

Planteamiento del sistema de conexión, control y conversión para cuatro posibles sistemas de generación eléctrica DC alternativos, a ser utilizado óptimamente en las micro-turbinas eólicas de eje vertical que serían implementadas en la Fundación Universitaria Los Libertadores

Nicolás Felipe León Rodríguez

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS
BOGOTÁ
2019

Planteamiento del sistema de conexión, control y conversión para cuatro posibles sistemas de generación eléctrica DC alternativos, a ser utilizado óptimamente en las micro-turbinas eólicas de eje vertical que serían implementadas en la Fundación Universitaria Los Libertadores

Nicolás Felipe León Rodríguez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Director

Ing. Jaime Ramírez Artunduaga

Msc

Codirector

Ing. Luis Alejandro Caicedo Villalobos

Msc

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS BÁSICAS
BOGOTÁ
2019

NOTAS DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente del jurado

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá D. C., Mayo de 2.019

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer en primer lugar a Dios por haberme permitido realizar este Trabajo de Grado y culminar exitosamente el mismo.

También agradezco a mis Padres por el apoyo incondicional, a mis amigos y cercanos por la ayuda prestada durante el proceso de desarrollo de este Trabajo. De igual forma le quiero expresar mi gratitud al Ingeniero Jaime Ramírez Artunduaga y al Ingeniero Luis Alejandro Caicedo Villalobos, quienes han sido una valiosa guía a lo largo de este proceso, porque me enseñaron, orientaron, apoyaron, ayudaron y alentaron siempre mi proceso de aprendizaje. Por otra parte quiero agradecer el apoyo, ayuda y guía que me brindaron los Ingenieros Juan Eduardo Rolón Rios y John Jairo Vaca Rios.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. ESTADO DEL ARTE	15
1.1. Documentación	15
1.2. Normatividad	17
1.3. Antecedentes	17
1.3.1. “Análisis aerodinámico de una turbina de eje vertical para la implementación en la Fundación Universitaria Los Libertadores”	17
1.3.2. “Installing a wind turbine to help power my home!”	18
1.3.3. “Implementación de un programa de desarrollo e investigación de energías renovables en el departamento del Chocó”	18
1.3.4. “How to install a home wind turbine”	18
1.3.5. “Sistema de regulación y control de carga para aerogenerador de baja potencia”	19
1.3.6. “Development of Micro Wind Turbine for Rural Livelihood Improvement”	19
1.3.7. “Sensorless Control of PM Synchronous Generators for Micro Wind Turbines”	20
2. PROBLEMA	21
3. OBJETIVOS	22
3.1. Objetivo general	22
3.2. Objetivos específicos	22
4. MARCO TEÓRICO	24
4.1. Energías renovables	24
4.1.1. Fuentes de transformación de energía en Colombia	26
4.2. Energía eólica	28
4.3. Sistemas de generación de energía eólica	30

4.3.1. Turbinas eólicas	30
4.3.2. Funcionamiento	32
4.3.3. Tipos de turbinas eólicas	35
4.4. Máquinas eléctricas rotativas, Generador	37
4.4.1. Máquinas eléctricas asíncronas	37
4.4.2. Máquinas eléctricas síncronas	39
4.5. Componentes eléctricos	41
4.5.1. Convertidores electrónicos de potencia	41
4.5.2. Puente rectificador trifásico	43
4.5.3. DC - DC choppers	45
4.5.4. Baterías : plomo ácido	46
4.6. Sistemas de control	50
4.6.1. Control para generadores síncronos	50
4.7. Normatividad y reglamentación	53
4.7.1. Para aerogeneradores pequeños	53
4.7.2. Para los dispositivos electrónicos que forman parte del sistema eólico . .	54
4.7.3. Para las instalaciones y conexiones eléctricas	56
5. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS GENERADORES	57
5.1. Características del viento en las facilidades de la Fundación Universitaria Los Libertadores	57
5.2. Definición de los criterios de selección	61
6. PROCESO DE SELECCIÓN DE LOS GENERADORES	62
6.1. Potencia	64
6.2. Normatividad	64
6.3. Torque	66
6.4. Eficiencia	71
6.5. Corriente	72
6.6. RPM (Revoluciones Por Minuto)	74
6.7. Sistema de control	76
6.8. Aislamiento (temperatura)	77
6.9. Protección (contra ingreso de partículas sólidas y agua)	78

6.10. Relación potencia / peso	79
6.11. Ponderación	81
7. CRITERIOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONEXIÓN, CONTROL Y CONVERSIÓN	83
7.1. Criterios de diseño para el sistema de conexión	83
7.2. Criterios de diseño para el sistema de control	83
7.3. Criterios de diseño para el sistema de conversión	84
8. CONFIGURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA	85
8.1. Sistema con generador DMKE, D5BLD150	85
8.1.1. Acoplador	86
8.1.2. Generador	87
8.2. Sistema con generador EzPower, PMG165	89
8.2.1. Acoplador	90
8.2.2. Generador	90
8.2.3. DC-DC	92
8.3. Sistema con generador TGET, TGET165-0.15KW-500R	93
8.3.1. Acoplador	93
8.3.2. Generador	94
8.3.3. DC-DC	95
8.4. Sistema con generador LAISA, LS-100SM	96
8.4.1. Acoplador	97
8.4.2. Generador	98
8.4.3. Rectificador	100
8.5. Almacenamiento de energía eléctrica	101
8.5.1. Banco de baterías	102
8.5.2. Controlador de carga	104
8.6. Salida (outlet)	105
8.7. Sistema a tierra	106
9. CONCLUSIONES	107

10.RECOMENDACIONES 108

11.REFERENCIAS 109

LISTA DE FIGURAS

	pág.
1. Consumo primario de energía en el mundo	26
2. Fuentes de generación de energía eléctrica en Colombia para el año 2010 . . .	27
3. Proyección energética según escenario más promisorio para la energía eólica .	28
4. Capacidad de potencia instalada acumulada globalmente desde 1996 hasta 2012	31
5. Evolución del tamaño de la turbina eólica y la capacidad de poder del sistema visto desde 1980 hasta 2018	31
6. Curva del coeficiente de potencia / tasa de velocidad en la punta, C_p/λ . . .	34
7. Tipos de turbinas más comunes	36
8. Diagrama de un máquina de inducción trifásica con rotor bobinado	38
9. Diagrama de un generador síncrono trifásico (Kundur, 1994)	40
10. Diagrama de una máquina síncrona trifásica con excitación separada	40
11. Conversión de energía eléctrica	42
12. Esquema puente rectificador trifásico con entrada en estrella	43
13. Formas de onda y tiempos de conducción de los diodos	44
14. DC/DC chopper con elemento de almacenamiento. a) Conversor de flanco de bajada (buck) ; b) Conversor de flanco de subida (boost)	46
15. Voltaje de celda U sobre grado de carga p	48
16. Características de una batería convencional (a) Capacidad disponible; (b) Vol- taje de la batería durante la descarga	48
17. Circuito equivalente de una batería	49
18. Control en generadores sincrónicos	51
19. Diagrama de sistema de control de excitación	51
20. Sistema de gobernador de velocidad	53
21. Características de un día de viento común (aproximadamente)	59
22. Velocidades de viento registradas en los meses de Enero y Febrero de 2019 .	60
23. Coeficiente de potencia promedio vs tasa de velocidad en la punta para un paso fijo, NACA 634-221, a 3 velocidades diferentes de corriente libre	66
24. Curva ponderación del torque	70

25. Curva de puntaje para la eficiencia	72
26. Curva ponderación de la corriente	73
27. Curva ponderación de las revoluciones por minuto	75
28. Clasificación IP (Ingress Protection)	79
29. Diagrama de bloques del sistema con el generador D5BLD150, del fabricante DMKE	86
30. Medidas del generador D5BLD150 (unidades en mm)	87
31. Diagrama de bloque para el generador, caso generador D5BLD150	88
32. Sistema de control para el caso del generador D5BLD150	88
33. Diagrama de bloques para el sistema con generador PMG165 y TGET165- 0.15KW-500R	89
34. Diagrama de bloques para el generador, caso generadores PMG165 y TGET165- 0.15KW-500R	91
35. Sistema de control para el caso del generador PMG165 y TGET165-0.15KW- 500R	91
36. Medidas generador del fabricante TGET (milímetros)	94
37. Diagrama de bloques de conexión para el generador LS-100SM	97
38. Medidas generador del fabricante LAISA (milímetros)	98
39. Diagrama de bloques para la conexión del generador LS-100SM	99
40. Sistema de control contra sobre corrientes para el generador LS-100SM	99
41. Puente de diodos rectificador trifásico para el generador LS-100SM	100
42. Diagrama de bloques para el sistema de almacenamiento de energía	102
43. Dispositivo de control de carga para el subsistema de almacenamiento de ener- gía eléctrica	105

LISTA DE TABLAS

	pág.
1. Fuentes de energía renovable	25
2. Aplicaciones de diferentes categorías de turbinas eólicas	30
3. Tabla de características técnicas y funcionales de los generadores evaluados .	65
4. Ponderación del torque inicial	71
5. Ponderación de la eficiencia	72
6. Ponderación del corriente	74
7. Resultados del experimento para simular las RPM que supondrían cierta ve- locidad del viento	75
8. Ponderación de las RPM	76
9. Máxima/permissible temperatura de funcionamiento para diferentes materia- les aislantes	77
10. Relación potencia-peso de cada generador	80
11. Ponderación relación potencia-peso	80
12. Tabla de ponderación de parámetros	82
13. Factor de pérdida por temperatura en baterías	104

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Grado consistió en el desarrollo de la propuesta técnica para plantear el sistema de conexión, control y conversión para cuatro posibles sistemas de generación eléctrica DC alternativos, a ser utilizado óptimamente en la micro-turbina eólica de eje vertical que será implementada en la Fundación Universitaria los Libertadores. Así mismo, la selección de cuatro alternativas de generadores eléctricos y el diseño sus respectivos sistemas eléctricos para que se elija aquel que hará parte del sistema eólico y cuyo beneficiario potencial sería la Fundación Universitaria Los Libertadores (inicialmente), teniendo la perspectiva de poder ser ofrecidos a otros usuarios. El sistema de generación de energía DC contará con 10 microturbinas eólicas (preliminariamente) independientes, cuya energía generada por cada una se integra para lograr un potencial eléctrico único que alimenta la carga preestablecida.

La metodología empleada en el proceso de este Trabajo de Grado, se fundamentó en la realización de la consulta analítica de la documentación y experiencias existentes de los sistemas de conexión, control y conversión, así como con respecto a las alternativas actuales en el mercado mundial de los generadores estudiados en este trabajo, cuya información fue sustraída de los catálogos correspondientes. De igual manera estudios y proyectos relacionados con esta temática y ejecutados de forma satisfactoria, a los cuales se pudo tener acceso y se encuentran relacionados en la parte bibliográfica de este trabajo.

Con el fin de tener un marco referencial que sirviera de contexto para el objetivo de este Trabajo de Grado, en primer lugar se formuló el problema a resolver, y con base en él se plantearon los criterios que sirvieron para poder determinar las alternativas de solución a la generación de energía mediante sistemas eólicos.

Luego de que se identificara la necesidad y condiciones ambientales del proyecto se continuó con la construcción de un marco referencial apropiado que incluyó un preambulo mundial y específico de los tipos de generación de energía eléctrica, enfatizando en la generación de electricidad a través de sistemas denominados turbinas eólicas, los cuales también se abordaron conceptualmente para identificar una metodología óptima de di-

seño. De la misma manera, se consultaron los tipos y el funcionamiento de las máquinas eléctricas que más se ajustaron al tipo de movimiento mecánico y transformación de energía del sistema eólico. Dentro de la información consultada, también se documentaron los conceptos teóricos y características de operación de elementos electrónicos que hicieron parte de los diseños finales del sistema, así como diversos parámetros que fundamentaron las bases para los criterios de selección de los generadores eléctricos que se tuvieron en cuenta.

A partir de la base teórica que se mencionó anteriormente, se desarrolló la respectiva selección y ponderación de criterios, entre los que se tuvieron en cuenta; la potencia nominal, parámetro base dictado por el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”; la normatividad que certificaba el uso seguro del generador; y parámetros como la eficiencia de transformación de energía que indicaba el fabricante, el torque de arranque, la corriente nominal de salida, las revoluciones por minuto máximas de la máquina, el factor peso - potencia y, sí poseía, el sistema de control contra sobrevelocidades, el aislamiento a temperaturas elevadas y la protección contra ingreso de partículas sólidas y agua.

Seleccionados los 4 generadores con mejor ponderación, se siguió con la definición de los criterios de diseño para los sistemas de conexión, control y conversión que conformaron el sistema de generación de energía eólica, además de los diferentes dispositivos electrónicos que reflejaron el funcionamiento más óptimo para los fines establecidos en los objetivos de este Trabajo de Grado.

Para la selección y diseño de los diferentes sistemas y configuraciones que se presentaron en este documento, no se tuvo en cuenta el costo o valor económico de adquisición que presentaba cada dispositivo involucrado, esto debido a que en el alcance y los lineamientos que dictó el grupo de investigación a cargo del proyecto en el que se enmarca este Trabajo de Grado no se pretendió contemplar el factor económico.

Establecido el sistema que presentó mejores cualidades técnicas y operativas, se realizó una descripción detallada de las recomendaciones, configuración y funcionamiento del mismo.

Finalmente se presentaron las conclusiones y resultados obtenidos en el desarrollo técnico y teórico de este manual de diseño para el componente eléctrico de la micro-turbina eólica de eje vertical objeto del proyecto de investigación “Estudio de viabilidad para la implementación de un sistema de micro turbinas eólicas de eje vertical para la Fundación Universitaria Los Libertadores”.

Además de la documentación lograda y utilizada para este Trabajo de Grado, se contó con el apoyo del grupo de investigación institucional “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”, así como de asesorías solicitadas y prestadas por docentes de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas que contaban con vivencias relacionadas con la temática objeto de este Trabajo.

1. ESTADO DEL ARTE

El estudio para la definición del sistema de conexión, control y conversión para los posibles sistemas de generación eléctrica DC alternativos, estuvo fundamentado en los aspectos conceptuales, en las especificaciones técnicas y en el análisis de la eficiencia de los mismos, temas tratados en la documentación consultada, la cual se encuentra en los referentes teóricos relacionados en la parte de referencias bibliográficas de este Trabajo de Grado.

Los tópicos que se consideraron esenciales para fundamentar el estudio de este trabajo, están referenciados como sigue:

1.1. DOCUMENTACIÓN

En la información consultada en aquellos documentos que referencia la temática de los sistemas de conexión, control y conversión para sistemas de generación de energía eólica, como lo fueron (entre otros):

- “Wind Energy Systems for Electric Power Generation”, del autor, Prof. Dr. Manfred Stiebler, en donde se exponen los diferentes factores externos e internos, características de funcionamiento, componentes y demás temas relacionados con los sistemas de generación de energía eólica.
- “Power Electronics For The Next Generation Wind Turbine System”, editado por, Joachim Peinke, en el que se encuentra un desarrollo temático teniendo en cuenta diversos tópicos que son de importancia en sistemas de generación de energía eléctrica a través de sistemas eólicos a gran escala (más de 10kW).
- “Wind Energy Generation, Modelling And Control”, de los autores, Olimpo Anaya-Lara, Nick Jenkins, Janaka Ekanayake, Phill Cartwright y Mike Hughes, quienes desarrollaron un texto que aborda diferentes elementos que conforman el componente eléctrico de una turbina eólica para la generación de energía eléctrica.

- “Experimental And Numerical Investigation Of A Three-Dimensional Vertical-Axis Wind Turbine With Variable-Pitch”, artículo hecho por, M. Elkhoury, T. Kiwata y E. Aoun, en el que se describen los resultados de comportamiento físico mecánico y aerodinámico obtenidos a partir de la experimentación realizada sobre una turbina eólica de eje vertical.
- “Sensorless Control Of PM Synchronous Generators For Micro Wind Turbines”, artículo hecho por, Nguyen Thanh Hai, Suk-Ho Jang, Hong-Geuk Park, and Dong-Choon Lee, en donde se desarrolló y evaluó a través de simulaciones, diferentes tipos de control sin sensor, aplicados a generadores de imán permanente.

En la información que ofrecen los correspondientes catálogos de los respectivos proveedores a nivel mundial de los generadores de imán permanente, teniendo presente que cumplieran con el requerimiento operativo y funcional que demandará la propuesta “Planteamiento del sistema de conexión, control y conversión para cuatro posibles sistemas de generación eléctrica DC alternativos, a ser utilizado óptimamente en las micro-turbinas eólicas de eje vertical que serían implementadas en la Fundación Universitaria Los Libertadores”. Este requerimiento fue esencialmente:

- La potencia nominal de los generadores objetos de este trabajo debe estar comprendida entre 20W y 150W.

Este requerimiento fue definido por el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones de impacto social” quién esta a cargo del proyecto de investigación “Estudio de viabilidad para la implementación de un sistema de micro turbinas eólicas de eje vertical para la Fundación Universitaria Los Libertadores”, en el cual el presente Trabajo de Grado se enmarca.

1.2. NORMATIVIDAD

En el aspecto normativo, se tuvo en cuenta la normatividad nacional e internacional para los componentes eléctricos que constituyen los diferentes sistemas presentados en este Trabajo de Grado.

Para la implementación del generador eléctrico, se consideró principalmente el cumplimiento de aquellas normas establecidas por los organismos internacionales, las cuales avalarían su uso seguro. Entre estas normas se consideró la norma de estándar de calidad europea para dispositivos eléctricos de baja tensión “CE” la cual implicaría un grado de seguridad mínimo para el uso de este tipo de máquinas eléctricas; además se tuvieron en cuenta otras certificaciones internacionales como RoHs, LVD y EMC. De la misma forma siguiendo los lineamientos del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y las normas técnicas Colombianas NTC5725 y NTC2805, cuya información y descripción, de cada una de la mencionadas anteriormente, se encuentra en el Marco Teórico de este documento.

1.3. ANTECEDENTES

Así mismo se tuvieron en cuenta aquellos estudios y proyectos que han sido propuestos, desarrollados y ejecutados con anterioridad al presente estudio y que presentan características similares, de los cuales se pudieron disponer. A continuación se relacionan estos trabajos, indicando su aspecto fundamental en el cual consistieron.

1.3.1. “Análisis aerodinámico de una turbina de eje vertical para la implementación en la Fundación Universitaria Los Libertadores”

Fue un Trabajo de Grado desarrollado por Nicole Tatiana Aguilar Salinas, Julian Fernando Flórez Guzmán y Jeimy Tatiana Rodríguez Avellaneda, estudiantes del programa

de Ingeniería aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores y que sirve como complemento de este Trabajo de Grado. El Trabajo de Grado consistió en la realización del análisis aerodinámico de una microturbina de eje vertical con el propósito de determinar el modelo de turbulencia más adecuado para el estudio de factibilidad. Se identificaron, a través de software de simulación, las características del flujo de aire que se presentaron con el uso del dispositivo.

Como resultados se obtuvo que, el modelo que mejor describe el comportamiento turbulento del flujo alrededor de la turbina es el modelo $k - \omega$ SST, también que, este modelo es el que mejor capta cambios en un campo de velocidades y que las velocidades de flujo estudiadas determinan que sería posible el movimiento en el modelo presentado.

1.3.2. “Installing a wind turbine to help power my home!”

Fue un proyecto desarrollado en Trinidad y Tobago por el usuario de instructables.com (portal web) “Mjtrinihobby” con el propósito de ser utilizado para el suministro de energía en su propia residencia. Este proyecto fue implementado en septiembre de 2017 y la potencia suministrada, según lo que se ve en la página web, es de 244Wh pico.

1.3.3. “Implementación de un programa de desarrollo e investigación de energías renovables en el departamento del Chocó”

El desarrollo de este proyecto estuvo a cargo de la Universidad Tecnológica del Chocó el cual se implementó en el municipio del Medio San Juan (Andagoya) en el departamento de Chocó, generando 5.5kWh (aerogenerador). La implementación de este proyecto se realizó con éxito y empezó a funcionar en el año 2017.

1.3.4. “How to install a home wind turbine”

Fue un proyecto llevado a cabo en el año 2015, en el estado de Texas (EEUU), en donde

se documentó todo en video con el fin de servir como tutorial para los usuarios de la página web Thisoldhouse.com. Esta web es una marca Estado Unidense para mejoras en el hogar la cual cuenta con un show televisivo. En el episodio que se tomó en contexto, se documenta la instalación de una turbina eólica de 1.5kW de potencia nominal, con medidas de 9 pies de diametro (visto desde arriba), el polo con 3 pies de profundidad y 3 columnas de 20 pies en profundidad para soportar la estructura y finalmente las aspas con medida de 10 pies. En cuanto a la parte eléctrica, el generador es trifásico y su salida va conectada a un rectificador que convierte la corriente trifásica AC a corriente DC con el fin de alimentar la fuente de poder (baterías), para luego pasar por un inversor que convierte la corriente a alterna para ser suministrada en la red eléctrica de la casa y el granero.

1.3.5. “Sistema de regulación y control de carga para aerogenerador de baja potencia”

Fue un artículo de investigación llevado a cabo por estudiantes miembros del grupo de investigación ARMOS (COL0029956) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en el año 2017, el cual consistió en el diseño, construcción y montaje de un módulo de regulación y control de carga para un aerogenerador de baja potencia ya instalado en las facilidades de la facultad tecnológica. El artículo referenciado lleva a cabo toda la metodología de diseño electrónico para los controladores y reguladores que requiere el sistema, el cual tiene como potencia nominal alrededor de 120W.

1.3.6. “Development of micro wind turbine for rural livelihood improvement”

Fue un artículo de investigación publicado en la IEEE y llevado a cabo por 5 estudiantes y un asistente de profesor en el centro de energía rural en la ciudad de Dindigul, India. Su trabajo consistió en el desarrollo del método para construir una micro turbina eólica con capacidad de potencia de 100W para alimentación energética en zona rural. El diseño de la turbina se basó en los modelos de Hugh Piggots con valor máximo de

velocidad de viento de 12 m/s y rango de acción regular de 3 m/s a 7 m/s. El tipo de generador usado fue de imán permanente el cual se diseñó para cargar un banco de baterías de 12v.

1.3.7. “Sensorless control of pm synchronous generators for micro wind turbines”

Este artículo de investigación fue llevado a cabo por miembros del Departamento de Ingeniería eléctrica de la Universidad de Yeungnam, China. El documento consistió en demostrar que el control de velocidad y posición de una microturbina puede ser tan bueno y se puede desarrollar sin utilizar sensores. Las razones para desarrollar este tipo de control fueron que un control con sensores elevaba el costo y la complejidad de una micro turbina eólica lo cual es contraproducente para ciertas comunidades. El control en cuestión se diseñó con un convertor PWM del tipo back-to-back, el cual consiste en un convertor two leg three phase PWM para el control del generador y un PWM rectificador de medio ciclo para la conexión a la red. Los resultados se comprobaron a través del simulador PSIM.

También fortaleció el desarrollo de este trabajo el análisis bibliográfico que al respecto fue consultado y analizado y cuya referencia se indica en la parte bibliográfica de este documento.

2. PROBLEMA

La facultad de ingeniería de la Fundación Universitaria los Libertadores se ha interesado en que los trabajos de investigación, incluyendo los trabajos de grado, representen una solución práctica a situaciones problemáticas existentes y que permitan ofrecer oportunidades de estudios de investigación tanto a los docentes como a los estudiantes de la facultad.

El grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” identificó la necesidad de desarrollar un estudio de factibilidad, en el que se enmarque un desarrollo técnico y teórico del componente eléctrico de un sistema de generación de energía eólica para la instalación de un grupo de micro-turbinas eólicas de eje vertical cuyo proyecto contemplado en este será implementado en las instalaciones de la Universidad. Este proyecto servirá como prototipo solución a la necesidad de suministro eléctrico a través de sistemas alternativos como es el caso de la energía eólica.

Por lo anterior, el problema a ser solucionado con este Trabajo de Grado fué, el desarrollo técnico y teórico del sistema de conexión, control y conversión para cuatro posibles sistemas de generación eléctrica alternativa, a utilizar se óptimamente en las micro-turbinas eólicas de eje vertical, que suplieran la carga definida, la cual es un grupo de baterías con capacidad de alrededor de 200Ah aptas de almacenar suficiente energía para ser suministrada en ocasiones de viento desfavorable.

La definición de esta carga consistió en un conjunto de baterías que suplen, en primera instancia, tomas eléctricas de tipo USB para carga de teléfonos celulares o dispositivos similares.

Esta carga se justificó principalmente en los siguientes puntos:

- El valor agregado de hacer un proyecto llamativo que generaría auto publicidad al claustro soportado en que es interesante auto generar energía eléctrica para

suplir el consumo que se genera constantemente al descargar se las baterías de los dispositivos móviles como teléfonos celulares, tabletas, entre otros, que utilizan diariamente los miembros y visitantes de la fundación Universitaria Los Libertadores.

- La definición de una carga que se ajusta a las capacidades de generación de energía establecida por el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” quien está a cargo del Proyecto de Investigación al que pertenece este Trabajo de Grado, en 150W cada sistema de micro-turbina eólica.
- La ventaja de tener energía almacenada en el conjunto de baterías para su consumo cuando las condiciones de viento no favorezcan la generación de energía eléctrica.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar desde el punto de vista técnico la propuesta del planteamiento del sistema de conexión, control y conversión para cuatro posibles sistemas de generación eléctrica DC alternativos, a ser utilizado óptimamente en la micro-turbina eólica de eje vertical que será implementada en la Fundación Universitaria los Libertadores.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Consultar y construir un marco teórico constituido de la información necesaria para tener en cuenta en el desarrollo del diseño del componente eléctrico y electrónico del sistema de generación de energía eólica.

- Llevar a cabo el debido proceso de identificación y caracterización de las condiciones de flujo de viento presentes en las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores.
- Realizar la búsqueda respectiva de los generadores acordes con los lineamientos establecidos por el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” listados tanto en catálogos web como en tiendas físicas a las que se pudiera acudir para obtener su respectiva información técnica y funcional.
- Desarrollar el debido proceso de definición de los parámetros de selección de los generadores identificados como posibles candidatos finales y seguido a esto, hacer la respectiva selección de los 4 candidatos en mejores condiciones técnicas y funcionales.
- Diseñar según unos parámetros ya establecidos, el sistema eólico que más se adapte a cada generador seleccionado teniendo en cuenta realizar la descripción y presentación del proceso de diseño y las características teóricas, técnicas y funcionales de cada etapa, así como de su funcionamiento en el sistema.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. ENERGÍAS RENOVABLES

Las fuentes de energía fósil en nuestro planeta son limitadas, y se sabe también que, la producción de gas, carbón y petróleo excederán su máximo en las próximas décadas. Al mismo tiempo que se ha venido incrementado la oposición política en contra de fomentar la explotación de energías provenientes de fuentes fósiles y de otras fuentes como la energía nuclear. En este escenario que nos encontramos, las energías renovables tendrán que ser nuestra principal fuente alternativa de energía en el futuro. Una de las principales diferencias y ventajas entre las energías renovables y las energías fósiles es que las energías renovables producen mucho menos o nada de emisiones de dióxido de carbono y dióxido de azufre que en contexto general, contaminan deteriorando la calidad del aire y acelerando el efecto invernadero.

La mayor fuente de energías renovables es el sol y de la misma forma la tierra y la luna en menor escala. En la Tabla 1 se muestra un listado de las fuentes primarias, las formas de conversión naturales y los métodos de conversión técnica. Los más notables por su contribución a la demanda actual de energía son agua, viento, energía solar y biomasa y su principal conversión es la energía eléctrica.

Mientras que el poder proveniente del agua se ha utilizado en estaciones de generación de energía eléctrica y sistemas de almacenamiento por bombeo desde hace varias décadas, el uso de energía eléctrica proveniente de la conversión de la energía cinética generada por el viento en gran escala, la cual ha empezado apenas en la década de los 1980s. Respaldado por el desarrollo técnico intensivo, las unidades de generación de energía han aumentado en el rango de los MW, y la tasa de instalación y uso de granjas eólicas también se han incrementado.^[1]

Tabla 1: Fuentes de energía renovable

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

Fuente primaria	Medio	Conversión natural	Conversión técnica
Sol	Agua	-Evaporación -Presipitación -Derretimiento	-Hidroeléctricas
		Viento	-Conversión de energía eólica -Planta de energía de las olas
Tierra	Energía solar	-Flujo de aire atmosférico -Movimiento de las olas	-Planta de energía oceánica -Unidades de energía térmica, bombas de calor -Conversión heliotérmica, conversión fotovoltaica
		-Corrientes oceánicas -Calentamiento de la superficie y atmósfera terrestre -Radiación solar	-Plantas de co-generación
Luna	Biomasa	-Producción de biomasa	-Plantas de energía de la marea
	Gavitación de la discomposición isotópica	-Mareas de calor geotérmico	

El estudio sobre las fuentes de energía que se utilizaban en 2004 alrededor del mundo, para la generación de electricidad, se pudo ver que los combustibles fósiles en forma de carbón, gas natural y petróleo prevalecían con un 65 %, la energía nuclear con un 16 %, la energía hídrica con un 17 % y, finalmente, las energía renovables con apenas un 2 %. En la representación de la Figura 1 se puede apreciar la distribución de la generación mundial de electricidad en 2004. [1]

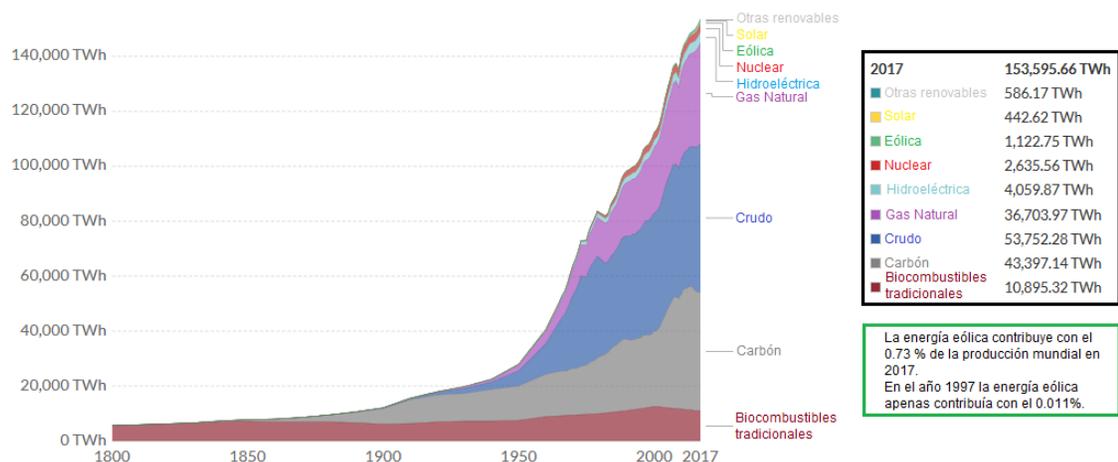


Figura 1: Consumo primario de energía en el mundo

[13] Ritchie H. y Roser M. *Energy Production & Changing Energy Sources*, recuperado de <https://ourworldindata.org/energy-production-and-changing-energy-sources>. Our World in Data, 2018.

4.1.1. Fuentes de transformación de energía en Colombia

Las cifras de operación y administración del mercado mayorista de energía en Colombia para el año 2010 presentaron que, la generación de energía eléctrica en Colombia fue de 56.887,6 GWh, 1,6 % por encima de la registrada en 2009 (55.965,6 GWh). Dicho incremento positivo se debió principalmente al crecimiento en la demanda de energía. En el 2010, la composición hidráulica – térmica de la generación total estuvo impactada por el fin de la temporada del fenómeno climático El Niño en el primer trimestre, enfatizado por carencia del flujo hídrico, y el transcurso de la temporada del fenómeno

La Niña en el segundo semestre, asociado con altos flujos hídricos. El resultado del impacto combinado de ambos fenómenos climáticos sobre los aportes hídricos al Sistema Interconectado Nacional, SIN, llevó a finalizar un año en condiciones hídricas promedio, con aportes totales anuales de 52.302,1 GWh equivalentes al 106,9% del promedio histórico. Fue así como la generación térmica participó en la generación del SIN hasta en un 53,3% (enero de 2010) en pleno desarrollo del fenómeno El Niño, mientras en el segundo semestre la participación bajó a promedios del 17% de la generación total. Al comparar la generación de energía eléctrica total de 2010 con el año 2009, se tiene que la generación térmica incrementó en un 7,6% mientras que la generación hidráulica decreció en un 1,6%. Para atender la demanda de energía eléctrica, 56.147,6 GWh, y de potencia, 9.100 MW, el SIN tenía una capacidad efectiva neta instalada al 31 de diciembre de 2010 de 13.289,5 MW, la cual se distribuía según lo que se aprecia en la Figura 2. [14]

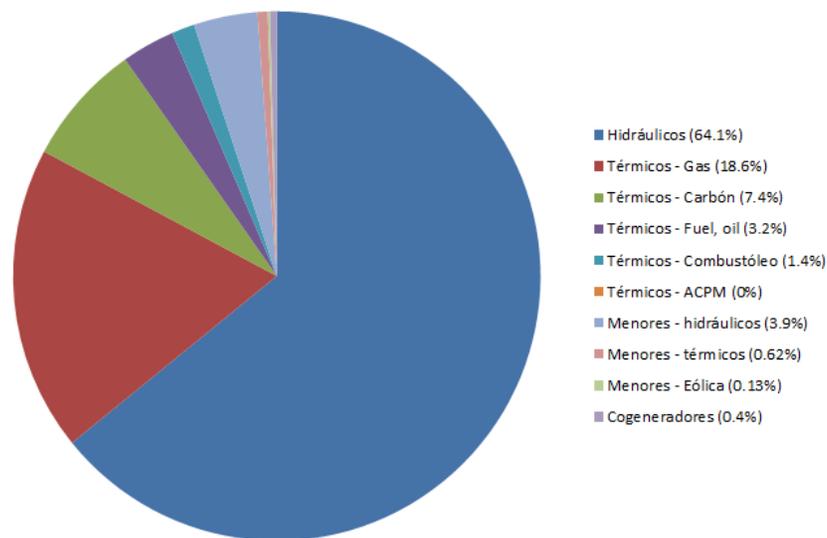


Figura 2: Fuentes de generación de energía eléctrica en Colombia para el año 2010

[14] Ministerio de Minas y Energía de Colombia *Sector energía eléctrica, recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23400/05-ENERGIA2010-2011.pdf>*. Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2011.

Las simulaciones de proyección que entregó el UPME (Unidad de Planeación Minero

Energética) en el año 2017, muestran un futuro promisorio para las energías provenientes de fuentes renovables y sobre todo con miras al devenir de la energía eólica en Colombia. En la Figura 3 se puede ver la proyección hasta el año 2031 en el mejor escenario que plantea el UPME. Dicho escenario se puede revisar más a fondo en el Plan de Expansión de Referencia, Generación - Transmisión, 2017-2031 que publicó el Ministerio de Minas y Energía en 2017. [16]

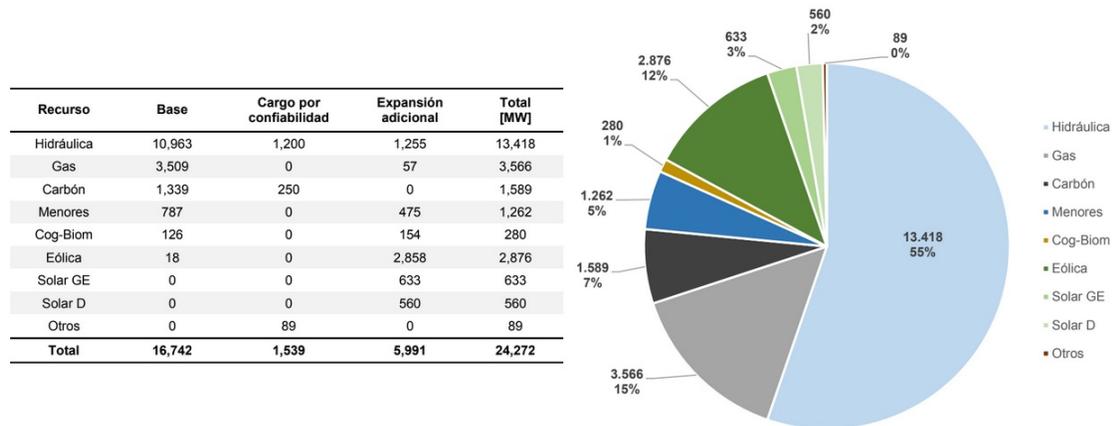


Figura 3: Proyección energética según escenario más promisorio para la energía eólica

[16] Unidad de Planeación Minero Energética *Plan de Expansión de Referencia, Generación - Transmisión, 2017 - 2031*, Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2017.

4.2. ENERGÍA EÓLICA

En los 15 últimos años, la energía eólica ha mostrado la tasa de crecimiento más alta comparada con cualquier otra forma de generación de electricidad proveniente de fuentes tanto renovables como no renovables. [2]

La energía eléctrica que se transforma a partir de la energía que lleva el flujo del aire, por lo general, es el resultado de la transformación de movimiento cinético en movimiento cinético rotativo que luego pasa a una máquina eléctrica que transforma aquella energía

cinética en energía eléctrica.

La forma de instalación de generación de energía eólica que ha tenido más auge en los últimos años ha sido la de las granjas eólicas tanto onshore (a una distancia mayor de 5Km de la costa marítima u oceánica) como offshore (a menos de 5Km de la costa marítima u oceánica o sobre el agua). Usualmente, los sitios de instalación de dichas granjas se seleccionan basados en información general de velocidad de vientos y condiciones naturales que inciden directamente en el proyecto. Las instalaciones del tipo offshore, particularmente las más grandes, generalmente toman lugar más de 5km desde la tierra para reducir el impacto medioambiental. Las ventajas de las instalaciones offshore incluyen reducir el impacto de la intrusión visual y acústica, así como, menor turbulencia del aire y mayor velocidad promedio del mismo.

Las desventajas que presentan este tipo de instalaciones en offshore son los costos más elevados de construcción y operación, de la misma forma que el costo de transporte de la energía a donde se requiere.

En general, las áreas con buena fuente de energía eólica se encuentran alejadas de centros poblados y nuevos circuitos de transmisión son desarrollados para conectar la granja eólica con la red eléctrica que se quiere alimentar. Por ejemplo, se estimaba que en Alemania , aproximadamente 1400km de línea adicionales de alta-tensión y extra-alta-tensión se requerirían en el transcurso de los próximos 10 años para conectar nuevas granjas eólicas. (Desutsche Energie-Agentur GmbH, 2005). En la Tabla 2 se ilustra la clasificación típica de turbinas eólicas según su aplicación.^[3]

Tabla 2: Aplicaciones de diferentes categorías de turbinas eólicas

[3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.

Pequeña ($\leq 10\text{kW}$)	Intermedia(10 - 500kW)	Grande (500kW-5MW)
- Casas (Conectado a la red)	- Energía para comunidades pequeñas	- Plantas de energía eólica
- Granjas	- Sistemas Híbridos	- Distribución de energía
- Aplicaciones remotas autónomas	- Distribución de energía	- Generación eólica onshore y offshore

4.3. SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA EÓLICA

4.3.1. Turbinas eólicas

El sistema de turbina eólica (WTS), por sus siglas en inglés “Wind Turbine System”, es la tecnología de energía renovable más promisorio y su desarrollo e implementación se ha venido incrementando con el paso del tiempo. En la figura 3 se aprecia el crecimiento de la instalación de sistemas eólicos a gran y media escala desde 1996 hasta 2012.

Además del rápido crecimiento de la capacidad total instalada, el tamaño de las turbinas eólicas individuales también está creciendo exponencialmente con el fin de reducir el precio por kWh generado. En 2011, una turbina de tamaño promedio entregaba al mercado 1.7MW. La tendencia de crecimiento del tamaño de las turbinas entre 1980 y 2018 se muestra en la figura 4; se nota que aquella capacidad de turbinas con diámetro de 164m y generación de 8MW que fue proyectada para 2018 fue alcanzado en 2012. Ahora mismo la mayoría de los fabricantes están desarrollando productos en el rango de 4.5-8 MW para la gran escala y se desarrollan turbinas eólicas más y más grandes con multi-MW de nivel de potencia, esto conducido principalmente por la consideración de bajar el costo de la producción de energía. Según el sitio web greentechmedia, se

proyecta para el 2020 turbinas de 12MW por parte de grandes fabricantes como GE, Siemens Gamesa y Vestas. [2]

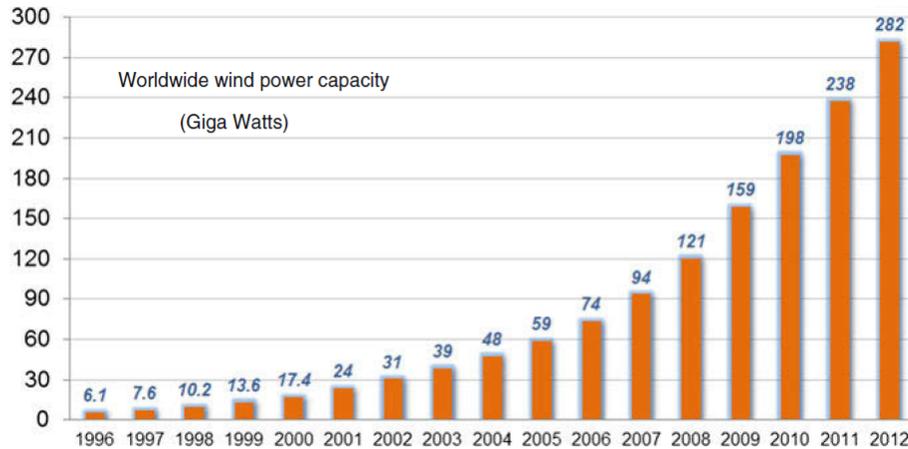


Figura 4: Capacidad de potencia instalada acumulada globalmente desde 1996 hasta 2012

[2] Peinke J. *Power Electronics For The Next Generation Wind Turbine System*. Oldenburg: Springer, 2015.

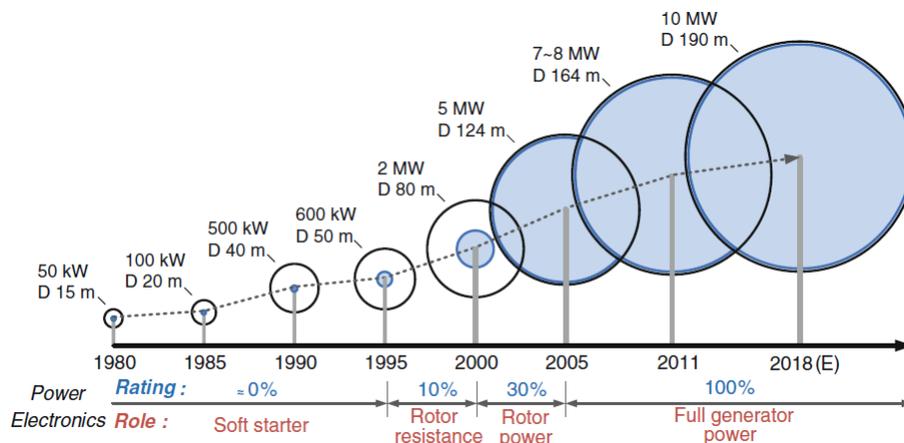


Figura 5: Evolución del tamaño de la turbina eólica y la capacidad de poder del sistema visto desde 1980 hasta 2018

[2] Peinke J. *Power Electronics For The Next Generation Wind Turbine System*. Oldenburg: Springer, 2015.

4.3.2. Funcionamiento

Una turbina eólica extrae energía cinética del área de barrido de las aspas, esta energía extraída luego se conduce a un generador eléctrico, el cual utiliza campos magnéticos para convertir la energía rotacional en energía eléctrica. La salida de poder, dependiendo de la carga, va a un transformador, el cual convierte la energía del generador a un valor más apropiado para el consumo.

La potencia que se da a partir del flujo del viento se da por (Manwell et al., 2002; Burton et al., 2001): ^[3]

$$P_{air} = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.1)$$

Donde:

ρ = densidad del aire (aproximadamente $1.225\text{kg } m^{-3}$)

A = área de barrido del rotor, m^2

v = velocidad del viento, $m s^{-1}$

Aunque en la ecuación 4.1 nos da la potencia disponible en el viento, la potencia transferida al rotor de la turbina eólica se reduce por el coeficiente de potencia, C_p :

$$C_p = \frac{P_{wind turbine}}{P_{air}} \quad (4.2)$$

$$P_{wind turbine} = P_{air} C_p = c_p \times \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (4.3)$$

Un valor máximo de C_p se define como el límite Betz, el cual establece que una turbina nunca puede extraer más del 59.3% del poder de una corriente de aire. En realidad, los rotores de las turbinas eólicas tienen máximos valores de C_p en el rango de 25 – 45%.

También es convencional, definir una relación punta-velocidad, λ , como:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (4.4)$$

Donde ω = velocidad rotacional del rotor. R = radio de la punta del rotor. v = Velocidad del viento, $m\ s^{-1}$.

El ratio de velocidad en la punta, λ , y el coeficiente de potencia, C_p , son adimensionales y por lo tanto pueden ser usadas para describir el rendimiento del rotor de cualquier tamaño de turbina. En la Figura 6 se aprecia que el máximo coeficiente de potencia sólo se logra con un valor de tasa de velocidad en la punta y que una velocidad de rotación fija en la turbina sólo ocurre a cierta velocidad de viento.

La curva de potencia de una turbina describe el comportamiento de la potencia de salida a varias velocidades de viento. Dicha curva nos da la salida de potencia eléctrica en estado estacionario como función de la velocidad de viento a cierta altura y, según algunos autores, se mide muestreando cada 10 minutos. ^[3]

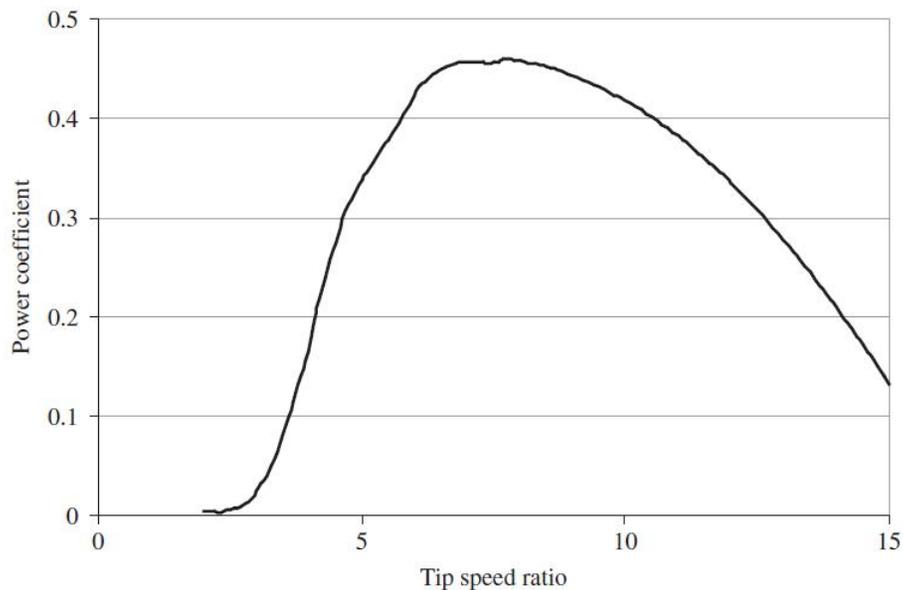


Figura 6: Curva del coeficiente de potencia / tasa de velocidad en la punta, C_p/λ

[3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.

En la Figura 6 se aprecia la información del comportamiento del sistema eólico, en donde:

- La velocidad de viento de corte (cut-in) – es la velocidad de viento mínima en la que la turbina entrega potencia utilizable.
- La velocidad nominal de viento – es la velocidad en la cual se obtiene el valor de potencia nominal (el valor de potencia nominal es, usualmente, la potencia de salida máxima que puede entregar el generador eléctrico).
- La velocidad de viento de corte (cut-out) – es la máxima velocidad de viento en la cual la turbina puede funcionar de forma segura.

Velocidades inferiores a la de viento de corte (cut-in) no moveran la turbina y esta se mantendrá en estado de “apagada”. Una vez en operación, la potencia de salida incre-

metará de forma exponencial con respecto a la velocidad del viento hasta alcanzar la velocidad de viento nominal, en donde se obtiene la mayor cantidad de potencia de salida. Una vez la velocidad de viento se encuentre al borde de superar el máximo permitido, por seguridad para la turbina, entran a actuar los diversos sistemas de control, los cuales, se encargan a través de diferentes y variados métodos de aumentar la oposición de rotación de la turbina con respecto a la velocidad del viento para de esta forma reducir el movimiento de la misma. [3]

4.3.3. Tipos de turbinas eólicas

Los tipos de turbinas eólicas se dividen principalmente en dos grupos, las de eje vertical (VAWT), por sus siglas en inglés “Vertical Axis Wind Turbine”, y las de eje horizontal (HAWT), por sus siglas en inglés “Horizontal Axis Wind Turbine”. Estos tipos de turbina se diferencian principalmente por la dirección en la que apunta el rotor de su generador y cada una tiene beneficios que se magnifican dependiendo de la zona de instalación. Comparando beneficios de ambas, se encuentra que las HAWT son más eficientes en cuanto a la generación de energía, véase [15], y por esta razón se utilizan en sistemas a gran escala, mientras que las VAWT son turbinas que por lo general se instalan a baja escala en zonas con poco flujo de aire. Las VAWT a comparación de las HAWT no requieren de ningún tipo de direccionador ¹ puesto que su gran ventaja es que recibe el flujo de aire de todas las direcciones.

En la Figura 7 se puede observar los tipos específicos de las turbinas eólicas más comunes.

¹**Direccionador** Dispositivo utilizado para ajustar la dirección en la que apunta el generador en una turbina de eje horizontal

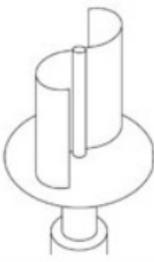
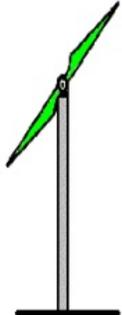
SAVONIUS (VAWT)	HELICOIDAL (VAWT)	DARRIEUS (VAWT)	3 - ASPAS (HAWT)	2 - ASPAS (HAWT)
				

Figura 7: Tipos de turbinas más comunes

[17] Al-Shemmeri T. *Wind Turbines*, p.p. 46, T. Al Shemmeri & Ventus Publishing ApS, 2010.

El tipo de turbina en la que se apoya el proyecto interdisciplinario que esta llevando a cabo el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” y del cual este Trabajo de Grado hace parte, es la turbina de eje vertical del tipo helicoidal, algunas de las razones en las que se fundamentó su selección son :

- Debido a las características del flujo de viento que se presenta en las posibles zonas de instalación (facilidades de la Fundación Universitaria Los Libertadores).
- El area requerida para la instalación del grupo de 10 micro turbinas.

El resto de razones y toda la información técnica y teórica relevante con respecto a la parte aerodinámica de la turbina, se puede encontrar en el Proyecto de Grado que se menciona en el estado del arte, “Análisis aerodinámico de una turbina de eje vertical para la implementación en la Fundación Universitaria Los Libertadores”, véase [7].

4.4. MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS, GENERADOR

Un generador eléctrico pertenece al grupo de máquinas eléctricas del tipo rotativas las cuales se dividen en tres grupos, máquinas D.C. (Corriente Directa), máquinas asíncronas A.C. (Corriente Alterna) y máquinas síncronas A.C. De estos tipos de máquinas, las del tipo D.C. ya no son de interés práctico como generadores debido a varias desventajas; requieren más mantenimiento, tienen una proporción de potencia a masa desfavorable y por sus devanados de alto voltaje. De las de A.C., ambas asíncronas y síncronas están actualmente en uso. Están las máquinas de inducción, denotando máquinas asíncronas de las cuales sólo un devanado es energizado. En la mayoría de casos la bobina de carga consiste de tres fases.

Los tipos de máquinas A.C. convencionales tienen un estator externo que lleva el principal (primario, armadura) devanado; el rotor se encuentra dentro del estator, con el entrehierro separando parte interna del estator y la superficie externa del rotor. El campo magnético que interactúa atravesando el entrehierro en dirección radial junta las partes del estator y del rotor. Otras construcciones, como lo son máquinas de campo radial con rotor externo, y máquinas de campo axial pueden llegar a ser interesantes para diseños especiales en el campo de la conversión de energía eólica.

Dado que cada máquina eléctrica es capaz de trabajar como un generador, tanto como un motor, los generadores también pueden trabajar con suministro de energía eléctrica. Estas máquinas también pueden servir para frenado eléctrico. ^[1]

4.4.1. Máquinas eléctricas asíncronas

Máquinas eléctricas rotativas del tipo asíncronas consisten en un estator con, preferiblemente, un devanado trifásico, y un rotor que lleva un devanado de jaula o un devanado de bobina polifase. Normalmente el estator es el miembro principal, mientras que el rotor es el secundario. Máquina de inducción es el término para una máquina asíncrona suministrada solo en la parte primaria. Las máquinas de inducción de jaula prevalecen

en el uso eléctricos industrial. La paridad polar con número de polos p de 2, 4, 6 y en algunas ocasiones 8 se utilizan en este tipo de máquinas, con la preferencia de $p = 2$ debido a las ventajas de fabricación y costo específico.

La Figura 7 ilustra el diagrama del circuito de una máquina de inducción trifásica con conexión tipo estrella conectada al devanado del estator, las terminales U, V y W suplidas por las líneas L1, L2 y L3 de una red trifásica. El rotor también se muestra con un devanado trifásico, las terminales K, L y M conectadas a los anillos colectores, el rotor del circuito accesible por medios de los anillos colectores y las escobillas. Cuando se hace corto circuito el lado del rotor la máquina es comparable con un máquina de inducción de jaula.

La conversión de energía en máquinas asíncronas se produce mediante un flujo magnético que acopla los miembros a través del entrehierro. Su componente fundamental se encuentra rotando con velocidad sincronizada referida al marco del estator. Con velocidades del rotor asíncronas a las del campo principal, la F.E.M (Fuerza Electromotriz) inducida por el rotor es de frecuencia cambiante (causando corrientes de la misma frecuencia) y es así como se produce un torque.^[1]

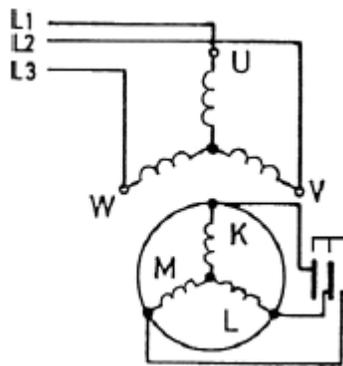


Figura 8: Diagrama de un máquina de inducción trifásica con rotor bobinado

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

4.4.2. Máquinas eléctricas síncronas

Un generador síncrono consta de dos elementos: el campo y la armadura. El campo se encuentra en el rotor y la armadura sobre el estator. La armadura tiene un devanado trifásico concentrado como se muestra en la Figura 9. El devanado del campo lleva corriente directa y produce un campo magnético que rota con el rotor. El rotor de un generador de baja velocidad, como lo es el de una hidroeléctrica, tiene un entrehierro no uniforme con un devanado de campo concentrado como se muestra en la Figura 8 y se refiere a un generador de polo saliente. El rotor de un generador de alta velocidad, utilizado con turbinas de vapor y gas, tiene un entrehierro uniforme con un devanado de campo distribuido y se refiere a un generador de rotor redondo (polo cilíndrico).[3]

La Figura 10, ilustra el diagrama del circuito de una máquina trifásica síncrona con conexión de estrella en el devanado del estator, las terminales U, V y W suplidas por las líneas L1, L2 y L3 de un red trifásica. El rotor lleva el devanado del campo, las terminales F1 y F2 están conectadas para ser alimentadas por corriente D.C. por medio de anillos colectores y escobillas de un fuente D.C. separada con líneas L+ y L-.^[1]

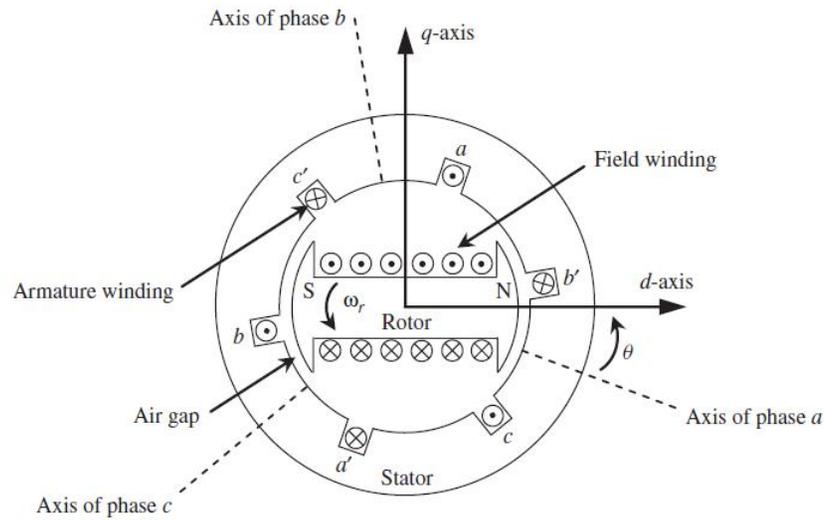


Figura 9: Diagrama de un generador síncrono trifásico (Kundur, 1994)

[3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.

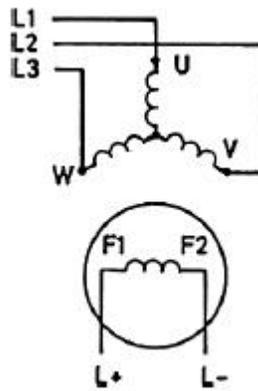


Figura 10: Diagrama de una máquina síncrona trifásica con excitación separada

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

4.5. COMPONENTES ELÉCTRICOS

Un sistema de generación de energía eléctrica es un sistema de transformación de energía. El funcionamiento de este tipo de sistemas empieza cuando la energía mecánica rotativa actúa sobre el generador haciendo girar su rotor con la suficiente velocidad y torque para, por inducción, inducir corriente eléctrica en los terminales de salida del generador y así generar una diferencia de potencial eléctrico en estos. Esta diferencia de potencial puede ser tratada de distintas formas, utilizando variados dispositivos o componentes electrónicos que contribuyen a obtener la forma de energía eléctrica que necesita la carga.

En los casos más comunes de uso, se tiene una corriente trifásica como salida del generador, luego esta se transforma a corriente DC haciendo uso de un rectificador, después se suaviza y filtra para obtener una señal DC con un contenido armónico casi nulo y finalmente se trabaja esta señal con mira hacia la carga.

A continuación se exponen teóricamente los dispositivos que hacen parte, en general, del componente eléctrico de un sistema de generación de energía eólica. ^[1]

4.5.1. Conversores electrónicos de potencia

Dependiendo de la carga se requieren diferentes variantes de circuitos electrónicos de potencia. La Figura 11 indica las tareas llevadas a cabo por los diferentes tipos de conversores electrónicos de potencia. Los dispositivos electrónicos de potencia contienen elementos de conmutación en forma de semiconductores. Los elementos semiconductores pueden ser tanto controlables (por conmutación usando tiristores o transistores del tipo bipolares, MOSFETS, IGBTs o tiristores GTO) como no controlables (diodos). Durante la operación la corriente pasa por un proceso de conmutación desde un inversor a otro. Dependiendo de la fuente generadora de energía electromotriz, el proceso requerido para el grupo de circuitos de conmutación, auto-conmutación y conmutación externa, se diferencia en la tecnología de los inversores. ^[1]

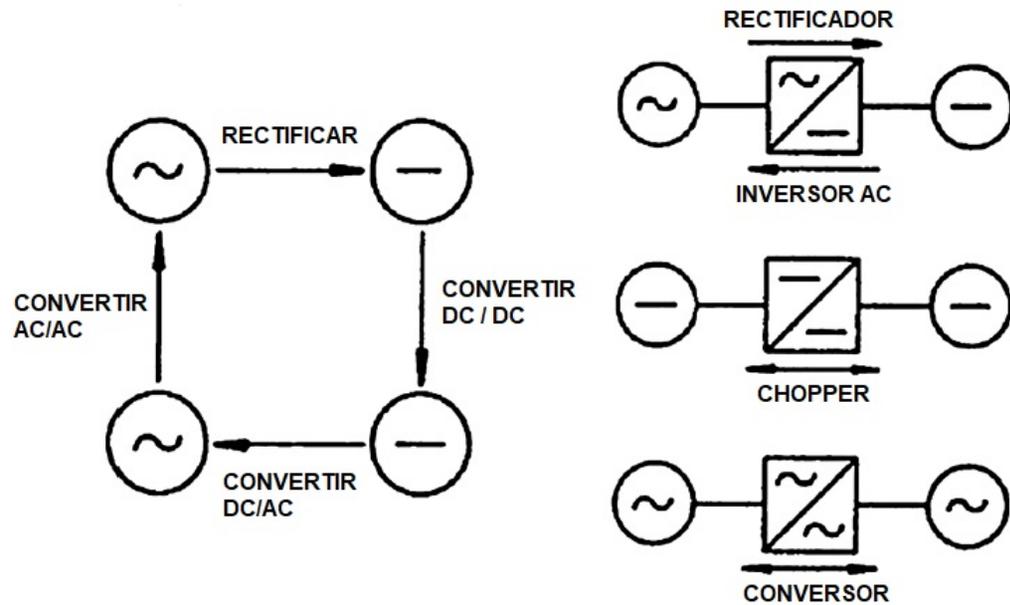


Figura 11: Conversión de energía eléctrica

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

- AC/DC (Rectificadores)

Transforman corriente AC con su característica de voltaje, frecuencia y número de fases en corriente DC. Los dispositivos sin control que realizan esta tarea contienen diodos, normalmente en un arreglo del tipo puente. Los que más se usan son los puentes de doble pulso (Graetz) para entradas monofásicas y los puentes de seis pulsos para entradas trifásicas.

- DC/AC (Inversores)

Transforman corriente DC a corriente AC de cierto voltaje, frecuencia y número de fases. Estos dispositivos son tanto externos como auto-controlados. Cuando el lado AC es una red eléctrica, estos inversores también pueden actuar como inversores AC/DC, permitiendo intercambio de potencia en ambas direcciones.

- AC/AC (Conversor)

Transforman corriente AC de cierto voltaje, frecuencia y número de fases a corriente AC con el voltaje, la frecuencia y número de fases que se quiera. Este tipo de dispositivos necesita cierto grupo de circuitos intermediarios para llevar a cabo la tarea deseada.

- DC/DC (Convertor)

Transforman corriente DC a corriente DC. Este tipo de convertidores, generalmente, forman parte de otros convertidores, como por ejemplo en convertidor de tipo AC/AC. Estos dispositivos también funcionan de buena forma como reguladores de voltaje en DC.

[1]

4.5.2. Puente rectificador trifásico

Un dispositivo rectificador trifásico en puente como el que se muestra en la Figura 12, es un rectificador de onda completa, puede operar con o sin transformador, y su salida son señales con componentes ondulatorias de 6 pulsos. Cada diodo que lo conforma, opera en 120° para su respectiva entrada. Para una entrada de tipo de conexión trifásica, la tensión de línea es $\sqrt{3}$ la tensión de fase. En la Figura 13 se pueden ver los diferentes tipos de onda presentes en el proceso de operación de este dispositivo. [4]

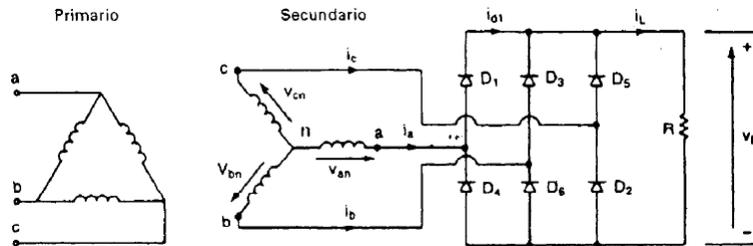


Figura 12: Esquema puente rectificador trifásico con entrada en estrella

[4] Rashid M. *Electrónica de Potencia*. Fort Wayne: Alan Apt, 1995.

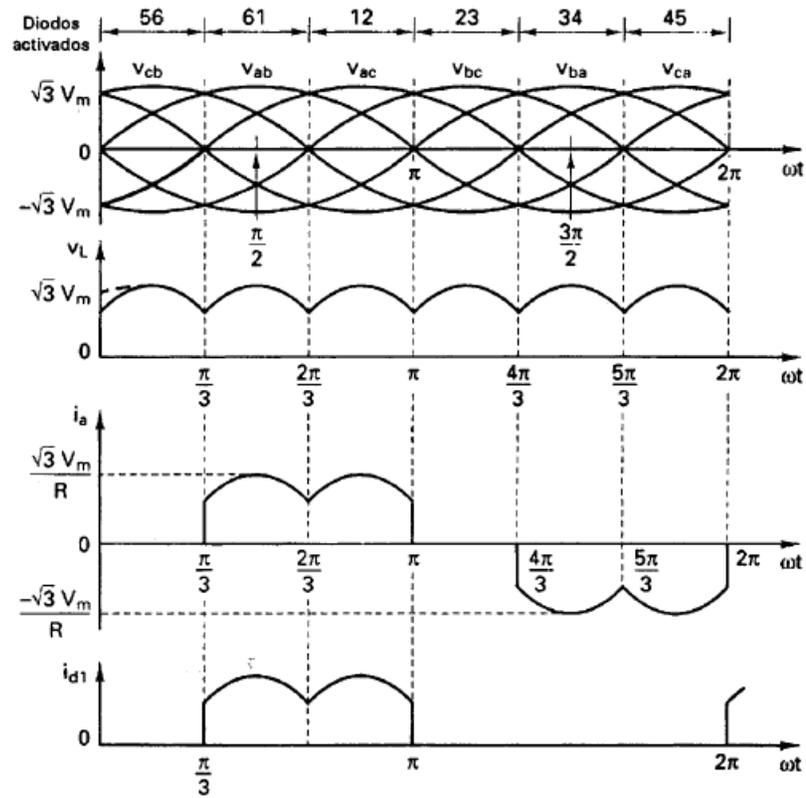


Figura 13: Formas de onda y tiempos de conducción de los diodos

[4] Rashid M. *Electrónica de Potencia*. Fort Wayne: Alan Apt, 1995.

En la siguiente ecuación podemos ver el voltaje promedio salida en función de V_m el cual es el voltaje pico de fase.

$$V_{cd} = \frac{2}{2\pi/6} \int_0^{\pi/6} \sqrt{3}V_m \cos(\omega t) d(\omega t) \quad (4.5)$$

$$= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m = 1,654V_m$$

[4]

4.5.3. DC - DC choppers

Cierto tipo de conversores DC - DC como se muestran en la Figura 14 [Moh95], operan cuando el voltaje de entrada U_d se transforma a la salida ajustable U_o , con flanco de bajada (buck), de la misma forma que con flanco de subida (boost). Un elemento semiconductor apropiado como un transistor, representado en la figura con un switch S, periódicamente se enciende y apaga, controlado por un pulso modulado de forma (PWM). Una inductancia L funciona como elemento de almacenamiento. En operación normal, con corriente en el inductor, el desempeño es tal que en el conversor del tipo "buck" la corriente de entrada es discontinua, mientras que en el conversor tipo "boost" esto se aplica la corriente del inductor, siendo dependiente de la conducción del switch y el diodo. ^[1]

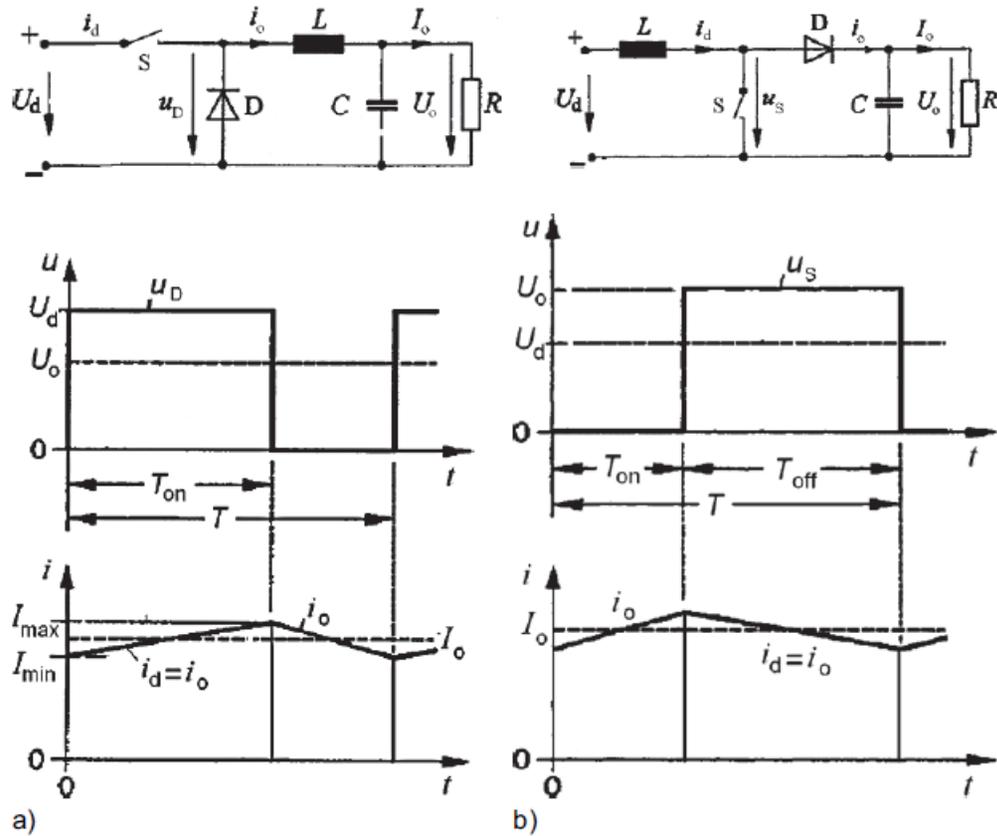
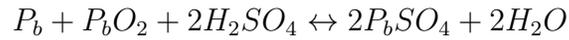


Figura 14: DC/DC chopper con elemento de almacenamiento. a) Conversor de flanco de bajada (buck) ; b) Conversor de flanco de subida (boost)

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

4.5.4. Baterías : plomo ácido

Las baterías de plomo ácido son los clásicos acumuladores que se utilizan para aplicaciones en ambos, automóviles y en equipo estacionario. Los acumuladores de energía usados en sistemas de generación de energía eólica y solar, son modificaciones de baterías convencionales para automóviles. Una celda de batería tiene dos electrodos; el negativo de plomo, P_b , y el positivo de óxido de plomo, P_bO_2 . Los electrodos se sumergen en H_2SO_4 . Tienen la siguiente reacción reversible:



Cuando esta cargada, y a 25°C la densidad del ácido es de 1,24g/cm³. El voltaje de la celda es aproximadamente 2V, resultando en 12V para una batería con 6 celdas en serie, un número común de baterías usadas en automóviles de pasajeros. En estado de carga plena el voltaje es algo más de 2.3V. La Figura 15 muestra el voltaje de celda sobre el grado de carga, indicando también el inicio de secreción de gas a 2.4V. Por lo tanto los voltajes nominales de almacenadores son 14V, 28V, y 42V. La capacidad de la batería se da en Ah.

La capacidad disponible depende principalmente de la temperatura y de la corriente de descarga. Una definición común es la capacidad C_{20} , significando que la capacidad especificada está disponible cuando la batería esta descargada con una corriente de salida I_{20} tal que el voltaje de cierre de descarga sea alcanzado después de 20 horas. El voltaje de cierre, normalmente, es 10.5V y por debajo para grandes corrientes de descarga. La Figura 16 ilustra las características de una batería estándar de 12V. Sobrecargar y descargar profundamente la batería se debe evitar. Se conocen diferentes métodos de carga, apropiados para baterías en vehículos y baterías estacionarias, en carga normal o rápida. ^[1]

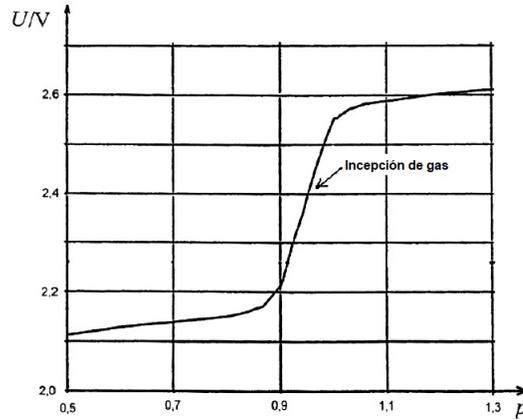


Figura 15: Voltaje de celda U sobre grado de carga p

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

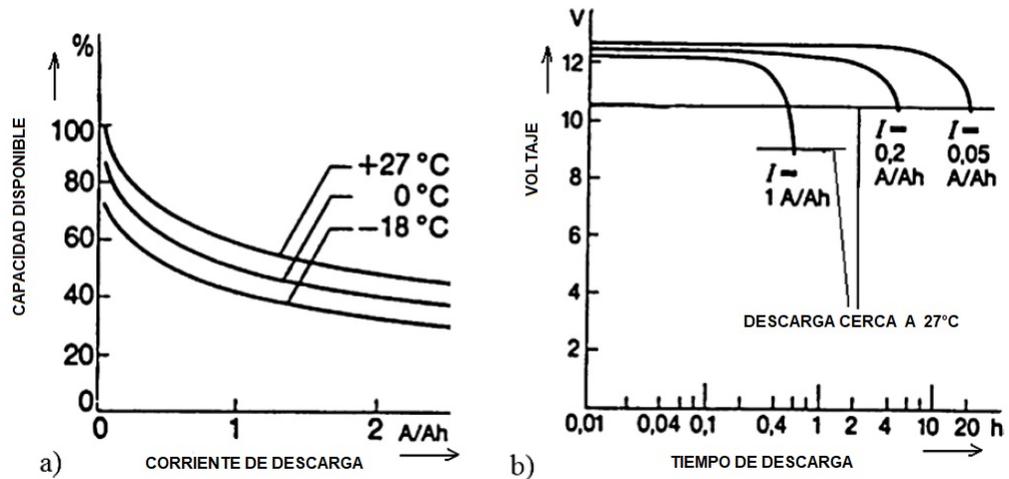


Figura 16: Características de una batería convencional (a) Capacidad disponible; (b) Voltaje de la batería durante la descarga

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

Varios modelos de circuito se han propuesto a lo largo del tiempo con propósitos de simulación. Uno de ellos se representa en la Figura 17 y muestra el circuito equivalente

de una batería. Los componentes del modelo son los siguientes:

C1, Capacitancia principal de la batería

R5, Resistencia de auto-descarga

C2, Capacitancia de sobrevoltaje

R3, R4, Resistencia interna de cargar y descarga, respectivamente

R1, R2, Resistencia de sobrevoltaje para cargar y descarga, respectivamente

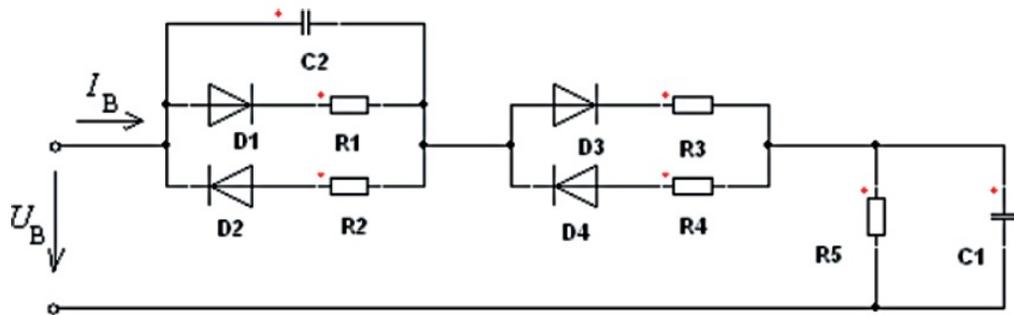


Figura 17: Circuito equivalente de una batería

[1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.

Los parámetros no lineales generalmente se determinan a partir de pruebas. Para propósitos de simulación las propiedades se simulan por funciones, por ejemplo por $U_{C1}(Q_{C1})$ para C_1 o $I_{R3}(U_{R3})$ para R_3 . Para uso práctico los valores resistivos se describen en sumas tales como $R1 + R3$ y $R2 + R4$. La variación de la temperatura puede ser tenida en cuenta por el algoritmo de compensación de temperatura. ^[1]

4.6. SISTEMAS DE CONTROL

4.6.1. Control para generadores síncronos

En sistemas de generación de energía que se dependa de una máquina eléctrica rotativa, generador, para la transformación de energía, el sistema de control es importante para mantener estable el proceso de generación. Los diferentes tipos de control asociados con generadores síncronos se muestran en la Figura 18. Estos bloques funcionales hacen dos tareas básicas de control, llamadas control de potencia/voltaje reactivo y control activo de potencia/frecuencia.^[3]

- Control de excitación

Dado que las condiciones que influyen en un sistema de generación de energía pueden variar, la demandada de energía activa y reactiva varía. Bajo condiciones de carga-pesada, ambos la transmisión del sistema y de la carga absorbe la energía reactiva los generadores síncronos necesitan inyectar energía reactiva a la red de trabajo. Bajo condiciones de carga-ligera, el comportamiento capacitivo de las líneas de transmisión puede volverse dominante y bajo ciertas condiciones es deseable que el generador síncrono absorba energía reactiva. La demanda de variaciones de energía en un generador síncrono pueden ser acomodadas ajustando su voltaje de excitación. El sistema de excitación realiza la función básica de un regulador de voltaje. También ejecuta funciones de protección requeridas para operar la máquina y otro equipamiento dentro de sus capacidades. En la Figura 19 se ilustra un diagrama de bloques que representa un sistema de excitación.

- Regulador

Un generador síncrono emplea un regulador de voltaje automático, por sus siglas en inglés AVR (Automatic Voltage Regulator), para mantener el voltaje en la terminal del estator cerca del valor predefinido. Si el voltaje en la terminal del generador cae debido al incremento de la demanda de energía reactiva, el cambio de voltaje se detecta y se alimenta el excitador con una señal para producir un incremento en el voltaje de excitación. La salida de energía reactiva del generador

es así incrementada y el voltaje en el terminal de salida se devuelve lo más cerca posible a su valor inicial.

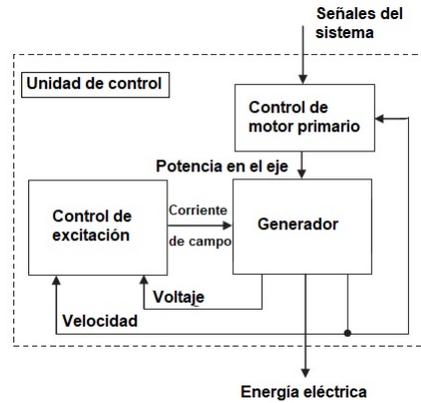


Figura 18: Control en generadores sincrónicos

[3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.

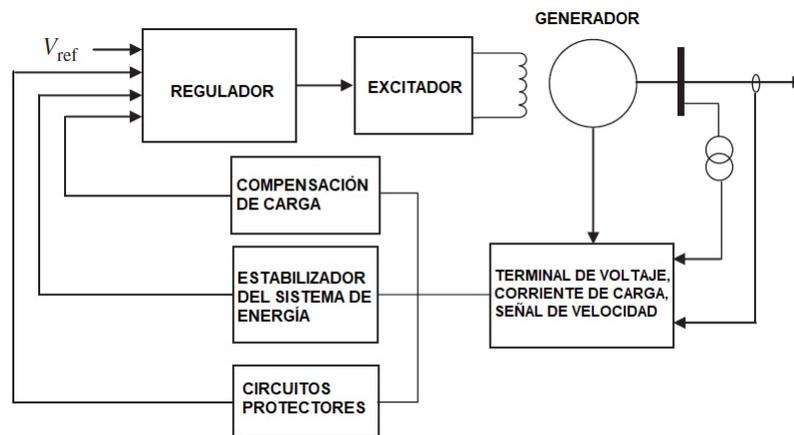


Figura 19: Diagrama de sistema de control de excitación

[3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.

- Excitador

El propósito de un excitador es suplir una corriente directa ajustable al devanado de campo principal del generador. El excitador puede ser un generador DC de reducido tamaño. En sistemas más grandes, el uso de un generador DC se evita debido a problemas de conmutación y entran a actuar generadores AC, supliendo el campo haciendo uso de un rectificador.

Los sistemas de excitación estática también se usan bastante. Estos comprenden un rectificador controlado usualmente alimentado desde los terminales del generador y permite un control de excitación de respuesta rápida. En todos los casos mencionados anteriormente, la fuente DC se conecta al campo del generador sincrónico haciendo uso de anillos colectores.

- Compesación de carga

El AVR normalmente controla el voltaje de salida en el estator del generador. Con la implementación de un bucle adicional en el control del AVR, permite que el voltaje en un punto remoto de la red pueda ser controlado. El compensador de carga tiene resistencia y reactancia ajustable que simula la impedancia entre los terminales del generador y el punto en el que el voltaje empieza a ser efectivamente controlado. Utilizando esta impedancia y la corriente medida, la caída de voltaje se calcula y agrega al voltaje en los terminales de salida.

- Sistema estabilizador de potencia

La función básica un sistema estabilizador de potencia, por sus siglas en inglés PSS (Power System Stabilizer), es agregar amortiguamiento a las oscilaciones en el rotor del generador controlando su excitación. Las comunmente utilizadas señales estabilizadoras auxiliares para el control de excitación son velocidad, frecuencia y potencia en el eje.

- Control primario de movimiento

Los controles primarios de movimiento brindan la oportunidad de ajuste en la salida de energía de los generadores del sistema para igualar la demanda de energía en la red de la carga. Sí, por ejemplo, la red de la carga incrementa la demanda de energía, entonces esto supone que se incrementa el torque en el generador, lo cual causa desaceleración en la rotación. El decremento resultante

en la velocidad se detecta por el gobernador de cada regulador de movimiento y se usa para incrementar su salida de energía. El cambio de energía producido en un generador individual se determina por la configuración de decaída de su gobernador. Una decaída de la configuración del 4 % indica que la regulación es tal que un cambio del 4 % en la velocidad, resultaría en un cambio del 100 % en la salida de energía del generador. En estado estable, todos los generadores de la red operan a la misma frecuencia y esta determina las velocidades de operación de los actuadores individuales en el generador. Por lo tanto, en un incremento de la demanda de energía en la red de la carga, la frecuencia en la red cae hasta que la suma del potencial de salida cambia al que produce los reguladores generadores igualando el cambio en la demanda de la red de la carga. Los elementos básicos de un control gobernador retroalimentado de potencia se muestran en la Figura 20.

[3]

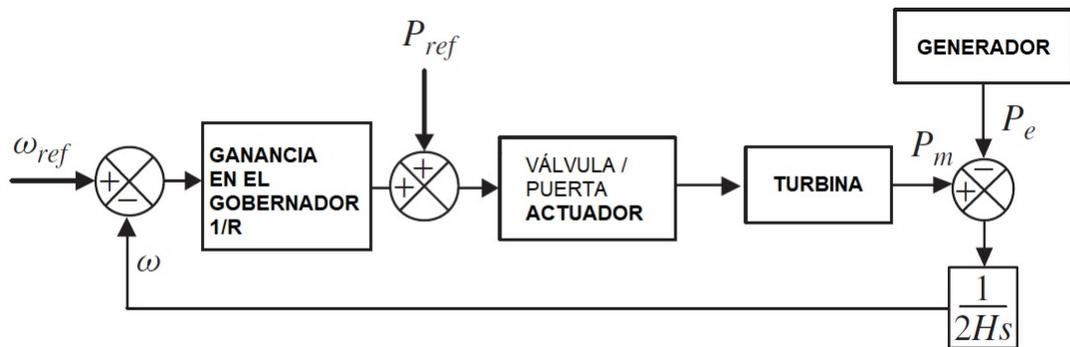


Figura 20: Sistema de gobernador de velocidad

[3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.

4.7. NORMATIVIDAD Y REGLAMENTACIÓN

4.7.1. Para aerogeneradores pequeños

- **NTC 5725, AEROGENERADORES. REQUISITOS DE DISEÑO PARA AEROGENERADORES PEQUEÑOS**

Esta norma técnica Colombiana tiene como propósito general establecer los parámetros de diseño de aerogeneradores pequeños con el fin de asegurar la seguridad, calidad y la integridad de la ingeniería, también se especifican los requisitos de diseño, instalación, mantenimiento y operación en condiciones ambientales específicas.

Esta norma aplica también para todos los subsistemas que componen el aerogenerador, tales como el sistema eléctrico interno, los mecanismo de control, los sistemas mecánicos y aerodinámicos, las estructuras de soporte, bases y la respectiva interconexión eléctrica con la carga.

Los aerogeneradores que cubre esta norma tienen las siguientes características:

- Área de barrido del rotor inferior a $200m^2$ (8 metros de radio).
- Generación de una tensión inferior a 1000V en Corriente Alterna o a 1500V en Corriente Directa.

[18]

4.7.2. Para los dispositivos electrónicos que forman parte del sistema eólico

- **NTC 2805, MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS. ESPECIFICACIONES NOMINALES Y CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO**

Es importante resaltar que algunas especificaciones que se manifiestan en esta norma no correspondan con la realidad de la zona de instalación del sistema eólico puesto que esta norma es idéntica (IDT) por traducción de la IEC 60034-1:2010.

Esta norma aplica a las máquinas eléctricas rotatorias, exceptuando aquellas que son objeto de otras normas IEC, como la 60349. Esta norma técnica Colombiana

tiene como propósito general establecer los lineamientos de prueba y el establecimiento de parámetros para la determinación de la aptitud funcional de una máquina eléctrica rotatoria.

[19]

■ **CE, Conformité Européenne**

Este mercado se presenta en bastantes productos que se comercializan en todo el mercado europeo (European Economic Area EEA). El mercado indica, según la Comisión Europea en el área de mercado interior, industria, emprendimiento y pymes, que el producto comercializado ha aprobado altos estándares de calidad para la seguridad y salud del usuario así como el del medio ambiente.

Este mercado de calidad aplica en una gran variedad de dispositivos eléctricos, electrónicos, electro-mecánicos, entre otros y avala, principalmente, el uso y manipulación, según se advierta por el fabricante, de la población tanto altamente capacitada como con capacidades cognitivas y motrices normales.

[20]

■ **RoHS, Restriction of Hazardous Substances**

Esta norma aplica para toda la industria de la electrónica y otros productos también. Se originó en la Unión Europea en 2002 y restringe el uso de 6 materiales peligrosos encontrados en productos eléctricos y electrónicos. Se aplica a todos los productos que conciernen en el mercado de la Unión Europea desde el primero de Julio de 2006.

En la actualización de esta norma (RoHS3) se incluyeron más sustancias y materiales peligrosos, la lista actualizada y estandarizada que tiene en cuenta esta norma es la siguiente :

- Cadmium (Cd): <100 ppm
- Lead (Pb): <1000 ppm
- Mercury (Hg): <1000 ppm
- Hexavalent Chromium: (Cr VI) <1000 ppm
- Polybrominated Biphenyls (PBB): <1000 ppm

- Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDE): <1000 ppm
- Bis(2-Ethylhexyl) phthalate (DEHP): <1000 ppm
- Benzyl butyl phthalate (BBP): <1000 ppm
- Dibutyl phthalate (DBP): <1000 ppm
- Diisobutyl phthalate (DIBP): <1000 ppm

Donde ppm es partes por millón.

[21]

- **LDV, Low Voltage Directive**

La directiva de bajo voltaje asegura que el equipamiento eléctrico dentro de ciertos límites de voltaje, provea un alto nivel de protección a los ciudadanos Europeos. La LVD cubre riegos de seguridad y salud en dispositivos eléctricos que operan con voltajes de entrada o salida en los siguientes rangos:

- 50 y 1000 V para corriente alterna. - 75 y 1500 V para corriente directa.

[22]

- **EMC, Electro-Magnetic Compatibility**

Esta norma verifica que la compatibilidad electromagnética, habilidad de un equipo o sistema para funcionar satisfactoriamente en su ambiente electromagnético sin introducir perturbaciones electromagnéticas a cualquier cosa en el ambiente, este en orden y pleno cumplimiento.

[23]

4.7.3. Para las instalaciones y conexiones eléctricas

- **RETIE, Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas**

Es un documento expedido por el Ministerio de Minas y Energía que enmarca estándares técnicos y lineamientos legales para instalaciones eléctricas en la República de Colombia. Este documento tiene el propósito de asegurar que la

instalación eléctrica sea lo más segura posible para el uso de la población. Cabe aclarar que este documento no es un manual de diseño eléctrico y su cumplimiento es de carácter obligatorio en el país.

[24]

Para más información relacionada con las normas y directivas mencionadas anteriormente, favor remitirse a las referencias bibliográficas de este documento.

5. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS GENERADORES

5.1. CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO EN LAS FACILIDADES DE LA FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES

Siendo la materia prima para la generación de energía eléctrica en un sistema eólico, el viento fue un factor fundamental que definió características importantes como el torque de arranque máximo que los generadores candidatos podían presentar, los aproximados de periodos de tiempo en los que la turbina funcionaría y generaría electricidad, el diseño propio de la forma aerodinámica de la micro-turbina enmarcada en el proyecto de investigación “Estudio de viabilidad para la implementación de un sistema de micro turbinas eólicas de eje vertical para la Fundación Universitaria Los Libertadores”, entre otras.

Gracias a la información proveída por el Co-Director de este Trabajo de Grado, el Ingeniero Luis Alejandro Caicedo, y al análisis pertinente de la misma y que se representa en las Figuras 21 y 22, se supo qué:

- La velocidad de tiempo promedio registrada por el equipo del laboratorio de radiometría en los meses de Enero y Febrero de este año, fue de 1.322 m/s.
- Los periodos de tiempo más habituales que presentan características similares son: menor velocidad de viento entre las 2 y las 6 de la mañana (aproximadamente),

mayor velocidad de viento entre las 12AM y 5PM (aproximadamente) y ráfagas de alta velocidad esporádicas de entre las 2 y las 4 de la tarde.

- Las velocidades de viento más altas que se registraron en Enero y Febrero del presente año fueron de entre 7 y 7.8 m/s.

En los puntos mencionados anteriormente se aclara qué, las mediciones de velocidad de viento se tomaron con una frecuencia de muestreo de 1 minuto, esto nos indica que los gráficos muestran una mirada cercana a la realidad pero no precisa. Para la definición de las franjas horarias características se hizo uso de la función *ssim* de MatLab, la cual compara imágenes y da como resultado el valor de *semejanza* y una imagen con lo más característico de las imágenes de entrada, lo que nos indica que fue un forma de comparación no gan precisa como un análisis estadístico detallado pero que sin embargo, ofrece un resultado los bastantemente cercano a la realidad. La velocidad de viento promedio se halló con un cálculo simple de promedio, donde se sumaron las velocidades por muestra y se dividió por la cantidad de muestras, lo que da un buen indicativo para tener en cuenta.

ssim Index Map - Mean ssim Value is 0.4940

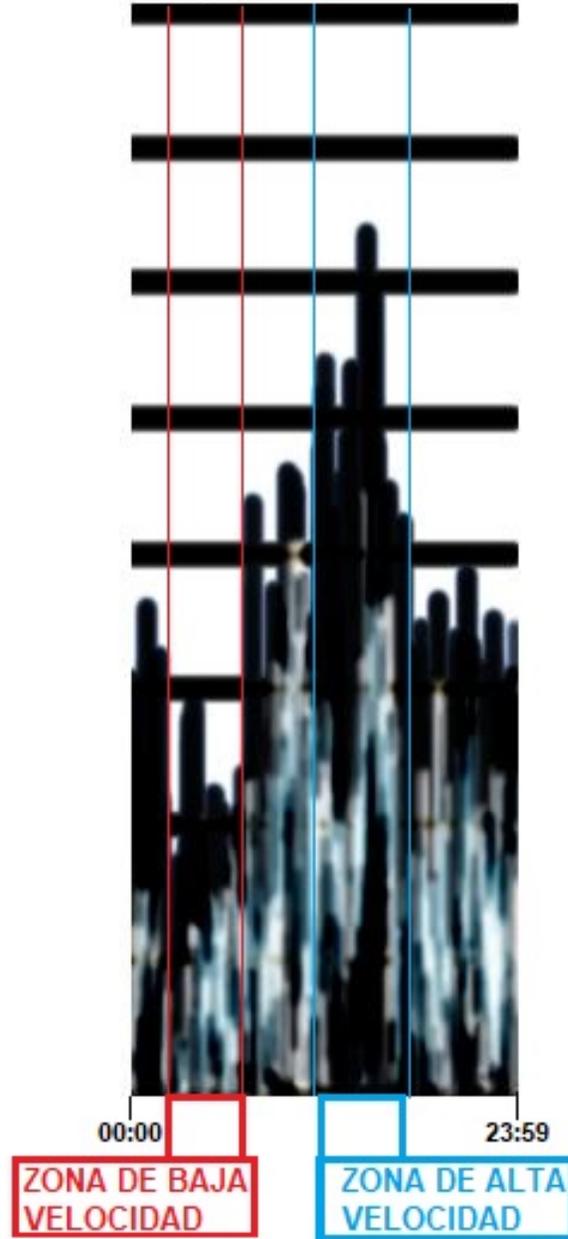


Figura 21: Características de un día de viento común (aproximadamente)

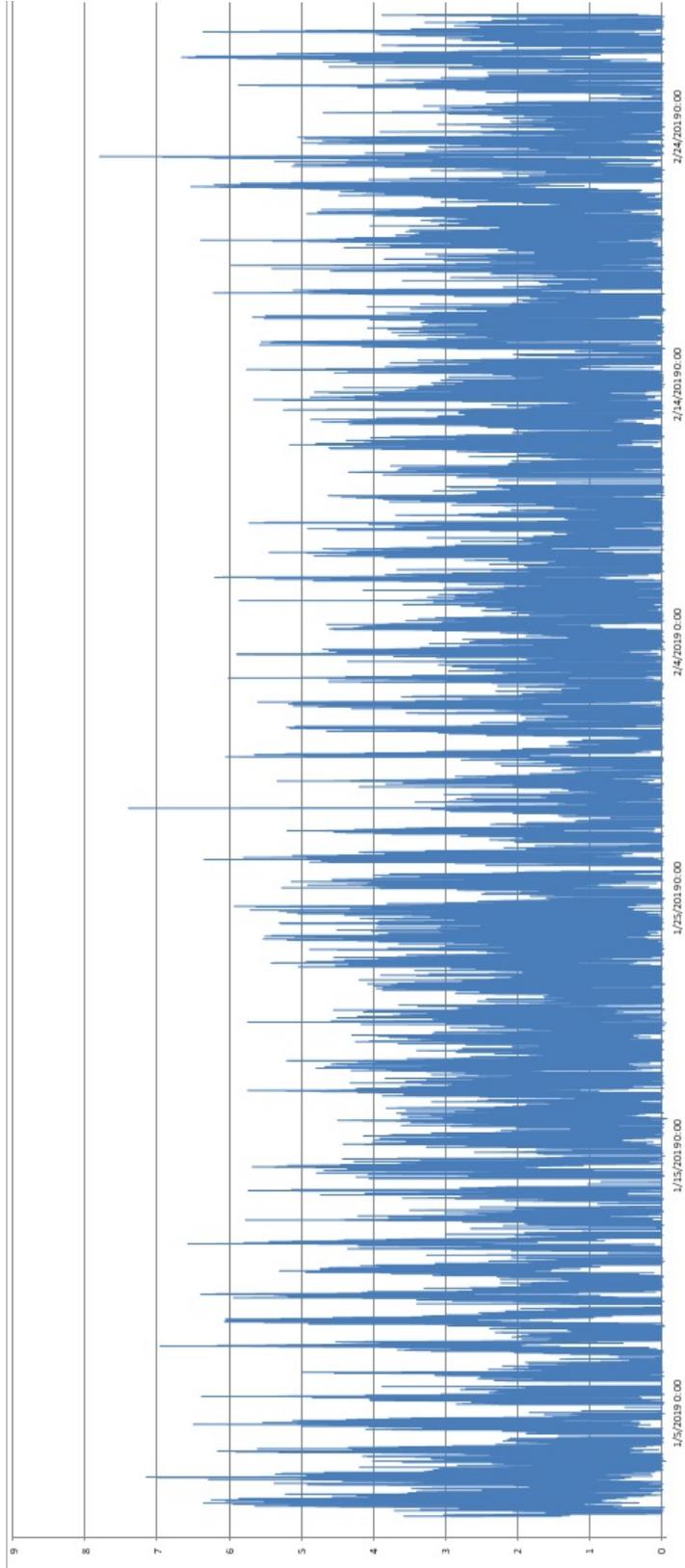


Figura 22: Velocidades de viento registradas en los meses de Enero y Febrero de 2019

5.2. DEFINICIÓN DE LOS CRITERIOS DE SELECCIÓN

En concordancia con la información lograda y referenciada en el Estado del Arte, en el Marco Teórico y en el transcurso de este Trabajo de Grado, se obtuvo que el generador elegido debió; estar acorde a la potencia nominal que el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” dictó; cumplir al menos con la normatividad Europea CE para que su uso sea seguro; ser teóricamente adecuado para las características de viento a las que están expuestas las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores, las cuales se describieron previamente; contar con una eficiencia de conversión de energía de alta calidad ($>70\%$); estar en aptas condiciones para la transmisión de corriente necesaria que necesite la carga; contar con un valor de Revoluciones Por Minuto suficiente y eficiente teniendo en cuenta las características de viento presentes en las facilidades de la Universidad; poseer o permitir la adecuación un sistema de control que permita su óptimo funcionamiento; contar o facilitar la implementación de aislamiento contra altas temperaturas producto del accionar del sistema; certificar o permitir la instalación de una estructura que proteja la máquina del ingreso de partículas no deseadas; mostrar un factor potencia / peso no mayor a 100W por cada 5kg; y así de esta manera se definieron los siguientes criterios que fundamentaron de manera objetiva la selección de los generadores propuestos para el sistema eólico en cuestión:

- Acatamiento de los parámetros, por parte de los generadores, que el sistema eólico requiere para su funcionamiento previsto, los cuales fueron definidos por el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”.
- Seguimiento de las normas internacionales y nacionales que rigen para la construcción, implementación y operación los generadores objetos de este Trabajo de Grado.
- Cumplimiento de las características funcionales que son esenciales para el sistema como lo son el torque inicial y las revoluciones por minuto máximas en las cuales el generador entrega su potencia nominal.

- Regulación en el suministro de corriente sobre la carga con el fin de hacer más eficiente el sistema desde el punto de vista del tiempo de carga de las baterías.
- Eficiencia del generador objeto de estudio de este Trabajo, para la transformación de energía mecánica rotativa en energía eléctrica.
- Prolongación de la vida útil de la máquina eléctrica contrarrestando daños debido a las sobrevelocidades de rotación, al incremento de la temperatura por su naturaleza de máquina eléctrica y al ingreso de partículas no deseadas que puedan afectar la integridad del dispositivo.
- Sometimiento a los lineamientos de implementación que ofrecen las instalaciones donde se pretende instalar el sistema eólico. (facilidades de la Fundación Universitaria Los Libertadores).
- Facilidad y factibilidad de la obtención de los generadores ya existentes en el mercado mundial.

De acuerdo a los criterios de selección para los generadores objetos de este Trabajo de Grado, los cuales fueron completamente tenidos en cuenta, se definieron las características técnicas, funcionales, operativas y de manejo de los mismos.

6. PROCESO DE SELECCIÓN DE LOS GENERADORES

Tal como se mencionó en la parte introductoria de este Trabajo de Grado, se acudió a todas las fuentes posibles que permitieran conocer los diferentes tipos de generadores eléctricos que se ajustaran a los requerimientos exigidos por el sistema de generación de energía eólica a ser propuesto, con las características de factibilidad del grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”. Habiéndose obtenido esta información y dentro del marco expuesto en los criterios de selección, se estudiaron 10 posibles alternativas de solución, las cuales se relacionan a continuación:

1. Generador DMKE, D5BLD150.^[25]

2. Generador EzPower, PMG165.^[26]
3. Generador MarsRock, G100s.^[27]
4. Generador AMG power solutions, NV-100.^[28]
5. Generador AMG power solutions, NH-100.^[29]
6. Generador Lecstyle, LST-100C.^[30]
7. Generador AVIAN, PMG 0.1KW/500RPM.^[31]
8. Generador TGET, TGET165-0.15KW-500R.^[32]
9. Generador LAISA, LS-100SM.^[33]
10. Generador Xinda, 100w 130rpm axial flux permanent magnet generator.^[34]

Es necesario resaltar que los generadores presentados anteriormente son de origen Chino, esto debido a la baja potencia nominal que se estipuló por el grupo de investigación a cargo del proyecto de investigación en el que se enmarca este Trabajo de Grado. Sin embargo, se contactó vía telefónica y por correo electrónico a fabricantes como Siemens, ABB, entre otros grandes fabricantes reconocidos internacionalmente, y comunicaron que no tienen mercancía en stock con esa potencia nominal para el tipo de generador en específico que se buscaba, los fabricantes también comentaron que era posible hacer un pedido por encargo con las especificaciones que se buscaban, pero eso habría ido en contra de una de las partes fundamentales de este Trabajo, la que estipula que los generadores deben estar en el mercado.

Con el fin de realizar una selección objetiva, se procedió a organizar cada generador con sus características técnicas y funcionales para luego calificar con puntaje cada una de las mismas y así obtener los mejores candidatos.

La Tabla 3 evidencia las características técnicas y funcionales con sus respectivos puntajes máximos para cada generador.

La ponderación por puntaje y descripción de cada una de las características que sirvieron como parámetros para la selección final de generadores se desarrolla a continuación:

6.1. POTENCIA

La potencia se evaluó tomando en cuenta el valor máximo que se definió por el grupo de investigación a cargo del proyecto en el que se enmarca este Trabajo de Grado, el cual fue definido en 150W, entonces los generadores con tal valor de potencia obtuvieron 30 puntos máximos y a partir de allí se asignó puntaje dividiendo el valor de la potencia de cada generador por 150W y luego multiplicando este resultado por 30 puntos. De esta forma se obtuvo la ponderación de cada generador en el parámetro de potencia.

6.2. NORMATIVIDAD

Principalmente para este criterio de selección se tuvo en cuenta la certificación europea CE (Conformité Européenne)^[20] la cual se utiliza como un estándar común para, entre otros productos, dispositivos de baja tensión en Europa y que se puede aplicar en Colombia, situación que se enmarca dentro de los requerimientos de funcionamiento del generador a ser implementado en este proyecto. Esta certificación se describe con más detalle en el marco referencial de este documento. Para los productos con la certificación CE verificable, se les otorgó la máxima puntuación de 20 puntos, mientras que para aquellos a los que no se les pudo comprobar la certificación CE se les otorgó 0 puntos.

Tabla 3: Tabla de características técnicas y funcionales de los generadores evaluados

Características	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 4	Gen. 5	Gen. 6	Gen. 7	Gen. 8	Gene. 9	Gen. 10
<i>Potencia (W)</i>	150	150	100	100	100	100	100	150	100	100
<i>Certificación internacional</i>	CE	CE	-	-	-	CE	CE	CE	CE	CE
<i>Torque inicial (Nm)</i>	0.48	0.1	1.3	0.35	0.2	0.12	0.1	0.1	0.08	0.1
<i>Eficiencia (%)</i>	85	85	50	68	65	85	85	95	85	85
<i>Corriente (A)</i>	15.63	3.6	4.16	7.14	3.57	4.16	7.14	7.73	4.16	5.2
<i>RPM</i>	500	500	600	200	450	600	500	500	750	130
<i>Sistema de control</i>	-	-	-	SI*	SI*	SI*	-	-	SI*	-
<i>Aislamiento</i>	H	H	-	F	F	F	-	-	F	-
<i>Protección</i>	IP68	-	-	IP54	IP54	IP54	-	-	IP54	-
<i>Potencia / Peso (W/kg)</i>	40.54	39.47	28.57	9.09	14.28	18.18	26.31	37.5	32.25	9.09

6.3. TORQUE

A continuación se describen, los pasos, cálculos y aspectos que se tuvieron en cuenta, en el proceso para encontrar un valor de torque de arranque máximo apropiado para realizar una ponderación objetiva y fundamentada de este parámetro.

La información base y valores que se asumieron para llevar a cabo los siguientes cálculos fueron sugeridos por el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”.

Para empezar, se realizó un análisis sobre la Figura 23, la cual fue extraída del artículo de investigación científica “Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch”^[5], el cual fue publicado por la revista “Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics”.

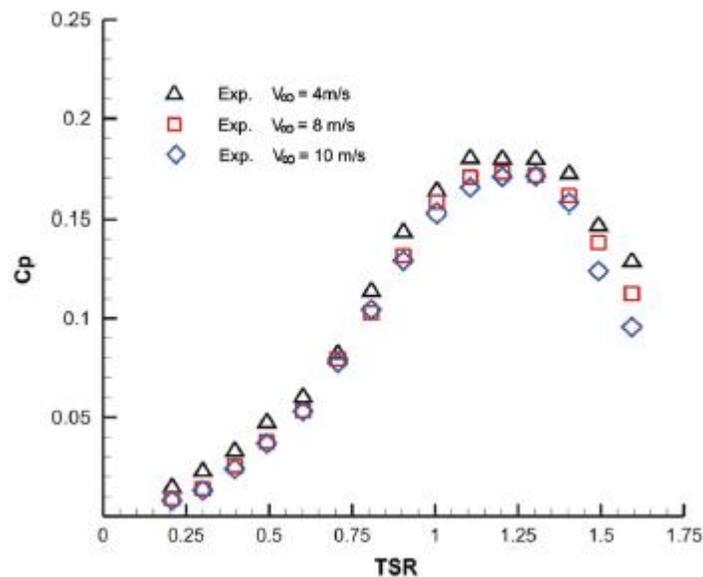


Figura 23: Coeficiente de potencia promedio vs tasa de velocidad en la punta para un paso fijo, NACA 634-221, a 3 velocidades diferentes de corriente libre

[5] Elkhoury M., Kiwata T. y Aoun E. *Experimental And Numerical Investigation Of A Three-Dimensional Vertical-Axis Wind Turbine With Variable-Pitch*. India: IEEE, 2015.

La Figura 23 nos revela el resultado de 3 pruebas realizadas sobre una turbina de 0.4m de radio y 8m de alto. Cada prueba se realizó a diferente velocidad y en la figura se pueden ver los resultados en forma de Coeficiente de potencia de la Turbina (C_p) versus Relación de Velocidad en la Punta (TSR).

Con el fin de obtener el torque de arranque máximo permitido para cada generador, se tomaron los resultados obtenidos para el valor de velocidad del viento de 4m/s el cual fue sugerido por el grupo de investigación a cargo de este proyecto y concuerda con un valor similar al de la velocidad de viento que se puede registrar en las facilidades de la Universidad, además de presentar valores similares de C_p a los que se esperarían en la turbina que se presentará en el proyecto de investigación en el que se enmarca este Trabajo de Grado.

Para determinar el valor máximo de torque inicial que debieron presentar los generadores evaluados, se tomaron en cuenta los siguientes valores:

- $C_p = 0.015$ con TSR de 0.2 (mínimos)

En la Ecuación 6.1 se indica la forma de como calcular el coeficiente de poder de la turbina (C_p):

$$C_p = \frac{\tau\omega}{\rho R h V^3} \quad (6.1)$$

Para hallar el valor máximo de torque inicial se realizó el siguiente procedimiento:

1. Teniendo en cuenta la ecuación 6.2 se obtiene la expresión matemática para calcular el torque promedio que puede ofrecer el viento actuando sobre las aspas de la microturbina.

$$\tau = \frac{C_p \rho R h V^3}{\omega} \quad (6.2)$$

2. Los parámetros que afectan el comportamiento del torque mencionado anteriormente se obtuvo de la siguiente manera:

2.1. La velocidad angular de la turbina se halla a partir de la ecuación 6.3.

$$TSR = \frac{R \times \omega}{V} \quad (6.3)$$

En donde $TSR = 0.2$, $R = 0.4m$ y $V = 4m/s$.

$$0,2 = \frac{0,4m \times \omega}{4m/s}$$

$$\omega = \frac{4m/s \times 0,2}{0,4m}$$

$$\omega = 2 \text{ rad/s}$$

2.2. Para determinar la densidad del aire en condiciones comunes para Bogotá, se empleó la ecuación 6.4 :

$$\rho = \frac{P}{r \times T} \quad (6.4)$$

En donde,

P : presión atmosférica (kPa).

De acuerdo con worldmeteo.info la presión atmosférica sobre Bogotá en un día soleado es de 102.4kPa. El valor se tomó en un día soleado, puesto que sería el peor de los

casos, en donde habría menos densidad de aire y por lo consiguiente se requeriría un generador más sensible para que se iniciara el movimiento.

R : constante de gas específico (287.058 J/(kg×K)).

T : temperatura ambiente (°K).

La temperatura promedio para fines de estos cálculos se tomó de 13°C (valor estimado según los datos de weatherspark.com). Esta temperatura se debe manejar en grados Kelvin, entonces se uso el valor de 268.15°K.

Obtenidos todos los datos, seguimos con la ecuación 6.4 de densidad del aire:

$$\rho = \frac{102,4kPa}{287,058(J/(kgK))286,15^{\circ}K}$$

$$\rho = 1,2466Kg/m^3$$

3. Una vez obtenidos todos los datos, se procedió con la ecuación 6.5 para hallar el valor del torque de arranque máximo de debería haber presentado cada generador.

$$\tau = \frac{0,015(1,2466kg/m^3)(0,4m)(8m)(4m/s)^3}{2rad/s} \quad (6.5)$$

$$\tau = \frac{3,829 \left(\frac{kg \cdot m^2}{s^3} \right)}{2rad/s}$$

$$\tau(\text{torque}) = 1,914 \text{ Joules}$$

Lo que aproximadamente, en una relación teórica de 1 a 1:

$$\tau = 1,914Nm$$

Entonces se dice que aproximadamente el valor máximo de toque de arranque para los generadores evaluados es de 1.914Nm para una velocidad de viento de 4m/s. Con motivos de la ponderación se estableció el valor de 2Nm como el valor máximo de torque de arranque para los generadores.

La ponderación del torque como criterio de selección se realizó siguiendo la Tabla 5, la cual fue diseñada y fundamentada a partir del desarrollo anterior y la curva de la Figura 24.

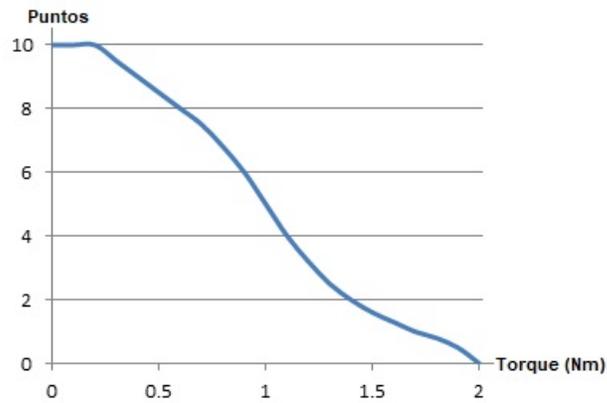


Figura 24: Curva ponderación del torque

Tabla 4: Ponderación del torque inicial

Torque inicial (Nm)	Puntaje
0 - 0.2	10
0.21 - 0.4	9
0.41 - 0.6	8
0.61 - 0.8	7
0.81 - 1	5
1.01 - 1.2	3
1.21 - 1.4	2
1.41 - 1.6	1
1.61 - 1.8	1
1.81 - 2.0	1
≥ 2.01	0

6.4. EFICIENCIA

La eficiencia fue un factor importante para la selección de los generadores evaluados. La eficiencia en este tipo de máquinas eléctricas determina cuanta energía mecánica es capaz de convertir en energía eléctrica el generador, dicho valor de eficiencia se enuncia como un porcentaje; siendo 100 % el valor más alto en donde del 100 % de la energía mecánica que se le suministra al generador, este es capaz de transformar la a energía eléctrica.

Entre más eficiente sea el generador es más beneficioso para el sistema entonces, la ponderación se asignó siguiendo la Tabla 5 que son resultados obtenidos de la Figura 25.

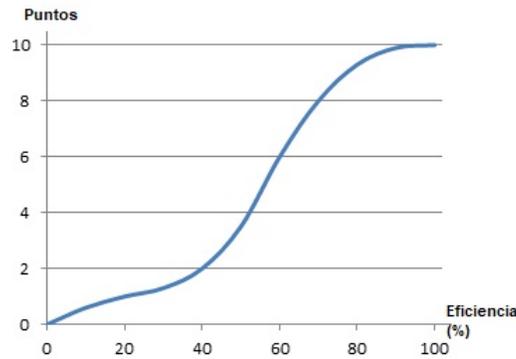


Figura 25: Curva de puntaje para la eficiencia

Tabla 5: Ponderación de la eficiencia

Rango de eficiencia (%)	Puntaje
100 - 90	10
89 - 80	9
79 - 70	8
69 - 60	6
59 - 50	3
49 - 40	2
39 - 30	1
29 - 20	1
19 - 10	1
9 - 0	0

6.5. CORRIENTE

La corriente fue un factor importante que se tuvo en cuenta para la selección de los generadores puesto que dependiendo de la carga que se va a acoplar al sistema se requerirá que los generadores sean capaces de soportar dicha carga y entregar la mayor intensidad de corriente posible.

Dado que los generadores que se encontraron en el mercado varían de ser DC, AC monofásicos y AC trifásicos se normalizaron los valores que no eran DC para evaluar equitativamente todos los generadores. El proceso de normalización se apoyó en la ecuación 6.6 la cual es la equivalencia entre un valor de corriente DC y uno AC para carga resistiva.

$$I_{DC} = \sqrt{\frac{4}{2\pi} \int_0^{\pi} I_m^2 \cos^2 \omega t d(\omega t)} \quad (6.6)$$

Donde I_m es el valor de corriente alterna.

Entonces, la ponderación de este parámetro se realizó según la Tabla 6, en la que sus valores fueron establecidos a partir de la gráfica ilustrada en la Figura 26.

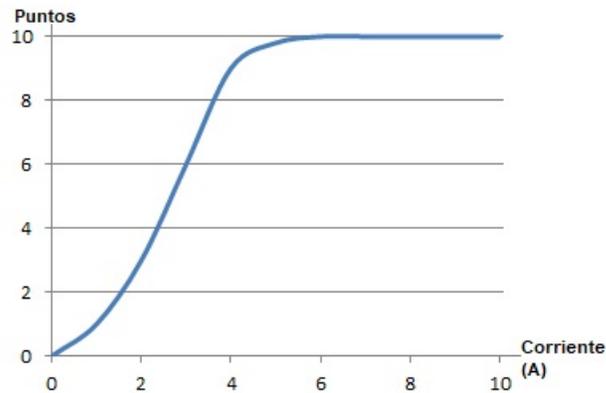


Figura 26: Curva ponderación de la corriente

Tabla 6: Ponderación de la corriente

Corriente (A)	Puntaje
≥ 10	10
9.99 - 9	10
8.99 - 8	10
7.99 - 7	10
6.99 - 6	10
5.99 - 5	10
4.99 - 4	9
3.99 - 3	6
2.99 - 2	3
1.99 - 1	1
≤ 1	0

6.6. RPM (REVOLUCIONES POR MINUTO)

El parámetro de las revoluciones por minuto fue un factor importante para la selección de los cuatro generadores más apropiados para el proyecto puesto que si el generador candidato contaba con un valor de RPM máximas muy bajo, entonces el sistema de control, el cual podría ser de freno electromagnético u otro tipo de alternativa como las que se presentan en este Trabajo, requeriría energía eléctrica para funcionar. Este mecanismo de control entraría a actuar de forma muy seguida, lo cual no es apropiado tanto en el aspecto del consumo de energía como en el de cuidar la estructura física del generador. Según datos obtenidos a través de experimentos realizados en conjunto con el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”, y llevados a cabo en el tunel de viento de la facultad de Ingeniería de la Universidad, se obtuvieron los valores de la Tabla 7, los cuales nos muestran un aproximado de lo que serían las RPM en dichas condiciones de velocidad de viento. Las diferentes velocidades de viento elegidas para este experimento del tipo simulación fueron establecidas a partir del análisis de datos reales tomados por los equipos del laboratorio de radiometría de la Universidad y suministrados por el Ingeniero de la facultad de

Tabla 7: Resultados del experimento para simular las RPM que supondrían cierta velocidad del viento

Velocidad de viento (m/s)	RPM (aprox.)
8.2	306
6.8	168
5.5	138
1.6	48

Según lo que se observa en la Tabla 7, podemos decir que un valor apropiado de RPM, de acuerdo con las condiciones climáticas a las que sería expuesto el sistema de generación de energía eólica dado su lugar de instalación (facilidades de la Fundación Universitaria Los Libertadores), serían de 350. Entonces la ponderación de este parámetro se realizó siguiendo lo que se refleja en la curva de la Figura 27 y las indicaciones de la tabla 8.

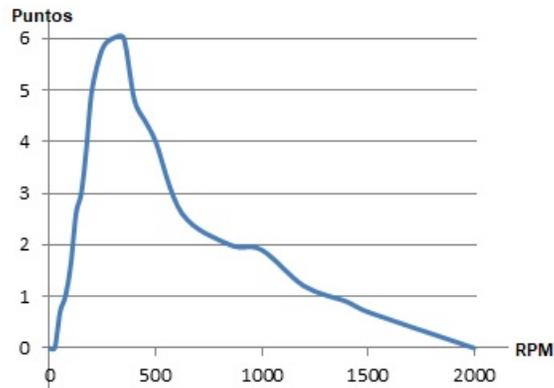


Figura 27: Curva ponderación de las revoluciones por minuto

Tabla 8: Ponderación de las RPM máximas

RPM	Puntaje
<50	0
51 - 100	1
101 - 150	3
151 - 200	5
201 - 350	6
351 -500	4
501 - 1000	2
1001 - 1500	1
>1501	0

6.7. SISTEMA DE CONTROL

El sistema de control de los generadores estudiados en este Trabajo de Grado fue una característica importante, la cual permite cuidar la integridad del generador y por consiguiente la de la micro-turbina y el sistema eólico en sí.

El sistema de control más común con el que algunos generadores ya cuentan desde fábrica es un sistema de freno electromagnético, el cual, actúa cuando las RPM en el generador llegan a cierto valor elevado o máximo permitido por el generador. La ponderación de este parámetro se realizó de tal forma que los generadores que contaran con sistema de control para velocidades de viento altas obtuvieron todos los 5 puntos y aquellos sin sistema de control obtuvieron cero puntos.

Ciertamente para resaltar, de ser elegido entre los 4 mejores generadores alguno sin sistema de control de fábrica, se le adecuará el sistema de control más apropiado.

6.8. AISLAMIENTO (TEMPERATURA)

El aislamiento contra temperatura fue un factor a tener en cuenta dado que los generadores estudiados no son 100 % eficientes en su labor de transformación de energía, entonces al ejecutar dicha acción estos transforman cierta parte de la energía mecánica que reciben a energía eléctrica, pero la energía restante que no convirtieron se transforma en energía calorífica y esto se ve reflejado en un aumento de temperatura en el generador cuando este está funcionando.

El aislamiento contra temperatura en este tipo de máquinas eléctricas se clasifica según el grado de temperatura que puede soportar el generador, dicha clasificación se evidencia en la Tabla 9.

Tabla 9: Máxima/permissible temperatura de funcionamiento para diferentes materiales aislantes

Class of insulation	Maximum attainable temperature as in IEC 60086°C	Permissible operating temperature as in IEC 60034-1 by the resistance method ^a	
		Up to 5000kW °C	Above 5000kW °C
A ^b	105	100	100
E ^b	120	115	110
B	130	120	120
F	155	145	145
H	180	165	165

^a Using the thermometer method this temperature will be less by 10°C.

^b This insulations are generally not used, for large motors, due to their low operating temperture.

[35] Agrawal K. C. *Electrical Power Engineering: Reference and Applications Handbook :1*, p.p. 255-256. CRC press, 2005.

Tomando en cuenta la Tabla 9 se le otorgaron los 5 puntos a aquellos generadores con cualquiera de las clases de aislamiento descritas en allí, esto debido a que estas clases de aislamiento se determinan en valores de $5000\text{kW } ^\circ\text{C}$, es decir, todos los generadores tratados en este trabajo y que tengan cualquiera de estas clases de aislamiento, cumplen con cabalidad su fin en el sistema.

6.9. PROTECCIÓN (CONTRA INGRESO DE PARTÍCULAS SÓLIDAS Y AGUA)

El grado de protección contra partículas sólidas y salpicaduras o inmersión en agua, fue una característica a tener en cuenta puesto que la posible instalación del sistema de microturbinas eólicas sería en los exteriores de las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores, entonces aquellos generadores que presentaron algún grado de protección IP (Ingress Protection) fueron puntuados. En la Figura 28 se muestra la organización de los diferentes grados de protección posibles en el estándar internacional IP.

La ponderación de esta característica fue realizada teniendo en cuenta los grados de protección presentes en los diferentes generadores estudiados, es decir, siendo 3 puntos los máximos a obtener en este parámetro, se otorgaron al grado de protección más alto encontrado entre los candidatos, 2 puntos se otorgaron al segundo grado de protección mas alto, 1 punto al tercer grado de protección mas alto y finalmente 0 puntos se otorgaron a aquellos generadores sin ningún grado de protección IP.

IP (Ingress Protection) Ratings Guide

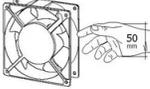
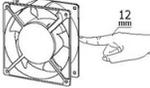
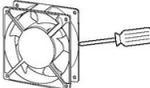
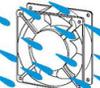
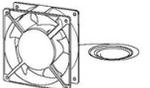
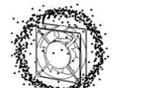
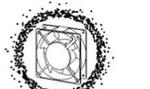
SOLIDS		WATER	
1	 <p>Protected against a solid object greater than 50 mm such as a hand.</p>	1	 <p>Protected against vertically falling drop of water. Limited ingress permitted. Duration 10 minutes.</p>
2	 <p>Protected against a solid object greater than 12.5 mm such as a finger.</p>	2	 <p>Protected against vertically falling drops of water with enclosure tilted up to 15 degrees from the vertical. Duration 10 mins, shall have no harmful effect.</p>
3	 <p>Protected against a solid object greater than 2.5 mm such as a screwdriver.</p>	3	 <p>Protected against sprays of water up to 60 degrees from the vertical. Duration 5 minutes, shall have no harmful effect.</p>
4	 <p>Protected against a solid object greater than 1 mm such as a wire.</p>	4	 <p>Protected against water splashed from all directions. Duration 5 minutes, shall have no harmful effect.</p>
5	 <p>Dust protected. Limited ingress of dust permitted. Will not interfere with operation of the equipment. Two to eight hours.</p>	5	 <p>Protected against jets of water. Duration 3 minutes, shall have no harmful effect.</p>
6	 <p>Dust tight. No ingress of dust. Two to eight hours.</p>	6	 <p>Water from heavy seas or water projected in powerful jets shall not enter the enclosure in harmful quantities.</p>
<p>Rating Example:</p> <p>IP65</p> <p>INGRESS PROTECTION</p>		7	 <p>Protection against the effects of immersion in water between 15cm and 1m for 30 minutes.</p>
		8	 <p>Protection against the effects of immersion in water under pressure for long periods.</p>

Figura 28: Clasificación IP (Ingress Protection)

[36] IP ratings

<https://www.axair-fans.co.uk/all-technical-information/ip-classification/>

6.10. RELACIÓN POTENCIA / PESO

Teniendo en cuenta que el sistema de generación de energía eólica que se proyecta por parte del grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” tendría, de forma preliminar, 10 microturbinas eólicas, cada una

con un generador de imán permanente, se tuvo en cuenta el factor del peso de cada generador. Con el fin de tener una mayor objetividad en la ponderación de este factor, se clasificó cada generador según su valor de relación potencia-peso. La Tabla 10 muestra la relación potencia-peso de cada generador estudiado.

Tabla 10: Relación potencia-peso de cada generador

Generador	Potencia (W)	Masa (kg)	Relación (W/kg)
DMKE, D5BLD150	150	3.7	40.54
EzPower, PMG165	150	3.8	39.47
MarsRock, G100s	100	3.5	28.57
AMG power solutions, NV-100	100	11	9.09
AMG power solutions, NH-100	100	7	14.28
Lecstyle, LST-100C	100	5.5	18.18
AVIAN, PMG 0.1KW/500RPM	100	3.8	26.31
TGET, TGET165-0.15KW-500R	150	4	37.5
LAISA, LS-100SM	100	3.1	32.25
Xinda, 100w 130rpm axial flux permanent magnet generator	100	11	9.09

Entonces, en la Tabla 11 se puede ver como se realizó la asignación de puntos a cada generador según su relación potencia-peso.

Tabla 11: Ponderación relación potencia-peso

Relación potencia-peso (W/kg)	Puntaje
≥ 20	2
< 20	0

6.11. PONDERACIÓN

Una vez obtenidos los diferentes valores de puntuación para cada generador en cada una de sus características, se realizó la sumatoria de puntos y se seleccionaron los 4 con más puntaje. Dicho procedimiento se puede ver en la Tabla 12.

En estudio conjunto con el grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social”, en forma definitiva se seleccionaron las alternativas que se relacionan a continuación, debido a que sus características técnicas y operativas representaban la solución más adecuada.

1. Generador DMKE, D5BLD150.
2. Generador EzPower, PMG165.
3. Generador TGET, TGET165-0.15KW-500R.
4. Generador LAISA, LS-100SM.

Tabla 12: Tabla de ponderación de parámetros

Característica	Puntaje Máximo	Gen. 1	Gen. 2	Gen. 3	Gen. 4	Gen. 5	Gen. 6	Gen. 7	Gen. 8	Gen. 9	Gen. 10
<i>Potencia</i>	30	30	30	20	20	20	20	20	30	20	20
<i>Normatividad</i>	20	20	20	0	0	0	20	20	20	20	20
<i>Torque</i>	10	8	10	2	9	10	10	10	10	10	10
<i>Eficiencia</i>	10	9	9	3	6	6	9	9	9	10	9
<i>Corriente</i>	10	10	6	9	10	6	9	10	10	9	10
<i>RPM</i>	6	4	4	2	5	4	2	4	4	2	3
<i>Sistema de control</i>	5	0	0	0	5	5	5	0	0	5	0
<i>Aislamiento</i>	4	4	4	0	4	4	4	0	0	4	0
<i>Protección</i>	3	3	0	0	1	1	1	0	0	1	0
<i>Peso</i>	2	2	2	2	0	0	0	2	2	2	0
<i>Total</i>	100	90	85	38	60	56	80	75	85	83	72

7. CRITERIOS DEL DISEÑO DEL SISTEMA DE CONEXIÓN, CONTROL Y CONVERSIÓN

7.1. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CONEXIÓN

La definición de los criterios para el diseño del sistema de conexión se basó en la información consultada y referenciada en la sección del marco teórico y la selección del generador, la cual fue estudiada y analizada detalladamente. Estos criterios fueron :

- La coherencia y seguimiento de modelos de conexión estandar, ya diseñados y a los que se les haya comprobado su funcionamiento, para sistemas de generación de energía eólica.
- El cumplimiento de la reglamentación establecida por el RETIE para la selección, forma y método de cableado, y otros estándares de conexión eléctrica para la transmisión de la corriente eléctrica que circula por el sistema.
- La optimización de la eficiencia de transmisión de las señales eléctricas presentes en el sistema para garantizar pérdidas mínimas en la transmisión y asegurar eficiencia óptima de conversión de energía en el sistema eólico.
- La adecuación precisa, segura y adecuada a las diferentes corrientes y potenciales eléctricos, así como a los dispositivos utilizados en cada una de las etapas del sistema en general, para evitar riesgos de mal funcionamiento y deterioro en los componentes del sistema.

7.2. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CONTROL

Con el fin de presentar un diseño que fuera seguro para el funcionamiento en conjunto del sistema eólico y de esta forma que se prolongara su vida útil, se enfatizó y tomó como una parte fundamental, el sistema de control que mantendría dentro de los rangos preestablecidos, la velocidad de rotación y corriente de suministro del generador.

Como criterios de diseño de este sub-sistema, se establecieron los siguientes :

- Ser un sistema de control al que ya se le haya comprobado su funcionamiento óptimo en otros documentos y artículos relacionados con la temática. Este criterio se basó en que estos diseños son alternativas confiables y eficaces para llevar a cabo la tarea deseada, además de que si se quiere diseñar un sistema personalizado para el generador, lo más apropiado es contar con la máquina para realizar las debidas pruebas.
- Ofrecer un balance entre robustez y practicidad. Esto debido a que el sistema debe ser tanto complejo como funcional para ofrecer los resultados esperados, pero no puede ser tan sofisticado y complicado como para modificar la estructura, funcionamiento o la misma esencia de la turbina ya planteada. Por ejemplo el método de control por cambio de area de barrido de las aspas no se tuvo en cuenta debido a que alteraría los diseños ya previamente realizados en, vease [7].
- Cumplir a plenitud con ambas variables a controlar, como lo son las sobre corrientes y sobre velocidades. Este criterio se pensó para el caso de aquellos generadores los cuales ya contaban con sistema de control. El sistema de control, que se encontró ya presente en algunos candidatos fue el de freno electromagnético, el cual ofrece una alternativa de control contra sobre velocidades pero no realiza una tarea eficaz contra sobre corrientes. Entonces fue necesario agregar o acoplar el tipo de control faltante.

7.3. CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE CONVERSIÓN

Los criterios que fundamentaron el diseño del sistema de conversión el cual, en pocas palabras, es todo el sistema eólico, estuvieron determinados por la carga final y las condiciones de viento presentes en las instalaciones de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Estos criterios fueron :

- Realizar una conversión acorde y estandar de la energía que transita por el sistema

y que alimenta la carga final. Este criterio se soportó en que lo más óptimo para el sistema es que siga modelos ya comprobados de funcionamiento del sistema y de conversión de energía.

- Presentar transiciones lo más suaves posibles para conservar la mayor cantidad de energía en el sistema y, por ejemplo, no disipar energía en forma de calor del sistema. Lo anterior debido a que ciertas metodologías de conversión de energía requieren de actividades como la conmutación, la cual en muchos casos presenta características de disipación o pérdida de energía en forma de calor.
- Emplear dispositivos electrónicos que cumplan y estén alineados con las normativas internacionales y nacionales que regulan su uso.

8. CONFIGURACIÓN Y FUNCIONAMIENTO GENERAL DEL SISTEMA

8.1. SISTEMA CON GENERADOR DMKE, D5BLD150

El generador del fabricante DMKE fue el que presentó las mejores características técnicas y funcionales en la selección de los generadores, unas de sus características sobresalientes son:

- Cumple con todas la normatividad internacional que se describe en el marco teórico de este documento, como la certificación CE, RoHS, LVD y EMC.
- Posee certificación contra el ingreso de partículas sólidas y agua IP68, lo que certifica que es sumergible en agua.

En la Figura 29 se representa en forma de diagrama de bloques, la configuración elemental de las etapas del sistema para el generador D5BLD150.

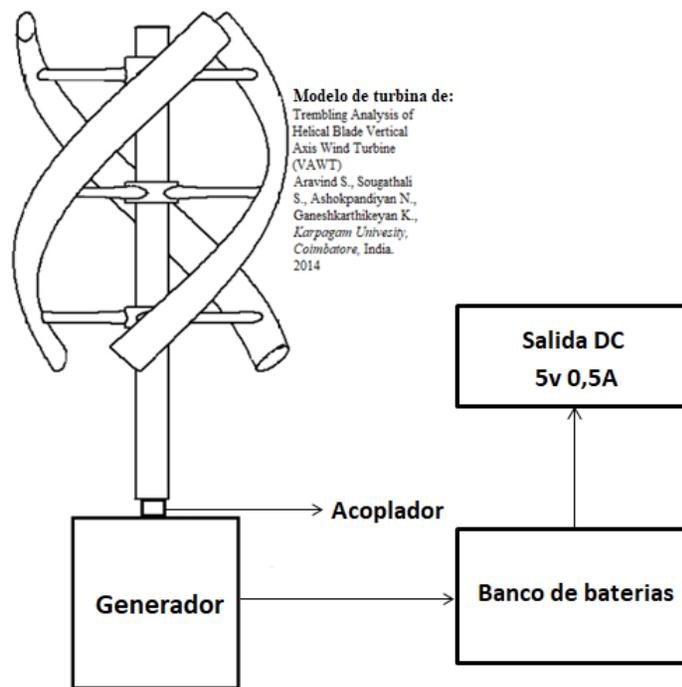


Figura 29: Diagrama de bloques del sistema con el generador D5BLD150, del fabricante DMKE

8.1.1. Acoplador

Esta parte, aunque pequeña en el diagrama de la Figura 29, es muy importante para el sistema, puesto que es la encargada de conectar el generador con el eje de rotación de la turbina eólica. Este acoplador debe diseñarse de acuerdo con las medidas de la Figura 30 y con las características apropiadas que según defina el diseñador del acoplador en sí. Estas características deberán estar enfocadas en el acople preciso de ambas partes (generador y eje de la turbina) y en la rigidez estructural que requiere el sistema.

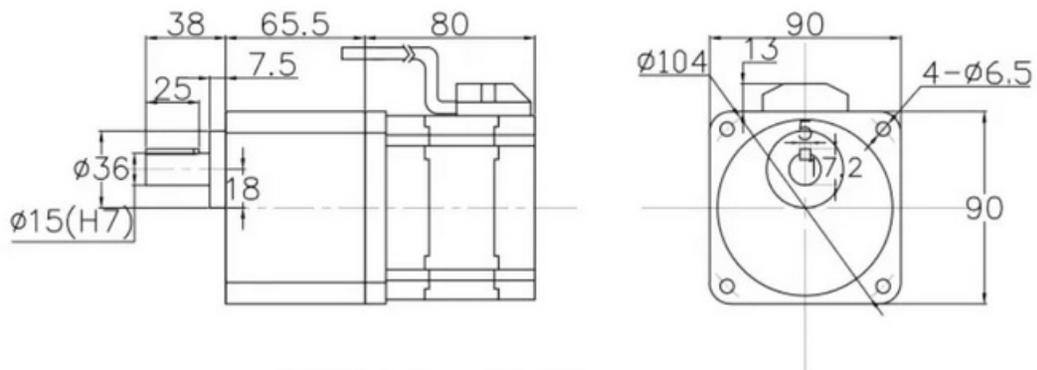


Figura 30: Medidas del generador D5BLD150 (unidades en mm)

[25] Generador DMKE D5BLD150, recuperado de: alibaba.com

Es necesario aclarar que este generador no fue diseñado específicamente para turbinas de eje vertical, así que se debe hacer el debido ajuste en la estructura física del sistema.

8.1.2. Generador

Parte vital para el proceso de generación de energía eléctrica. En este caso la máquina es un generador de imán permanente, el cual no cuenta con sistema de control contra sobre velocidades y sobre corrientes. Sin embargo, este PMG (permanent Magnet Generator) cuenta con protección contra partículas sólidas IP68, la cual certifica que es incluso sumergible en agua.

En las Figuras 31 y 32 se observa el diagrama de conexión del generador y el tipo de control respectivamente. El tipo de control se seleccionó a partir del análisis respectivo sobre el artículo [37] del cual se obtuvo que los resultados presentados mostraron alta eficiencia en el control de la frecuencia del estator y el torque, este último brindando reducción significativa en las pulsaciones de torque, la cuales se causan en el lado del estator.

8.2. SISTEMA CON GENERADOR EZPOWER, PMG165

El generador del fabricante EzPower fue el segundo que presentó las mejores características técnicas y funcionales en la selección de los generadores, unas de sus características sobresalientes son:

- Estructura de eje vertical, la cual se ajusta perfectamente al tipo de turbina del Proyecto de investigación en el que se cual este Trabajo de Grado se enmarca.
- Sin núcleo en el devanado, sin pérdidas por histéresis y un muy bajo torque de arranque, el cual es eficaz en condiciones de bajo flujo de aire.

En la Figura 33 se representa en forma de diagrama de bloques, la configuración elemental de las etapas del sistema para el generador PMG165.

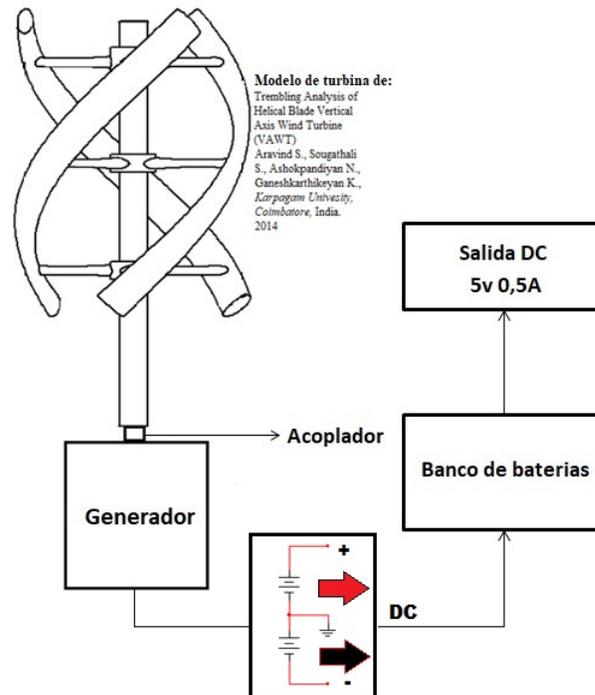


Figura 33: Diagrama de bloques para el sistema con generador PMG165 y TGET165-0.15KW-500R

8.2.1. Acoplador

Parte importante para el sistema, puesto que es la encargada de conectar el generador con el eje de rotación de la turbina eólica. Este acoplador debe diseñarse de acuerdo con las medidas que especifique el fabricante y con las características apropiadas, que cumplan con un acople preciso y que aporte rigidez a la estructura.

Es necesario aclarar que en el catálogo del fabricante se muestra una figura, la cual supone mostrar las medidas del producto, pero esta imagen no está en la calidad necesaria para identificar las medidas.

Se trató de contactar con el fabricante pero no se obtuvo respuesta, lo que supondría realizar la fabricación del acople cuando se adquiriera el producto.

8.2.2. Generador

Parte principal del proceso de generación de energía eléctrica. En este caso la máquina es un generador de imán permanente, el cual no cuenta con sistema de control contra sobre velocidades y sobre corrientes. De igual forma, no cuenta con protección contra el ingreso de partículas no deseadas.

En las Figuras 34 y 35 se observa el diagrama de conexión del generador y el tipo de control respectivamente. El tipo de control se seleccionó a partir del análisis respectivo sobre el artículo [6] del cual se obtuvo que los resultados presentados mostraron muy buena respuesta de control contra sobre velocidades y sobre corrientes.

Dado que el generador no cuenta con ninguna certificación IP (Ingress Protection), se debe diseñar un carcasa de suficiente tamaño y con condiciones óptimas para el funcionamiento de la máquina, entre estas condiciones están:

- Permitir el acceso fácil y seguro al generador para realizar el debido mantenimiento en caso de falla o rutina.
- Componerse de un material que haya previsto el incremento de la temperatura tanto al interior como en el exterior de la misma.
- No permitir el ingreso de partículas no deseadas al interior de la misma.
- Estar debidamente marcada como lo indica la NTC 2805^[19] y el RETIE^[24].

8.2.3. DC-DC

Se puede ver en el circuito de control de la Figura 35 que durante el propio proceso de control ya se realiza el proceso de rectificado, lo que se obtiene a la salida es una especie de fuente de voltaje dual. Con el fin de obtener una diferencia de potencial acorde a la entrada que se necesita en la batería, se agrega un condensador y resistencia en paralelo a la salida positiva del la fuente dual, haciendo las veces de filtro RC. El condensador se calculó con la siguiente información:

- La corriente de salida máxima es 10.71 si el voltaje se presupone en 14V y la potencia en 150W.
- 9.89VRMS sería la tensión de salida para una señal de 14V AC.
- 2.5 Hz se supondrían de frecuencia del rizado en la señal de salida del rectificador.

Entonces, se hizo uso de la siguiente ecuación para determinar el valor del condensador:

$$C = 8,33A2,5Hz \times 6,5V = 659mF$$

Siendo 6.5V la tensión pico a pico prevista para una salida rectificadora trifásica de 14V pico a 2,5Hz .

8.3. SISTEMA CON GENERADOR TGET, TGET165-0.15KW-500R

El generador del fabricante TGET fue el tercero que presentó las mejores características técnicas y funcionales en la selección de los generadores, unas de sus características sobresalientes son:

- Estructura de eje vertical, la cual es perfecta para la turbina de eje vertical.
- Eficiencia de alto porcentaje (95 %), la más alta entre todos los generadores estudiados en este Trabajo de Grado.

En la Figura 34 se representa en forma de diagrama de bloques, la configuración elemental de las etapas del sistema para el generador TGET165-0.15KW-500R.

8.3.1. Acoplador

Parte importante para el sistema, puesto que es la encargada de conectar el generador con el eje de rotación de la turbina eólica. Este acoplador debe diseñarse de acuerdo con las medidas de la Figura 36 y con las características apropiadas, que cumplan con un acople preciso y que aporte rigidez a la estructura.

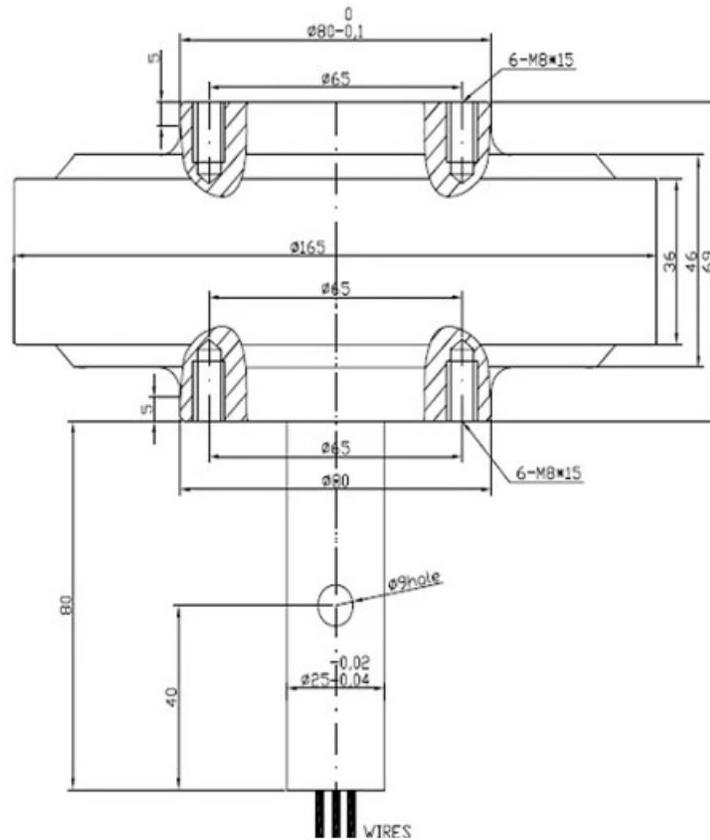


Figura 36: Medidas generador del fabricante TGET (milímetros)

[32] Generador TGET TGET165-0.15KW-500R, recuperado de: spanish-alibaba.com

8.3.2. Generador

Parte principal del proceso de generación de energía eléctrica. En este caso la máquina es un generador de imán permanente, el cual no cuenta con sistema de control contra sobre velocidades y sobre corrientes. De igual forma, no cuenta con protección contra el ingreso de partículas no deseadas.

En las Figuras 34 y 35 se observa el diagrama de conexión del generador y el tipo de control respectivamente. El tipo de control se seleccionó a partir del análisis respectivo

al artículo [6] del cual se obtuvo que los resultados presentados mostraron muy buena respuesta de control contra sobre velocidades y sobre corrientes.

Dado que el generador no cuenta con ninguna certificación IP (Ingress Protection), se debe diseñar un carcasa de suficiente tamaño y con condiciones óptimas para el funcionamiento de la máquina, entre estas condiciones están:

- Permitir el acceso fácil y seguro al generador para realizar el debido mantenimiento en caso de falla o rutina.
- Componerse de un material que haya previsto el incremento de la temperatura tanto al interior como en el exterior de la misma.
- No permitir el ingreso de partículas no deseadas al interior de la misma.
- Estar debidamente marcada como lo indica la NTC 2805^[19] y el RETIE^[24].

8.3.3. DC-DC

Se puede ver en el circuito de control de la Figura 35 que durante el propio proceso de control ya se realiza el proceso de rectificado, lo que se obtiene a la salida es una especie de fuente de voltaje dual. Con el fin de obtener una diferencia de potencial acorde a la entrada que se necesita en la batería, se agrega un condensador y resistencia en paralelo a la salida positiva de la fuente dual, haciendo las veces de filtro RC. El condensador se calculó con la siguiente información:

- La corriente de salida máxima es 5.35 si el voltaje se presupone en 28V y la potencia en 150W.
- 19.79VRMS sería la tensión de salida para una señal de 28V AC.
- 2.5 Hz se supondrían de frecuencia del rizado en la señal de salida del rectificador.

Entonces, se hizo uso de la siguiente ecuación para determinar el valor del condensador:

$$C = 5,35A2,5Hz \times 13,6V = 315mF$$

Siendo 13.6V la tensión pico a pico prevista para una salida rectificadora trifásica de 28V pico a 2,5Hz .

8.4. SISTEMA CON GENERADOR LAISA, LS-100SM

El generador del fabricante LAISA fue el cuarto y último seleccionado que presentó las mejores características técnicas y funcionales en la selección de los generadores, unas de sus características sobresalientes son:

- Posee sistema de control de freno electromagnético para proteger se de sobre-velocidades que pueda presentar el viento.
- Material del imán permanente de alta calidad y duración (Tierras raras NdFeB), lo cual supone, según el fabricante, una vida útil con bajo mantenimiento de más de 20 años.

En la Figura 37 se representa en forma de diagrama de bloques, la configuración elemental de las etapas del sistema para el generador LS-100SM.

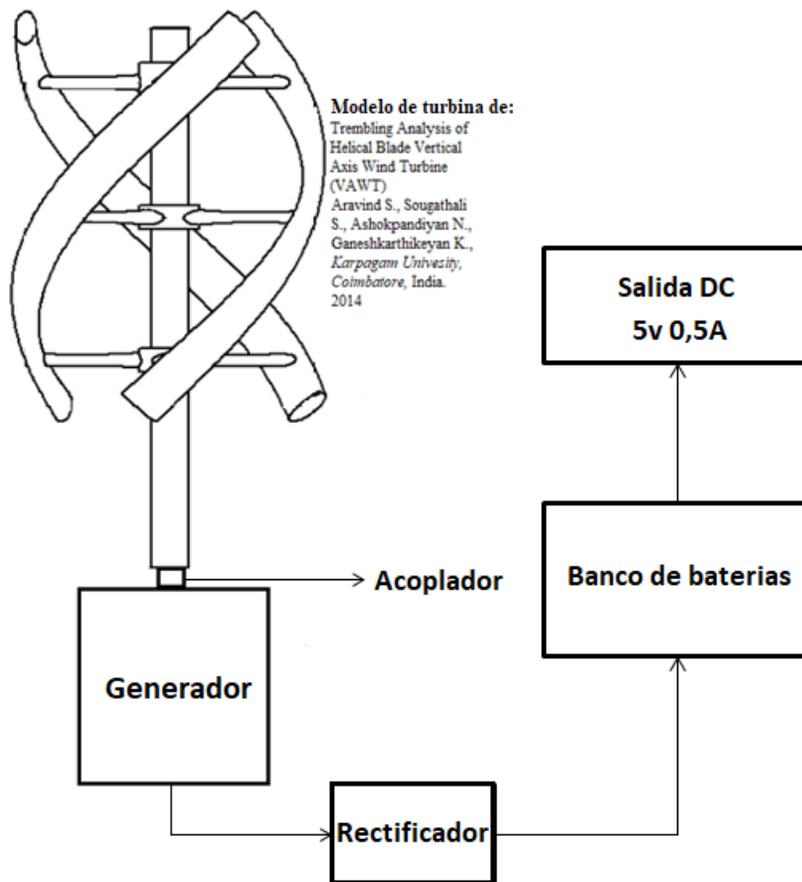


Figura 37: Diagrama de bloques de conexión para el generador LS-100SM

8.4.1. Acoplador

Parte importante para el sistema, la cual se encarga de conectar el generador con el eje de rotación de la turbina eólica. Este acoplador debe diseñarse de acuerdo con las medidas de la Figura 38 y con las características apropiadas, que cumplan con un acople preciso y que aporte rigidez a la estructura.

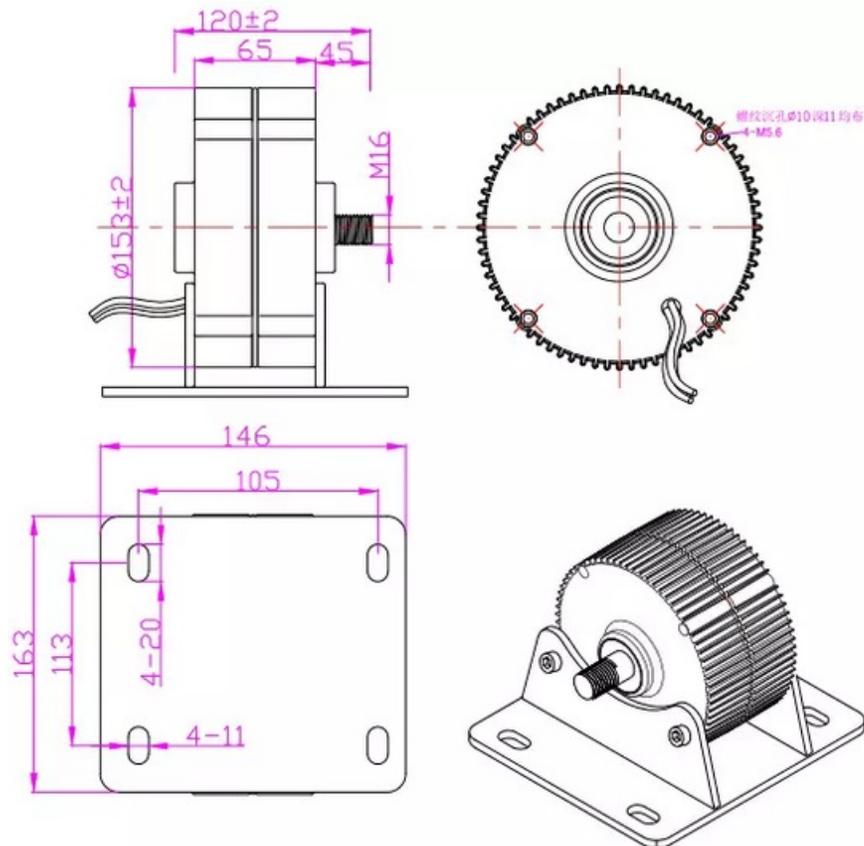


Figura 38: Medidas generador del fabricante LAISA (milímetros)

[33] Generador LAISA LS-100SM, recuperado de: alibaba.com

8.4.2. Generador

Parte principal del proceso de generación de energía eléctrica. En este caso la máquina es un generador de imán permanente, el cual cuenta con sistema de control contra sobre velocidades (freno electromagnético) pero no contra sobre corrientes. Este generador también cuenta con certificación de protección contra el ingreso de partículas no deseadas, IP54.

En las Figuras 39 y 40 se observa el diagrama de conexión del generador y el tipo de

control respectivamente. El tipo de control se seleccionó a partir del análisis respectivo al artículo [6] del cual se obtuvo que, aunque aparentemente sencillo, el control era eficaz contra sobre corrientes.

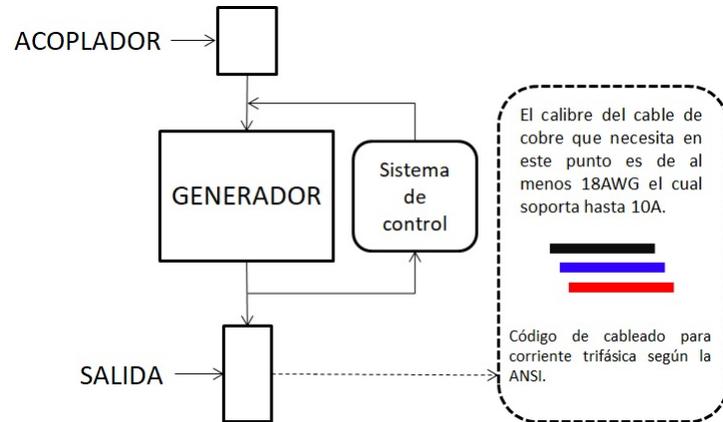


Figura 39: Diagrama de bloques para la conexión del generador LS-100SM

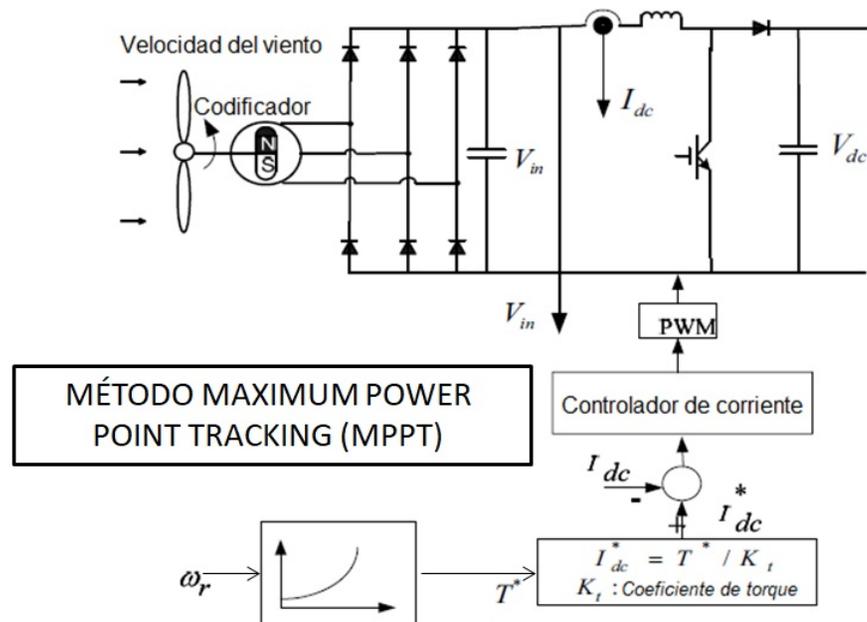


Figura 40: Sistema de control contra sobre corrientes para el generador LS-100SM

[6] Thanh Hai N., Jang S., Park H y Lee D. *Sensorless Control Of PM Synchronous Generators For Micro Wind Turbines*. Johor Bahru: IEEE, 2008.

8.4.3. Rectificador

Parte importante para el sistema es el rectificador, esto se debe a que para cargar la batería la corriente precisa estar en directa para este sistema. En la Figura 40 se observa el sistema de control para el generador en cuestión, allí se observa que se requiere un puente de diodos que hace las veces de rectificador, en este caso trifásico. En la Figura 41 se observa el circuito respectivo y el dispositivo recomendado para llevar a cabo la tarea de rectificación.

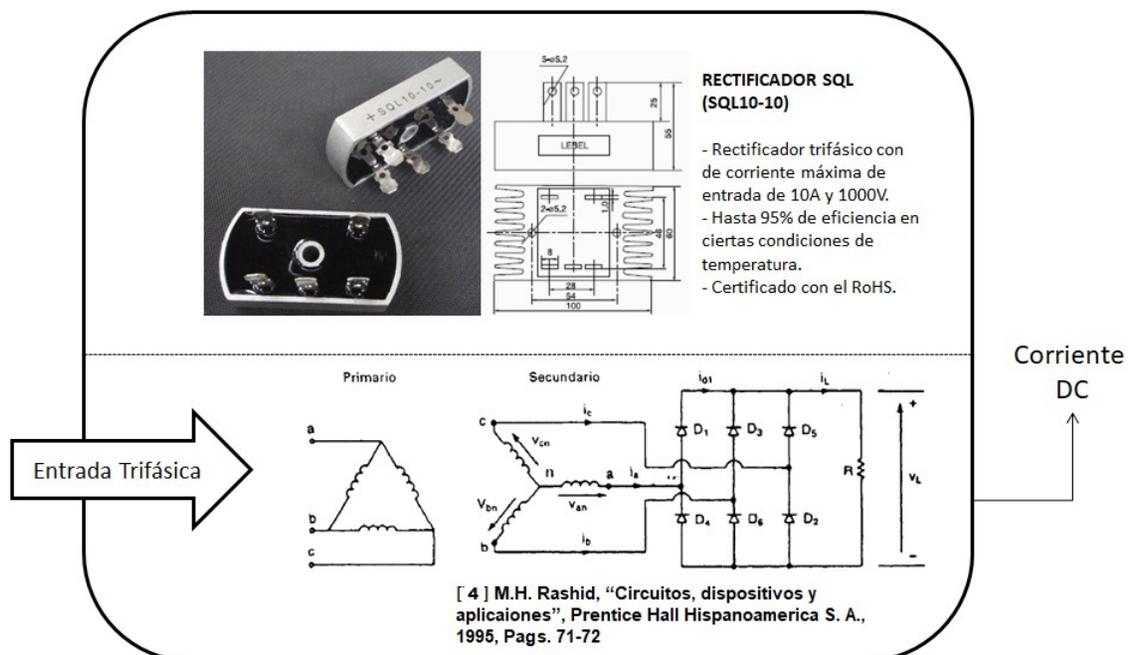


Figura 41: Puente de diodos rectificador trifásico para el generador LS-100SM

Con el fin de obtener una señal DC con el menor contenido armónico con fines de mejorar la eficiencia del sistema, se debe acoplar un condensador y resistencia en paralelo haciendo las veces de filtro RC. El condensador se calculó con la siguiente información:

- La corriente de salida máxima es 8.33 si el voltaje se presupone en 12V y la potencia en 100W.

- 8.48VRMS sería la tensión de salida para una señal de 12V AC.
- 2.5 Hz se supondrían de frecuencia del rizado en la señal de salida del rectificador.

Entonces, se hizo uso de la siguiente ecuación para determinar el valor del condensador:

$$C = 8,33A2,5Hz \times 6V = 555,3mF$$

Siendo 6V la tensión pico a pico prevista para una salida rectificada trifásica de 12V pico a 2,5Hz .

8.5. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

El subsistema de almacenamiento de energía eléctrica es parte importante en el sistema en general. Este subsistema es transversal a todos los sistemas para cada generador y su uso se justifica con base a que las condiciones de viento no siempre serán óptimas para generación de energía, lo que implicaría hacer uso de la energía almacenada. De igual forma, cuando el viento sea tal que se este generando buena cantidad de energía pero esta no esté siendo consumida por los usuarios finales, esta se debe almacenar y reservar para periodos de tiempo con alta demanda de energía.

Con miras hacia el futuro exitoso del proyecto de investigación en el cual se enmarca este Trabajo de Grado, el almacenamiento de energía eléctrica se hace vital para que el sistema se establezca como productor de energía, no solo para los miembros de la Fundación Universitaria Los Libertadores, sino también para que se comercialice a particulares interesados.

Dicho lo anterior, en la Figura 42 se ilustra la configuración de conexión para el sistema de almacenamiento de energía.

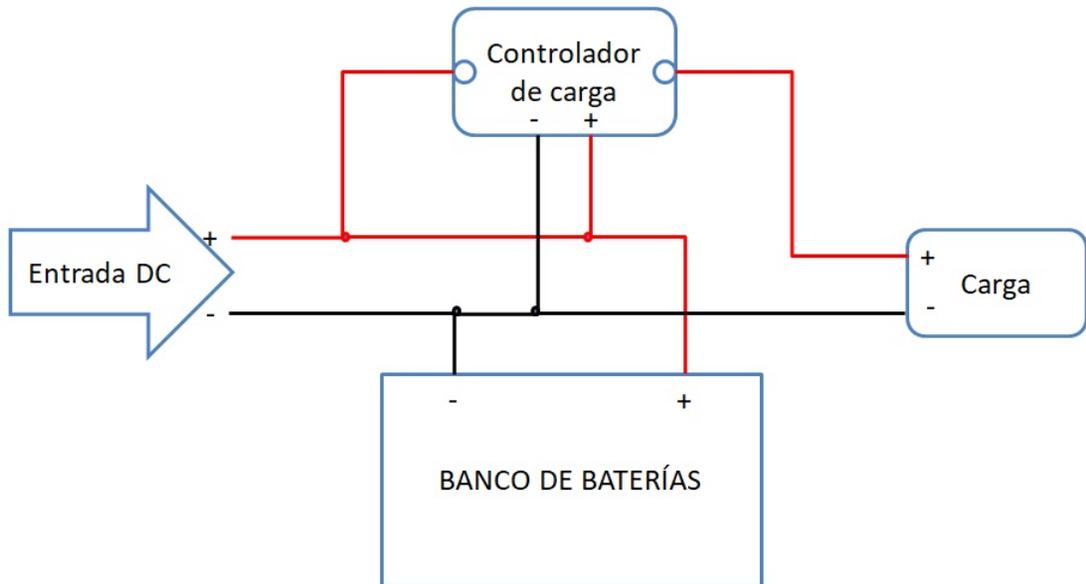


Figura 42: Diagrama de bloques para el sistema de almacenamiento de energía

8.5.1. Banco de baterías

En sistemas de generación de energía, tanto eólica como fotovoltaica, la energía necesita ser almacenada y típicamente este proceso se realiza haciendo uso de baterías de ciclo profundo. En muchos tipos de instalaciones a pequeña escala, una o dos baterías son suficientes para cubrir la demanda de consumo.

El primer paso que se siguió para determinar cuantas baterías y cual es el consumo de energía aproximado del sistema, fue identificar la corriente y voltaje de salida que necesita la carga. En este caso $5V$ y $500mA$. Una vez obtenidos estos valores se determina la potencia en vatios por hora que consumiría la carga.

$$5V \times 0,5A = 2,5Wh$$

Luego, se estableció la cantidad de tiempo en la que habría demanda de consumo, para

la Fundación Universitaria Los Libertadores y suponiendo una demanda continua:

$$6am - 10pm = 16 \text{ Horas}$$

Obtenido el tiempo de operación, se procedió con el establecimiento preeliminar de la cantidad de outlets o tomas que alimentarían la carga final, la cual, como ya se mencionó, serían los smartphones o tabletas de los miembros o visitantes de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Dicha cantidad de outlets sería 10.

Para la obtención del dato final de Wh por día que se presuponen para que se consuman, se hacen las siguientes operaciones:

$$(16 \text{ Horas}) \times (2,5W \text{ por Hora}) = 40Wh \text{ por dia}$$

Establecido el consumo de energía por día, se prosigue con definir el máximo porcentaje de descarga para la batería, dicho porcentaje no debería ser muy elevado con el fin de prolongar la vida útil de las baterías. En este caso aquel porcentaje de descarga se definió en 50%. El cálculo restante de la operación para el “Maximum Depth of Discharge” (DoD) fue :

$$40Wh \cdot 0,5 = 80Wh$$

Seguido a esto, se calcula la energía extra que se supondría la batería tendría que almacenar debido a pérdidas y no funcionamiento óptimo por temperatura. Para encontrar dicho valor de energía extra, se multiplica el valor obtenido anteriormente por el factor de pérdida que más se ajuste a la temperatura a la que estarán expuestas las baterías. Dicho factor se encuentra en la Tabla 13.

Tabla 13: Factor de perdida por temperatura en baterías

Temperature °C	Factor
26.7	1.00
21.1	1.04
15.6	1.11
10	1.19
4.4	1.30
-1.1	1.40
-6.7	1.59

[38] Battery bank size calculations, recuperado de:

<https://www.leadingedgepower.com/shop/help-advice-faq/help-with-batteries/battery-bank-size-calulations.html>

$$1,11 \times 800Wh = 880Wh$$

Encontrado el valor anterior, se obtiene la cantidad de Ah que supondría el sistema, como se muestra:

$$880Wh5V = 176Ah$$

Para cubrir el valor de Ah que se obtuvo anteriormente se pueden utilizar dos baterías de 110Ah o de otras capacidades dependiendo de factores futuros.

8.5.2. Controlador de carga

Este dispositivo es el encargado de administrar la carga, este se realiza una labor fundamental para gestionar el proceso de carga y descarga de las baterías. El controlador

de carga hace la acción de limitar la energía que se le suministra a la batería cuando la batería ya está cargada. De no controlarse la carga y descarga de la batería, esta se deteriora rápidamente por consecuencia de las altas temperaturas ante una eventual sobre carga y su vida útil se acorta bastante por consecuencia de descargas profundas.

El dispositivo que se seleccionó para ejecutar esta acción fue el controlador “12 Volt 24 Volt Digital Charge Controller Relay” del fabricante Missouri Wind and Solar de origen Estadounidense. En la Figura 43 se puede ver el dispositivo en cuestión y la forma de conexión que el fabricante sugiere, la cual fue adoptada en el diseño.

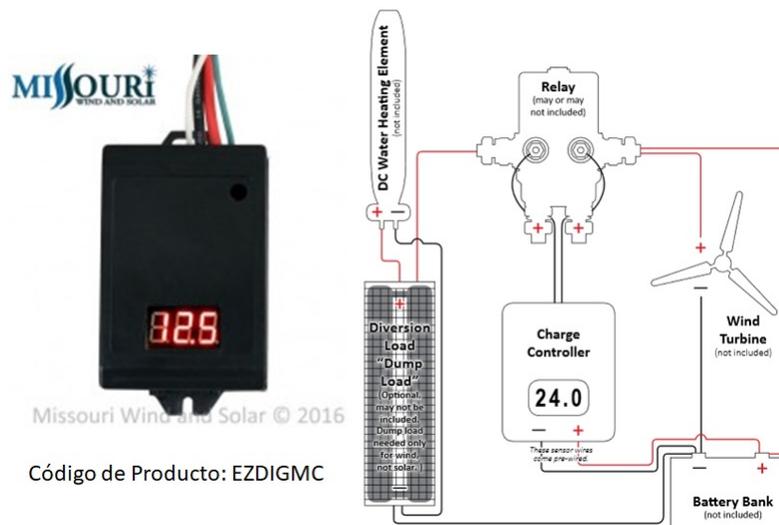


Figura 43: Dispositivo de control de carga para el subsistema de almacenamiento de energía eléctrica

[39] Missouri, Wind and Solar, recuperado de:

<http://mwands.com/store/12-or-24-volt-digital-charge-controller-unit>

8.6. SALIDA (OUTLET)

Para esta etapa, ya se asumía que la salida de voltaje de las baterías era de 12V, para dicho caso, hizo falta un divisor de voltaje con capacidad, provisoriamente, de 1A. Para

construir dicho divisor, se emplean dos resistencias en serie, una de 5 Ohms y la otra de 7 Ohms, de esta manera se garantiza que la diferencia de potencial en los extremos de la resistencia de 5 Ohms es de 5V y que la corriente que circularía sería de máximo 1A.

Para realizar la correcta instalación de las líneas de transmisión de potencial eléctrico, se deben seguir las normas y lineamientos indicados por el RETIE^[24], los cuales garantizan un seguro funcionamiento de la red eléctrica.

Como puntos posibles de instalación de dichos outlets preeliminares, se establecieron zonas prioritarias para la instalación de los mismos, las cuales son :

- Cafetería Santander : Por su alto flujo de personas y aún más, por ser una zona de dispersión de la mente en donde se hace bastante uso de dispositivos móviles.
- Biblioteca : Un espacio de estudio en donde los miembros de la Fundación Universitaria Los Libertadores se congregan para adelantar sus quehaceres educativos y podrían aprovechar este tiempo para recargar la o las baterías de sus dispositivos móviles.
- Otras zonas de exparcimiento : Donde se reúnen los estudiantes a comer, estudiar y/o conversar, en las que podrían hacer uso de la energía eléctrica generada por las turbinas eólicas.

8.7. SISTEMA A TIERRA

El sistema a tierra es un sistema obligatorio según la normas técnicas colombianas estudiadas en este trabajo y el RETIE ^{[18],[19],[24]}. Dicho sistema protegería contra adversidades meteorológicas, como lo son los rayos, la integridad del sistema eólico y la salud de las personas que se encuentren cerca de las instalaciones del mismo. Para determinar el tipo, forma y método de instalación de este sistema contra sobre tensiones

externas, se debe primero definir por parte del grupo de investigación “Sistemas complejos y aplicaciones tecnológicas de impacto social” el lugar en donde se instalarán las micro turbinas eólicas de eje vertical. Una vez definido el mismo, se procede con los cálculos que asumen dicho diseño para su posterior implementación.

9. CONCLUSIONES

Como resultado del desarrollo de este Trabajo de Grado se presentan como conclusiones:

- Que la implementación de un grupo de microturbinas eólicas de eje vertical en las facilidades de la Fundación Universitaria Los Libertadores es factible para el suministro de energía eléctrica a ciertas cargas que se enmarquen dentro de las posibilidades de generación de energía de los generadores de rango de potencia nominal 20 - 150 W.
- Que los sistemas con generadores de 150W de potencia nominal cuentan con capacidad, en óptimas condiciones, de almacenar 88Ah para el suministro eléctrico cuando no exista el suficiente flujo de viento para que se alimente la carga directamente.
- Que tres de los cuatro sistemas planteados cuentan con capacidad máxima de generar 150Wh con flujo de viento con velocidad de más de 6m/s y que uno de los cuatro sistemas planteados cuenta con capacidad máxima de generar 100Wh con flujo de viento con velocidad de más de 5m/s.
- Que en el mercado se puede encontrar gran variedad de alternativas de calidad con prestaciones sobresalientes, para la selección de los diferentes dispositivos que conforman el componente eléctrico de un sistema de generación de energía eólica, según las condiciones de flujo de viento presentes en el área de instalación.
- Que las características del flujo de viento en las facilidades de la Fundación universitaria Los Libertadores son limitadas y no presentan atributos necesarios que permitirían la instalación de un sistema de generación de energía eólica de mucha más capacidad al presentado en este Trabajo de Grado.

- Que el funcionamiento y eficiencia de las diferentes etapas del sistema presentadas en este Trabajo, son sobresalientes y se puede aumentar el aprovechamiento del flujo de viento si se realiza un diseño de turbina que se adapte de manera óptima a las condiciones de viento presentes en las facilidades de la Universidad.

10. RECOMENDACIONES

Con el fin de garantizar un funcionamiento pleno del sistema de generación de energía eólica, se recomienda que se tengan en cuenta los siguientes puntos:

- Elegir un área apropiada que permita el diseño e instalación de un sistema de protección contra condiciones meteorológicas adversas, como lo puede llegar a ser lluvias fuertes o granizo, los cuales podrían afectar la estructura del sistema.
- En caso de tener en cuenta el factor del costo, al momento de hacer la adquisición de los diferentes dispositivos y máquinas, se recomienda tener en cuenta que en muchas ocasiones la calidad, durabilidad y garantía de funcionamiento de los artículos, son coherentes con el costo del mismo.
- Evaluar la posibilidad de rediseño de la turbina eólica con el fin de que se adecue plenamente a las condiciones del flujo de viento que se presentan en las facilidades de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

11. REFERENCIAS

- [1] Stiebler M. *Wind Energy Systems For Electric Power Generation*. Berlin: Springer, 2008.
- [2] Peinke J. *Power Electronics For The Next Generation Wind Turbine System*. Oldenburg: Springer, 2015.
- [3] Anayalara O., Jenkins N., Ekanayake J., Cartwright P. y Hughes M. *Wind Energy Generation, Modelling And Control*. Cardiff: Wiley, 2009.
- [4] Rashid M. *Electrónica de Potencia*. Fort Wayne: Alan Apt, 1995.
- [5] Elkhoury M., Kiwata T. y Aoun E. *Experimental And Numerical Investigation Of A Three-Dimensional Vertical-Axis Wind Turbine With Variable-Pitch*. India: IEEE, 2015.
- [6] Thanh Hai N., Jang S., Park H y Lee D. *Sensorless Control Of PM Synchronous Generators For Micro Wind Turbines*. Johor Bahru: IEEE, 2008.
- [7] Aguilar N., Flórez J. y Rodríguez J. *Análisis aerodinámico de una turbina de eje vertical para la implementación en la Fundación Universitaria Los Libertadores*. Bogotá, 2018.
- [8] "Mjtrinhobby" *Installing a wind turbine to help power my home!*, recuperado de <https://www.instructables.com/id/Installing-a-wind-turbine-to-power-my-home/>. Trinidad y Tobago: Instructables, 2016.
- [9] López W. (Coordinador general) *Implementación de un programa de desarrollo e investigación de energías renovables en el departamento del Chocó*. San Juan, Chocó: Fondo de Ciencia Tecnología e Innovación, 2017.
- [10] How to Install a Home Wind turbine, recuperado de <https://www.thisoldhouse>.

com/how-to/how-to-install-home-wind-turbine. Texas: This Old House, 2015.

[11] Ochoa Y., Rodriguez J. y Martínez F. *Sistema de regulación y control de carga para aerogenerador de baja potencia*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.

[12] Sharma S., Pradeepkumar K., Dhinesh N., Anbarasu Y., Vignesh S. y et. al. *Development of micro wind turbine for rural livelihood improvement*. Dindigul: Deemed University, 2017.

[13] Ritchie H. y Roser M. *Energy Production & Changing Energy Sources*, recuperado de <https://ourworldinda-ta.org/energy-production-and-changing-energy-sources>. Our World in Data, 2018.

[14] Ministerio de Minas y Energía de Colombia *Sector energía eléctrica*, recuperado de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/23400/05-ENERGIA2010-2011.pdf>. Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2011.

[15] Fadil J., Soedibyo y Ashari M. *Performance comparison of vertical axis and horizontal axis wind turbines to get optimum power output*. Indonesia: IEEE, 2017.

[16] Unidad de Planeación Minero Energética *Plan de Expansión de Referencia, Generación - Transmisión, 2017 - 2031*, Colombia: Ministerio de Minas y Energía, 2017.

[17] Al-Shemmeri T. *Wind Turbines*, p.p. 46, T. Al Shemmeri & Ventus Publishing ApS, 2010.

[18] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, *NTC 5725, AEROGENERADORES. REQUISITOS DE DISEÑO PARA AEROGENERADORES PEQUEÑOS*. Colombia: ICONTEC, 2009.

[19] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificaciones, *NTC 2805, MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATORIAS. ESPECIFICACIONES NOMINALES Y CARAC-*

TERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO. Colombia: ICONTEC, 2011.

[20] CE, Conformité Européenne. Recuperado de: https://ec.europa.eu/growth/single-market/ce-marking_es

[21] RoHS, Restriction of Hazardous Substances. Recuperado de: <http://www.rohsguide.com/>

[22] LDV, Low Voltage Directive. Recuperado de: http://ec.europa.eu/growth/sectors/electrical-engineering/lvd-directive_en

[23] EMC, Electro-Magnetic Compatibility. Recuperado de: <https://www.tuv-sud.com/activity/testing/emc-testing>

[24] Ministerio de Minas y Energía *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas* . Colombia: 2013.

[25] Generador DMKE D5BLD150, recuperado de: alibaba.com

[26] Generador EzPower PMG165, recuperado de: aliexpress.com

[27] Generador MarsRock G100s, recuperado de: amazon.com

[28] Generador AMG power solutions NV-100, recuperado de: aliexpress.com

[29] Generador AMG power solutions NH-100, recuperado de: aliexpress.com

[30] Generador Lecstyle LST-100C, recuperado de: lectstyle.en.made-in-china.com

[31] Generador AVIAN PMG 0.1KW/500RPM, recuperado de: aliexpress.com

[32] Generador TGET TGET165-0.15KW-500R, recuperado de: spanish-alibaba.com

[33] Generador LAISA LS-100SM, recuperado de: alibaba.com

[34] Generador Xinda 100w 130rpm axial flux permanent magnet generator, recuperado de: xindaenergy.com

[35] Agrawal K. C. *Electrical Power Engineering: Reference and Applications Handbook :1*, p.p. 255-256. CRC press, 2005.

[36] IP ratings

<https://www.axair-fans.co.uk/all-technical-information/ip-classification/>

[37] Maciejewski P. e Iwanski G. *Direct Torque Control for Autonomous Doubly Fed Induction Machine based DC Generator*. Warszawa: Warsaw University of Technology, 2017.

[38] Battery bank size calculations, recuperado de: <https://www.leadingedgepower.com/shop/help-advice-faq/help-with-batteries/battery-bank-size-calculations.html>

[39] Missouri, Wind and Solar, recuperado de:

<http://mwands.com/store/12-or-24-volt-digital-charge-controller-unit>