparición de leyes como la 1715 que regulan la integración de las energías renovables al

sistema de generación nacional, el interés para poner en marcha proyectos han ido surgiendo con más frecuencia.

Actualmente existen varios proyectos de parques eólicos más grandes en este territorio, los cuales son dirigidos por firmas extranjeras como EDP (energías de Portugal), quienes desarrollan 2 parques con nombre Alpha y Beta que generarán en el año 2022, 212MW y 280MW respectivamente [83]. Empresas nacionales como AES Colombia, también tiene en fases avanzadas la construcción un complejo eólico que constan de 4 parques eólicos que tendrán una capacidad sumada de 549MW [84].

14.1 Régimen de vientos en Colombia.

Determinar la viabilidad que tiene un proyecto de energía eólica en un lugar determinado es una tarea que requiere estudios específicos y detallados en esa zona. Estos estudios generalmente suelen incluir criterios como la cercanía de la zona a las redes tanto viales como eléctricas (SIN), afectación visual y auditiva en las comunidades, cercanías a zonas naturales protegidas, flora y fauna de la zona, además de evidentemente, considerar aspectos financieros como costos de implementación, operación, mantenimiento, rendimientos económicos, etc [85].

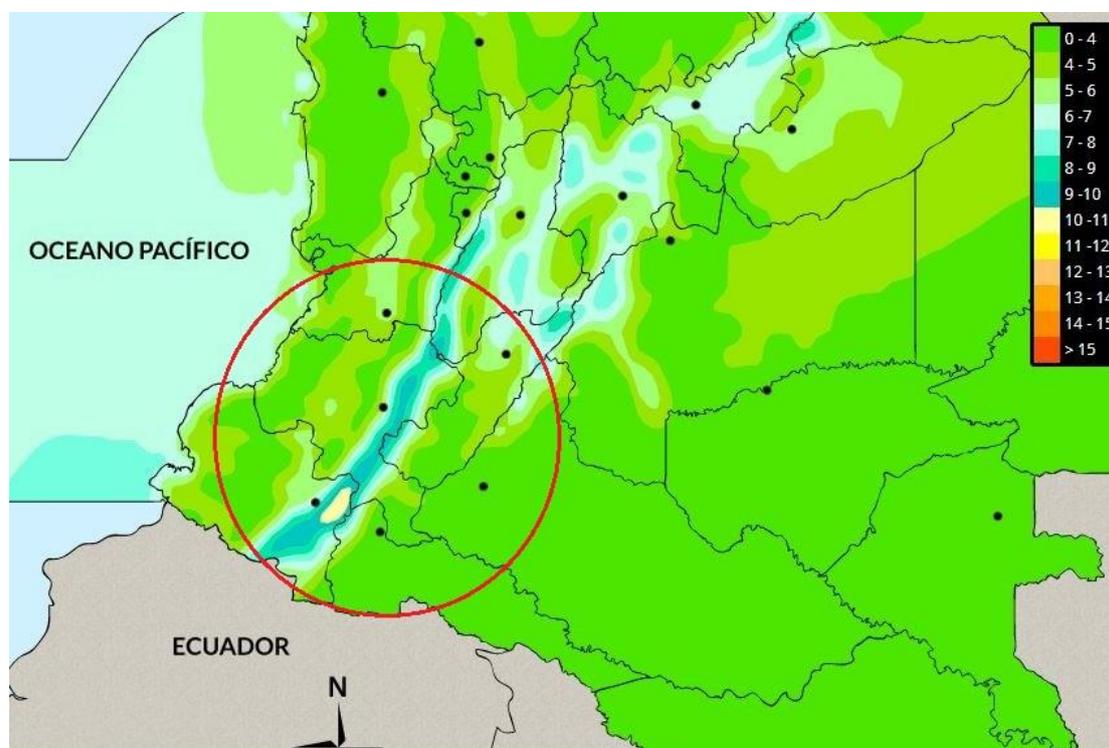


Figura 34. Mapa de vientos anuales (Colombia). Fuente: Sistema ATLAS, Instituto De Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales (IDEAM). [81]

No obstante, con todas las variables requeridas para evaluar la viabilidad de un proyecto de generación eólica, al final el régimen de vientos en la zona es la variable más importante ya que este determina en principio la cantidad de electricidad producida, que es el producto comerciable, y del cual el proyecto obtiene ganancias. Por tanto, este dato proporciona valiosa información sobre el potencial que tiene la zona y a su vez sirve de primer filtro para determinar zonas en las cuales valdría la pena plantear un estudio más específico.

Entre estas zonas potenciales según su régimen de viento, además de la guajira, encontramos una zona interesante en la región suroccidental del país la cual atraviesa parte de los departamentos de Nariño, Cauca y pequeña parte de Tolima. Como se observa en el mapa de la Figura 34, esta zona que tiene forma alargada presenta velocidades de viento promedio anuales de entre 8 a 10m/s; teniendo una pequeña zona en Nariño correspondiente a las provincias de Pasto y Juanambú, donde las velocidades se encuentran entre 10 y 12m/s.

15 TRABAJOS FUTUROS

- Estudiar los mecanismos que intervienen en la sensibilidad que tiene el convertidor en cuanto al cambio en la potencia por cada variación en el ciclo de trabajo, lo cual ayudaría a determinar el tamaño del paso adecuado para el algoritmo y también sería útil al ajustar la sensibilidad mínima que considera el algoritmo.
- Encontrar una metodología que permita seleccionar los componentes del convertidor DC-DC de manera que se pueda disminuir la oscilación del sistema sin sacrificar el tiempo de respuesta.
- Mejorar la respuesta transitoria del sistema, concretamente, cuando cambia el ciclo de trabajo no se generen picos de potencia tan altas que puedan comprometer los componentes.

16 CONCLUSIONES

- Se realizó una revisión amplia de la temática y la literatura acerca de lo referido a sistemas eólicos y algoritmos MPPT.
- Se implementó un sistema de control MPPT a través de un algoritmo tipo perturbar y observar el cual sólo utiliza las mediciones de voltaje y corriente del generador.
- Se logró evidenciar la mejora en la extracción de potencia cuando es implementado el algoritmo MPPT en el sistema eólico simulado.
- Se identificaron zonas que podrían tener un potencial de generación eléctrica a través de sistemas eólicos, debido a su alto promedio anual de velocidad de viento.

17 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Table 1. Human Development Index and its components. UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAMME. Disponible en: <http://hdr.undp.org/en/composite/HDI>.
- [2] Consumo de electricidad per cápita por país. Index Mundi. Disponible en: <https://www.indexmundi.com/map/?v=81000&l=es>.
- [3] BP Statistical Review of World Energy 2017. Full Report. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/statistical-review-2017/bp-statistical-review-ofworld-energy-2017-full-report.pdf>.
- [4] REN21 -Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Renewables 2017 [2] -Global status Report, Madrid -Spain: REN21, 2017. Disponible en: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/06/REN21_AnnualReport_2017_web.pdf.
- [5] Renewable Infrastructure Investment Handbook: A Guide for Institutional Investors. World Economic Forum, December 2016. Disponible en: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Renewable_Infrastructure_Investment_Handbook.pdf.
- [6] REN21. Renewables 2019 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat), 2019. ISBN 978-3-9818911-7-1. Disponible en: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf.
- [7] Chen, Z. & Guerrero, Josep & Blaabjerg, F.. (2009). A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines. Power Electronics, IEEE Transactions on. 24. 1859 - 1875. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/224576050_A_Review_of_the_State_of_the_Art_of_Power_Electronics_for_Wind_Turbines.
- [8] Jabir, Muhammad & Illias, Hazlee & Raza, Safdar & Mokhlis, Hazlie. (2017). Intermittent Smoothing Approaches for Wind Power Output: A Review. Energies. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/320359090_Intermittent_Smoothing_Approaches_for_Wind_Power_Output_A_Review.
- [9] Training Programme Renewable Energy Sources. International Hellenic University. Muscat-Oman. 2016. Disponible en: https://www.eugcc-cleanenergy.net/sites/default/files/events/Oman2016/S4%20Oman%20Wind%20energy_the%20technology%202016.pdf.
- [10] Zebraoui, O & Bouzi, M. (2018). Comparative study of different MPPT methods for wind energy conversion system. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Disponible en:

https://www.researchgate.net/publication/325771956_Comparative_study_of_different_MPPT_methods_for_wind_energy_conversion_system.

- [11] Karim Belmokhtar, Hussein Ibrahim and Mamadou Lamine Doumbia. A Maximum Power Point Tracking Control Algorithms for a PMSG-based WECS for Isolated Applications: Critical Review, Wind Turbines - Design, Control and Applications. Abdel Ghani Aissaoui and Ahmed Tahour. IntechOpen, 2016. Disponible en: <https://www.intechopen.com/books/wind-turbines-design-control-and-applications/a-maximum-power-point-tracking-control-algorithms-for-a-pmsg-based-wecs-for-isolated-applications-cr>.
- [12] P. F. Díez, “Energía Eólica”, Departamento de ingeniería eléctrica y energética universidad de Cantabria, pp. 1-2. Disponible en: <http://www.exa.unne.edu.ar/fisica/maestria/modulo2/eolica/eolo12002.pdf>.
- [13] Lynn White Jr, “tecnología medieval y cambio social”, (Oxford, 1962), pp. 86-87, 161-162. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/58140774/White-Tecnologia-Medieval-y-Cambio-Social>.
- [14] Price, Trevor J. “James Blyth - Britain’s First Modern Wind Power Engineer”. Wind Engineering. 29 (3) pp. 191–200. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/245525608_James_Blyth_-_Britain's_first_modern_wind_power_pioneer.
- [15] U.S Department of Energy, “History of U.S. Wind Energy”, Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/wind/history-us-wind-energy>.
- [16] M. Pasqualetti, R. Richter, P. Gipe, (2004), “History of Wind energy”. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/265594973_History_of_Wind_Energy.
- [17] S. Singh, “Wind power: Future lies within,” 2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE), Patiala, 2016. Disponible en: <https://bdbib.javerianacali.edu.co:2214/document/8079536>.
- [18] H. Allamehzadeh, “Wind energy history, technology and control,” 2016 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), Phoenix, AZ, 2016. Disponible en: <https://bdbib.javerianacali.edu.co:2214/document/7897153>.
- [19] Wind Power Capacity Worldwide Reaches 597 GW, 50,1 GW added in 2018. Press Releases, Statistics, 2019. Disponible en: <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/wind-power-capacity-worldwide-reaches-600-gw-539-gw-added-in-2018/>.
- [20] World wind capacity at 650,8 GW, Corona crisis will slow down markets in 2020, renewables to be core of economic stimulus programmes. Press Releases, Statistics, 2020. Disponible en: <https://wwindea.org/blog/2020/04/16/world-wind-capacity-at-650-gw/>.

- [21] Asociación Americana de Energía Eólica, “Fundamentos de la energía eólica”, 2010. Disponible en: http://www.awea.org/faq/wwt_basics.html.
- [22] Jaime Moragues y Alfredo Rapallini, “ENERGIA EOLICA”, Instituto Argentino De la Energía, 2003, pp10-11, 14. Disponible en: <http://menteocupada.com/energia/energia-energia-eolica-instituto-argentino.pdf>.
- [23] Hassam Nasarullah Chaudhry, John Kaiser Calautit, Ben Richard Hughes, “Numerical Analysis of the Integration of Wind Turbines into the Design of the Built Environment”, American Journal of Engineering and Applied Sciences, (2014). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269874482_Numerical_Analysis_of_the_Integration_of_Wind_Turbines_into_the_Design_of_the_Built_Environment.
- [24] Elizabeth Stinson, “The Future of Wind Turbines? No Blades”, Wired, (2015). Disponible en: <https://www.wired.com/2015/05/future-wind-turbines-no-blades/>.
- [25] U.S Department of Energy, “The Inside of a Wind Turbine”, Office of energy efficiency & renewable energy. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>.
- [26] F. Blaabjerg and K. Ma, “Wind Energy Systems,” in Proceedings of the IEEE, 2017. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7927779>.
- [27] Álvaro Lucas San Román, “Diseño de un aerogenerador para uso particular”, Universidad Carlos III de Madrid, 2013, pp. 18-20. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/20245/TFG_Alvaro_Lucas_San_Roman.pdf.
- [28] Clemente Álvarez, “Energía eólica”, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, (2016), p. 34. Disponible en: http://dl.idae.es/Publicaciones/10374_Energia_eolica_A2006.pdf.
- [29] EADIC, Universidad de Alcalá. MÓDULO III – ENERGÍA EÓLICA Conceptos Generales de la Energía Eólica. Disponible en: <http://eadic.com/wp-content/uploads/2013/09/Monograf%C3%ADa-Conceptos-generales-Energ%C3%ADa-E%C3%B3lica.pdf>.
- [30] Introducción a la teoría de las turbinas eólicas. Manuel Franquesa Voneschen. LA VERITAT. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/12777600/introduccion-a-la-teoria-de-las-turbinas-eolicas-amics-21>.
- [31] Fahhad H. Alharbi, Sabre Kais. Theoretical limits of photovoltaics efficiency and possible improvements by intuitive approaches learned from photosynthesis and quantum coherence. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Pages 1073-1089, Volume 43, 2015. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403211401048X>.

- [32] Eftichios Koutroulis and Kostas Kalaitzakis. Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications. IEEE, APRIL 2006. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1614132>.
- [33] JUAN MANUEL GIMENEZ ALVAREZ, JUAN CARLOS GÓMEZ TARGARONA, “WIND GENERATION USING DIFFERENT GENERATORS CONSIDERING THEIR IMPACT ON POWER SYSTEM”, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, 2011. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v78n169/a11v78n169.pdf>.
- [34] Stephen Chapman, “Máquinas eléctricas 5 edición”, (pp147-151) y (pp231-235).
- [35] Anagha R. Tiwari, Anuradha J. Shewale, Anuja R. Gagangras, Netra M. Lokhande, “Comparison of various Wind Turbine Generators”, Multidisciplinary Journal of Research in Engineering and Technology, Volume 1, Issue 2, Pg.129-135, 2014. Disponible en: <http://www.mjret.in/V1I2/M5-1-2-7-2014.pdf>.
- [36] A. Beainy, C. Maatouk, N. Moubayed and F. Kaddah, “Comparison of different types of generator for wind energy conversion system topologies,” 2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), Zouk Mosbeh, 2016. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7577535/>.
- [37] Bindhu Babu, S. Divya, “Comparative study of different types of generators used in wind turbine and reactive power compensation”, Department of Electrical and Electronics Engineering, Adi Shankara Institute of Engineering and Technology, Kalady. Disponible en: <http://iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Conf.17017/Volume-2/13.%2095-99.pdf?id=7590>.
- [38] JOSÉ de la CRUZ TORRES, “CONVERTIDORES DE POTENCIA CC/CA MULTINIVEL PARA SISTEMAS DE ENERGÍA EÓLICA”. ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SEVILLA. ESCUELA SUPERIOR DE INGENIEROS DE SEVILLA, PROYECTO FIN DE CARRERA. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/40033/fichero/VOLUMEN_1%252FMEMORIA_JUSTIFICATIVA.pdf.
- [39] F. Bordry, “Power converters: definitions, classification and converter topologies”. CERN, CAS - CERN Accelerator School and CLRC Daresbury Laboratory: Specialised CAS Course on Power Converters, pp.13-42 (CERN-2006-010) Geneva, Switzerland, 2004. Disponible en: <https://cds.cern.ch/record/987498/files/p13.pdf>.
- [40] Md Rabiul Islam, Youguang Guo, and Jianguo Zhu, “Power converters for wind turbines: Current and future development”, Materials and Processes for Energy: Communicating Current Research and Technological Developments Edition: Energy Book Series-2013 Chapter: 15 ,2013. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262974138_Power_converters_for_wind_turbines_Current_and_future_development.

- [41] R. A. Gonzalez, M. A. Perez, H. Renaudineau and F. Flores-Bahamonde, "Fast maximum power point tracking algorithm based on switching signals modification," 2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Cadiz, 2017, pp. 448-453. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7915213/>.
- [42] A. Reza Reisi, M. Hassan Moradi, S. Jamasb, "Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 19, pp. 433-443, 2013. Disponible en: https://www.academia.edu/16878819/Classification_and_comparison_of_maximum_power_point_tracking_techniques_for_photovoltaic_system_A_review.
- [43] S. Musunuri and H. L. Ginn, "Comprehensive review of wind energy maximum power extraction algorithms," 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 2011, pp. 1-8. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6039023>.
- [44] K. S. Muhammad Raza, H. Goto, H. Guo and O. Ichinokura, "A novel speed-sensorless adaptive hill climbing algorithm for fast and efficient maximum power point tracking of wind energy conversion systems," 2008 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 2008, pp. 628-633. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4747083>.
- [45] A. Ilyas, M. R. Khan and M. Ayyub, "Lookup table based modeling and simulation of solar photovoltaic system," 2015 Annual IEEE India Conference (INDICON), New Delhi, 2015, pp. 1-6. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7443268>.
- [46] J. K. Udavalakshmi and M. S. Sheik, "Comparative Study of Perturb & Observe and Look-Up Table Maximum Power Point Tracking Techniques using MATLAB/Simulink," 2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT), Coimbatore, 2018, pp.1-5. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8550835>.
- [47] D. Haji and N. Genc, "Fuzzy and P&O Based MPPT Controllers under Different Conditions," 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, 2018, pp. 649-655. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8566943>.
- [48] J. I. Corcau and L. Dinca, "Modeling and Analysis of a Fuzzy Type MPPT Algorithm," 2019 International Conference on Electrical Drives & Power Electronics (EDPE), The High Tatras, Slovakia, 2019, pp. 230-234. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8883925>.
- [49] Hui Li, K. L. Shi and P. G. McLaren, "Neural-network-based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient," in IEEE Transactions on

Industry Applications, vol. 41, no. 6, pp. 1548-1556, Nov.-Dec. 2005. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1542308>.

- [50] S. E. RHAILI, A. ABOU, N. E. HICHAMI and S. MARHRAOUI, "A New Strategy Based Neural Networks MPPT Controller for Five-phase PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine," 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, 2018, pp. 1038-1043. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8566822>.
- [51] K. Amei, Y. Takayasu, T. Ohji and M. Sakui, "A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit," Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579), Osaka, Japan, 2002, pp. 1447-1452 vol.3. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/998186>.
- [52] J. Hui and A. Bakhshai, "A new adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems," 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, 2008, pp. 4003-4007. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4592580>.
- [53] R. Chedid, F. Mrad and M. Basma, "Intelligent control of a class of wind energy conversion systems," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1597-1604, Dec. 1999. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/815111?arnumber=815111>.
- [54] Thongam Jogendra, Ouhrouche Mohand, "Fundamental and Advanced Topics in Wind Power", Chapter 15 MPPT Control Methods in Wind Energy Conversion Systems, 2011. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/221912818_MPPT_Control_Methods_in_Wind_Energy_Conversion_Systems.
- [55] M. Mahdavian, N. Wattanapongsakorn, G. Shahgholian, S. H. Mozafarpour, M. Janghorbani, S. M. Shariatmada, "Maximum power point tracking in wind energy conversion systems using tracking control system based on fuzzy controller", Department of Computer Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, pp.1-5, 2014. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269294597_Maximum_power_point_tracking_in_wind_energy_conversion_systems_using_tracking_control_system_based_on_fuzzy_controller.
- [56] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim and Chee Wei Tan, "A study of maximum power point tracking algorithms for wind energy system," 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET), Kuala Lumpur, 2011, pp. 321-326. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6041484>.
- [57] R. Rathi and K. S. Sandhu, "Comparative analysis of MPPT algorithms using wind turbines with different dimensions & ratings," 2016 IEEE 1st International

- Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, 2016, pp. 1-4. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7853107>.
- [58] J. Sarkar and S. S. Khule, "A study of MPPT schemes in PMSG based wind turbine system," 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, 2016, pp. 100-105. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7754827>.
- [59] A. Mirecki, X. Roboam and F. Richardeau, "Comparative study of maximum power strategy in wind turbines," 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Ajaccio, France, 2004, pp. 993-998 vol. 2. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1571949>.
- [60] Buck Converter. Wikipedia, 2020. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Buck_converter.
- [61] M. K. Asy'ari and A. Musyafa, "Design of Buck Converter Based on Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller," 2018 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA), Bali, Indonesia, 2018, pp. 153-156. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8711236>.
- [62] K. Amei, Y. Takayasu, T. Ohji and M. Sakui, "A maximum power control of wind generator system using a permanent magnet synchronous generator and a boost chopper circuit," Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka 2002 (Cat. No.02TH8579), Osaka, Japan, 2002, pp. 1447-1452 vol.3. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/998186>.
- [63] T. Ramki and L. N. Tripathy, "Notice of Removal: Comparison of different DC-DC converter for MPPT application of photovoltaic system," 2015 International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), pp. 1-6, Visakhapatnam, 2015. Disponible en: https://www.academia.edu/24491040/Comparison_of_Different_DC-DC_Converter_for_MPPT_Application_of_Photovoltaic_System.
- [64] B. Tonsing, S. Vadhera and A. R. Gupta, "Comparative Analysis of Maximum Power Point Tracking Algorithms of Wind Energy Systems," 2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), NCR New Delhi, India, 2019, pp. 337-342. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8940630>.
- [65] Aryuanto Soetedjo, Abraham Lomi, Widodo Puji Mulayanto, "Modeling of Wind Energy System with MPPT Control". Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology (ITN) Malang. Malang, Indonesia. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/221013572_Modeling_of_wind_energy_system_with_MPPT_control.

- [66] Mouna BEN SMIDA, Anis SAKLY, “Different Conventional Strategies of Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines”, 15th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering - STA’2014, Hammamet, Tunisia, December 21-23, 2014. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/309153411_Different_Conventional_Strategies_of_Pitch_Angle_Control_for_Variable_Speed_Wind_Turbines.
- [67] Mohamed Zribi, Muthana Alrifai and Mohamed Rayan, “Sliding Mode Control of a Variable- Speed WindEnergy Conversion System Using a Squirrel CageInduction Generator”, Department of Electrical Engineering, Kuwait University, Kuwait, 2017. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316716507_Sliding_Mode_Control_of_a_Variable-Speed_Wind_Energy_Conversion_System_Using_a_Squirrel_Cage_Induction_Generator.
- [68] Zongxiang Lu, Shuangxi Zhou. Integration of Large Scale Wind Energy with Electrical Power Systems in China. pp46. John Wiley & Sons, 2018. Disponible en: <https://books.google.com.co/books?id=jilECwAAQBAJ&pg=PA47&lpg=PA47&dq=lc+filter+generator+side&source=bl&ots=0koGt0wuzp&sig=ACfU3U39cGsLdS2BIN8wobww-kRnHTVTaA&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjJ7PSLjs3pAhWmiOAKHc5ZA6UQ6AEwDHoECAgQAQ#v=onepage&q&f=false>.
- [69] Lata Gidwani and Akanksha Pareek, “GRID INTEGRATION ISSUES OF WIND FARMS”, International Journal of Advances in Engineering & Technology, Department of Electrical Engineering, Rajasthan Technical University, Kota, Rajasthan, India, 2016 Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/330651635_GRID_INTEGRATION_ISSUES_OF_WIND_FARMS.
- [70] Z. Chen, “Issues of Connecting Wind Farms into Power Systems”, 2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005. Disponible en: <http://www.science.smith.edu/~jcardell/Readings/Wind/Chen%20-%20issues.pdf>.
- [71] R.C. Bansal, Ahmed F. Zobaa, R.K. Saket, “Some Issues Related to Power Generation Using Wind Energy Conversion Systems: An Overview”, International Journal of Emerging Electric Power Systems Volume 3, Issue 2, 2005. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/40823964_Some_Issues_Related_to_Power_Generation_Using_Wind_Energy_Conversion_Systems_An_Overview.
- [72] Microchip Technology Incorporated. Buck Converter Design Example. Microchip Web Seminars, 2006. Disponible en: https://www.microchip.com/stellent/groups/SiteComm_sg/documents/Training_Tutorials/en528032.pdf.

- [73] Hubner Jurgen. The Buck Regulator, Part 3–Power Supply Design Tutorial Section 2-3. Power Electronics News, Technical Article, 2018. Disponible en: <https://www.powerelectronicsnews.com/the-buck-regulator-part-3-power-supply-design-tutorial-section-2-3/>.
- [74] M. Y. Allani, M. Jomaa, D. Mezghani and A. Mami, “Modelling and simulation of the hybrid system PV-wind with MATLAB/SIMULINK,” 2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC), Hammamet, 2018, pp. 1-6. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8362514>.
- [75] D. Verma, S. Nema and R. K. Nema, “Implementation of perturb and observe method of maximum power point tracking in SIMSCAPE/MATLAB,” 2017 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, 2017, pp. 148-152. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8389387>.
- [76] A. Nigam and A. Kumar Gupta, “Performance and simulation between conventional and improved perturb & observe MPPT algorithm for solar PVcell using MATLAB/Simulink,” 2016 International Conference on Control, Computing, Communication and Materials (ICCCCM), Allahbad, 2016, pp. 1-4. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7918220>.
- [77] C. Hua and Y. Chen, “Modified perturb and observe MPPT with zero oscillation in steady-state for PV systems under partial shaded conditions,” 2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), Kuala Lumpur, 2017, pp. 5-9. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8262448>.
- [78] L. Badreddine, S. Zouggar, M. L. Elhafyani and F. Z. Kadda, “Experimental modeling and control of a small wind PMSG turbine,” 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Ouarzazate, 2014, pp. 802-807. Disponible en: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7059880>.
- [79] Renata Catalina Siabato Benavides, “Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá”, Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión Medellín, Colombia, 2018. <http://bdigital.unal.edu.co/64252/3/1018424888.2018.pdf>.
- [80] CAMILO ESTEBAN CASALLAS BUITRAGO, “PORTAFOLIO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA COLOMBIA EN EL PERIODO (2017-2019)”, PROGRAMA DE ECONOMÍA ESPECIALIZACIÓN EN ECONOMÍA PARA INGENIEROS, ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERA JULIO GARAVITO, Colombia, 2019. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/1035/1/Casallas%20Buitrago%2C%20Camilo%20Esteban-2019.pdf>.

- [81] Aplicativo web, sistema ATLAS, INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES (IDEAM), 2020. Disponible en: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasVientos.html>.
- [82] De la Cruz Buelvas, Jhonatan, Valencia Ochoa, Guillermo, & Vanegas Chamorro, Marley, “Estudio estadístico de la velocidad y la dirección del viento en los departamentos de Atlántico y Bolívar en Colombia”, Facultad de Ingeniería. Universidad del Atlántico, Ingeniare. Revista chilena de ingeniería, 26(2), 319-328, Barranquilla, Colombia, 2018. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052018000200319#B12.
- [83] “La portuguesa EDP cuenta detalles de los dos parques eólicos que construye en La Guajira”, Dinero, 2020. Disponible en: <https://www.dinero.com/empresas/articulo/energia-asi-van-los-dos-parques-eolicos-que-se-construyen-en-la-guajira/281002>.
- [84] “AES Colombia compra el parque eólico más grande de la Nación”, Portafolio, 2019. Disponible en: <https://www.portafolio.co/negocios/aes-colombia-compra-el-parque-eolico-mas-grande-de-la-nacion-526886>.
- [85] B. Guerrero, F. Vélez, D. Morales, “Energía eólica y territorio: sistemas de información geográfica y métodos de decisión multicriterio en La Guajira (Colombia)”, Ambiente y Desarrollo Vol 23, Antioquia, Colombia, 2019 Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339220622_Energia_eolica_y_territorio_sistemas_de_informacion_geografica_y_metodos_de_decision_multicriterio_en_La_Guajira_Colombia.

18 ANEXOS

18.1 Anexo 1. Modelos de turbinas.

XANT M-24	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1643-xant-xant-m-24
Aeolos-H	http://www.neicjapan.com/smallwindmill/Aeolos-H%20100kW%20Brochure.pdf
AVATAR-V	https://avantgarde.energy/product/avatar-5kw/avatar-5kw/
Hummer H13.2	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1687-hummer-h13.2-30kw
Aeolos-H	http://www.neicjapan.com/smallwindmill/Aeolos-H%20100kW%20Brochure.pdf
Aeolos-V	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1851-aeolos-aeolos-v-1kw
Aeritalia AIT 03	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1866-aeritalia-ait-03
AIRCON 10 S	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/157-aircon-10-s
Anelion SW 3.5 GT	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/950-anelion-sw-3.5-gt
Hummer H6.4	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1690-hummer-h6.4-5kw
XANT M-24	https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1643-xant-xant-m-24
Aeolos-H	http://www.neicjapan.com/smallwindmill/Aeolos-H%20100kW%20Brochure.pdf

18.2 Anexo 2. Datasheet completo del generador de 10KW.

**UNIVERSAL INTERNATIONAL TRADE
CO.,LTD(UIT)**

Seller: UIT
 Contact: Timmy Lee Mail: sales@uintltrade.com
 Mobile/Whatsapp/Wechat/Line: +86-13356853586
 www.uintltrade.com
 Client: Juan Ramos
 Contact: Juan Ramos

**3 PHASE AC SYNCHRONOUS PERMANENT MAGNET
GENERATOR DATA SHEET**

EQUIPMENT TECHNICAL PARAMETERS		
Model	UITG-10K200	UITG-10K300
Rated output power	10 kW	10 kW
Rated rotating speed	200 rpm	300 rpm
Rated output 3 phase voltage	300 VAC	300 VAC
Rated current	19.2 A	19.2 A
Rated frequency	26.7 Hz	50 Hz
Poles	16	20
Start torque	7.2 N.M	4.8 N.M
Rated torque	478 N.M	318 N.M
Efficiency at rated rotating speed	>96%	>96%
Winding type	Y	Y
Temperature rise	90℃	90℃
Magnet withstand max temperature	130℃	130℃
Wire withstand max temperature	180℃	180℃
Insulating resistance	100Mohm Min(500Vdc)	
Protection degree	IP54	IP54
Insulation grade	H	H
Torque constant	24.022	16.051
Inertia	0.3655KGM²	0.2308KGM²
Rotor type	salient	salient
Stator phase resistance	1.125Ω	0.926Ω
Ld	24.89mH	11.55mH
Lq	36.89mH	21.7mH
EQUIPMENT DESCRIPTION		
Generator shell material	Cast iron(standard)	
Winding material	100% Copper	100% Copper
Shaft material	Steel	Steel

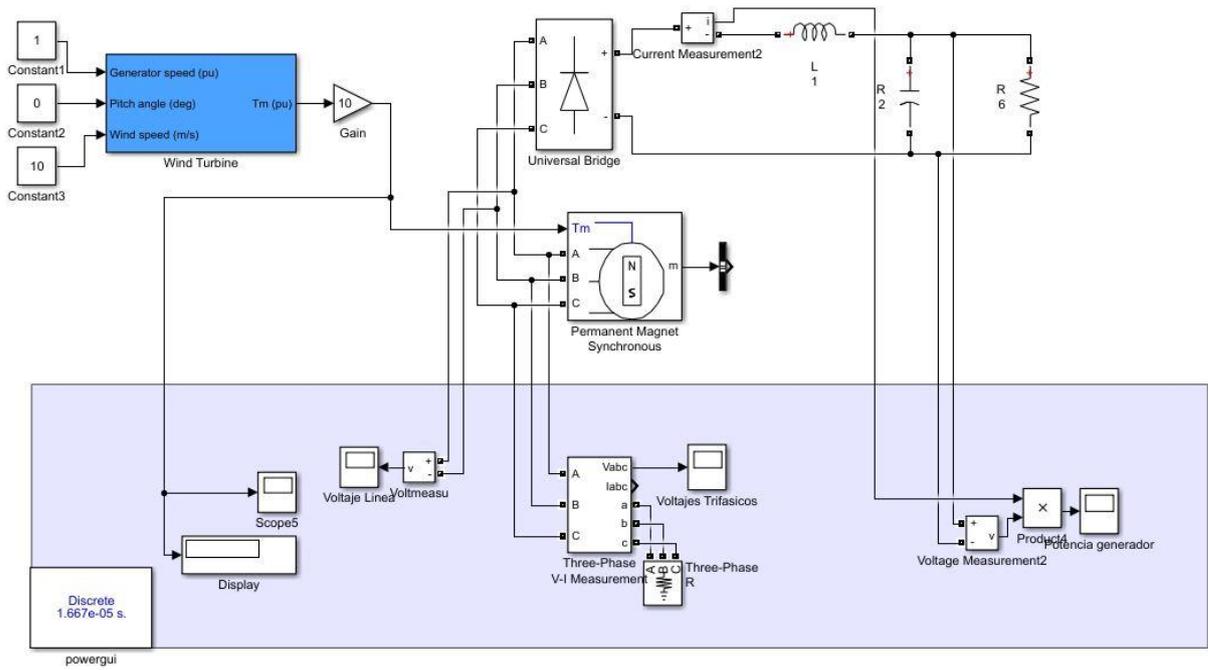
18.3 Anexo 3. Código Script para gráfica y filtrado resultados.

```
Prom_grafica_new_way.m x +
1
2 -   clc
3
4   %% (Estado estable 10m/s)_Con Filtro
5 -   Y=movmean(MPPT_10ms.signals.values,100);
6 -   t=MPPT_10ms.time;
7
8   %% Grafica
9 -   plot(t,Y,'LineWidth',1.4)
10
11  %% Config
12 -  xlabel('t')
13 -  ylabel('P(t)')
14 -  title('Potencia extraida del generador')
15 -  legend('Con MPPT','Sin MPPT','Location','northwest')
16 -  axis([1.65,2,-10,12000])
17 -  xtickformat('%gs')
18 -  ytickformat('%gW')
19 -  grid on
20
```

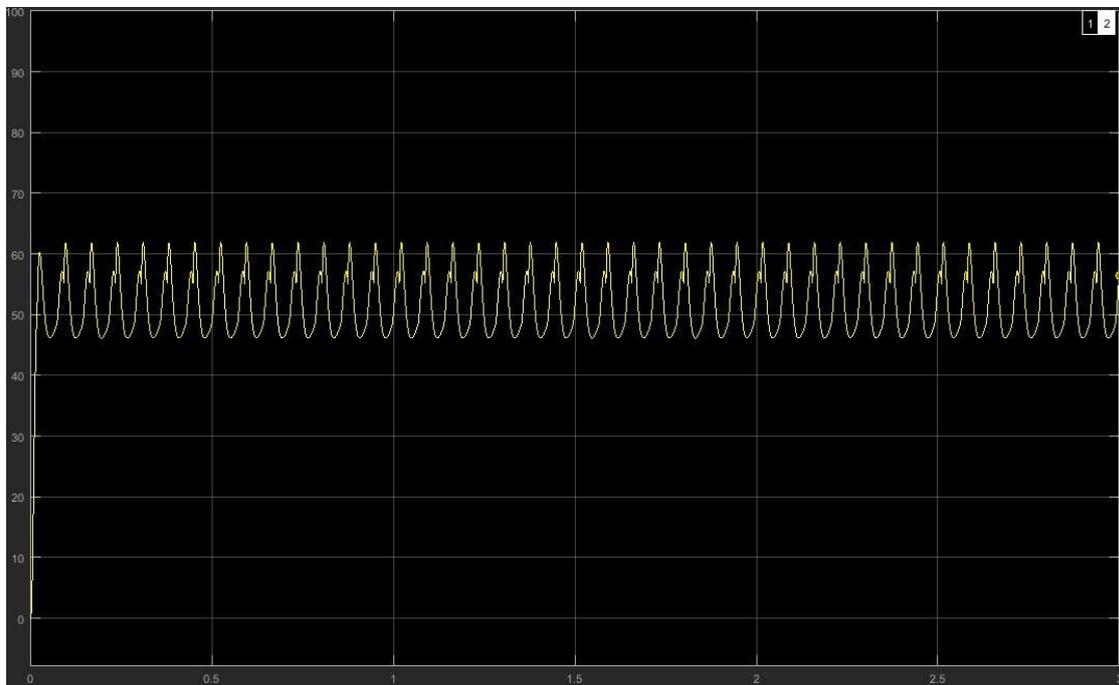
18.4 Anexo 4. Código algoritmo P&O implementado.

```
MPPT Perturb & Observe Block/ Perturb & Observe Block x +
1 function Duty = fcn(v,i)
2
3   %%%inicializar%%
4   persistent p1;           %potencia anterior, al inicio es cero
5   persistent D;           %duty cycle
6   persistent dD;          %paso fijo del aumento de duty cycle
7   persistent.mvp;         %minima variacion considerable de potencia.
8   persistent v1;          %voltaje anterior, al inicio es cero
9   if isempty(p1) p1=0; end
10  if isempty(D) D=0.1; end
11  if isempty(dD) dD=0.02; end
12  if isempty.mvp).mvp=100; end
13  if isempty(v1) v1=0; end
14
15  p=v*i;                   %medida de potencia actual
16  dp=p-p1;                 %variacion de la potencia
17  dv=v-v1;                 %variacion de la voltaje
18
19
20  if abs(dp)>.mvp           %condicion para accion de control
21
22      if dp>0               %si la potencia aumento
23          if dv>0
24              D=D-dD;
25          end
26          if dv<0
27              D=D+dD;
28          end
29      end
30      if dp<0               %si la potencia disminuyo
31          if dv<0
32              D=D-dD;
33          end
34          if dv>0
35              D=D+dD;
36          end
37      end
38
39  else                       %no se requiere accion de control.
40      D=D;
41  end
42
43  %Saturar D entre 1 y 0
44  if D>1
45      D=1;
46  end
47  if D<0
48      D=0;
49  end
50
51  %Actualizar valores.
52  p1=p;
53  v1=v;
54  Duty=D;
```

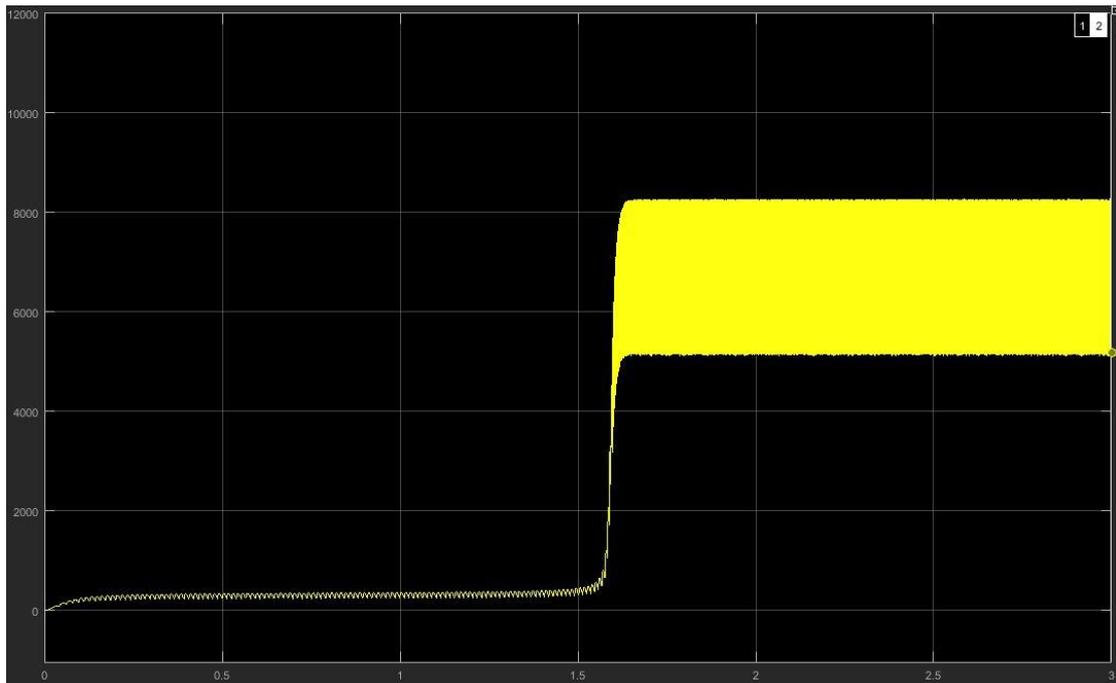
18.5 Anexo 5. Sistema sin MPPT.



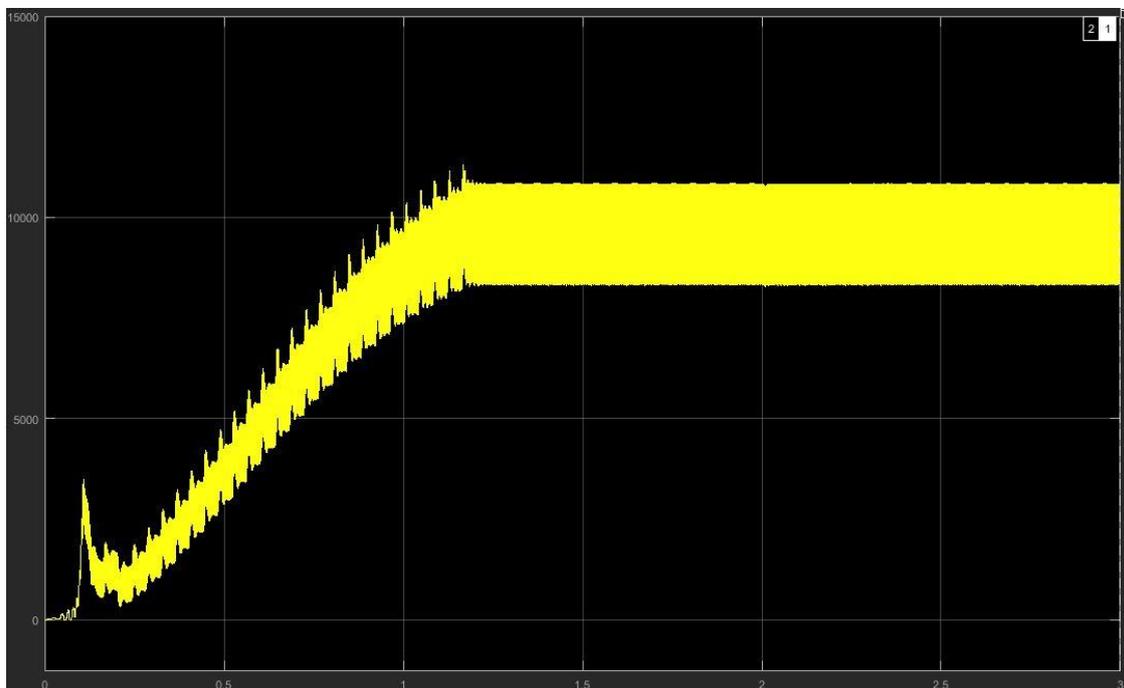
Anexo 6. Simulación sin MPPT a 10m/s carga 300Vrms.



18.6 Anexo 7. Simulación sin MPPT a 10m/s con carga 764Vrms.



18.7 Anexo 8. Simulación con MPPT a 10m/s.



18.8 Anexo 9. Simulación con MPPT a cambio de velocidad (10m/s,7m/s,9m/s).

