



Diseño de un sistema eólico para la generación de energía eléctrica en Aquitania-Boyacá

**Marco Tulio Villalobos Guerra
Albeiro Rojas Avellaneda**

Universidad Antonio Nariño
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica
Tunja, Colombia
2021

Diseño de un sistema eólico para la generación de energía eléctrica en Aquitania-Boyacá

**Marco Tulio Villalobos Guerra
Albeiro Rojas Avellaneda**

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

Director:

PhD. Ing. Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:

Energías renovables y tecnologías para su aprovechamiento.

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2021

Dedicatoria

Gracias a Dios por abrir mi mente y llenarme de conocimiento, ciencia y entendimiento; sumando personas en mi camino como mi madre Elizabeth Guerra, mi señora Nelcy Sotaban, por su apoyo incondicional. A mis hijos, por sobrellevar mi ausencia entendiendo el camino hacia mis metas. Aunque hubo momentos de desconcierto y pensamientos de renuncia, hoy en día se refleja que la perseverancia una vez más triunfa y da su fruto.

Lucas 2:52. Crecía en sabiduría y en estatura, y en gracia para con Dios y los hombres.

Marco Villalobos

A Dios primeramente porque Él me lo ha dado todo: padres ejemplares que pusieron en mí ese impulso de superarme en conocimiento, para formarme y ser la persona que soy hoy en día; una familia calurosa llena de su amor y apoyo incondicional, conformada por mi esposa Ehiby Tatiana y mis dos hijos Juan Diego y Sebastián Felipe, quienes han sido roca firme y columna fuerte para levantarme en cada intento fallido en la vida; a mis hermanos que han sido ejemplo de superación en cada paso.

Santiago 1:5. Si alguno de ustedes requiere de sabiduría, pídasela a Dios, y él se la dará, pues Dios se la da a todos en abundancia y sin hacer ningún reproche y él se la dará.

Albeiro Rojas

Agradecimientos

A nuestro director, Doctor Carlos Batista, por su orientación en cada paso de este proyecto y en especial por su constante disposición de tiempo y paciencia. Gracias por poner su conocimiento y calidad humana al servicio de nuestro desarrollo profesional.

A la Ingeniera Geidy Pedraza, por su guía y apoyo en el desarrollo de esta investigación.

A los docentes y directivas de la Universidad Antonio Nariño que sembraron su semilla de sabiduría, conocimiento e investigación en nuestra formación como profesionales. La tierra es buena y dará su fruto al ciento por uno Marcos 4:20

Resumen

La energía eólica constituye una de las fuentes viables de implementación para la generación de energía eléctrica en el municipio de Aquitania, departamento de Boyacá. Esto es demostrado en la investigación “Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá”, realizada por la Universidad Nacional de Colombia en 2018, en la cual se encuentra la disponibilidad de viento como posible fuente de producción de energía eléctrica. A partir de esto se hace un estudio de este potencial, con el objetivo de brindar una propuesta de diseño para su implementación, buscando la complementariedad de las fuentes de producción de energía eléctrica en el departamento, disminución de brechas digitales y mitigación en las consecuencias que genera el cambio climático.

Fueron evaluadas zonas del municipio que cumplieran con las características requeridas, con las mejores condiciones de implementación. Se priorizaron zonas no conectadas a la red nacional, con el objetivo de llegar a las de difícil acceso en la región. Se escogió Mombita del municipio de Aquitania, apta en potencial eólico y con el mayor número de casas sin suministro eléctrico, con el propósito de impactar a la mayor cantidad de personas. Al conocer las condiciones del territorio se desarrollaron los estudios de cálculo y dimensionamiento de equipos. Se propone un diseño con un generador ZONHAN ZH1.5 KW con el fin de garantizar el suministro de energía eléctrica a partir de un sistema autónomo a 17 viviendas, que constituyen la zona identificada.

Palabras clave: Eficiencia energética, energía eólica, fuentes renovables, impacto, velocidad del viento.

Abstract

Wind energy constitutes one of the viable sources of implementation for the generation of electrical energy in the municipality of Aquitania, department of Boyacá. This is demonstrated in the research "Identification of projects with potential for the generation of wind energy as a complement to other sources of electricity generation in the department of Boyacá", carried out by the National University of Colombia in 2018, in which the availability of wind as a possible source of electrical energy production. Based on this, a study of this potential is made, with the aim of providing a design proposal for its implementation, seeking the complementarity of the sources of electricity production in the department, reducing digital gaps and mitigating the consequences that generates climate change.

Areas of the municipality that met the required characteristics were evaluated, with the best implementation conditions. Areas not connected to the national network were prioritized, with the aim of reaching those with difficult access in the region. Mombita from the municipality of Aquitania, suitable in wind potential and with the largest number of houses without electricity supply, was chosen in order to impact the largest number of people. Knowing the conditions of the territory, the calculation and dimensioning studies of equipment were developed. A design with a ZONHAN ZH1.5 generator is proposed in order to guarantee the supply of electrical energy from an autonomous system of 17 homes that make up the identified area.

Keywords: Energy efficiency, wind power, renewable sources, impact, wind speed.

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Marco referencial para el diseño de un sistema eólico	7
1.1 La energía eólica como potencial energético en el mundo	7
1.2 América Latina y el Caribe frente a los retos en energías renovables	11
1.3 Colombia con miras a la transición energética	15
1.4. Potencial de energía eólica en Boyacá.....	18
1.5. Aquitania: territorio de análisis y exploración eólica.....	19
1.6. La energía eólica.....	24
1.7. El viento y su función como potencial energético	24
1.8. Sistemas eólicos	24
1.9. Impactos ambientales	29
1.10. Regulación y normatividad en Colombia	30
Capítulo 2: Metodología de diseño del sistema eólico para Aquitania-Boyacá.....	33
Capítulo 3: Resultados.....	35
Fase I: Búsqueda de información relevante	35
I.1: Análisis de estudios locales precedentes	35
I.2: Investigación y análisis del recurso eólico en Aquitania-Boyacá.....	36
Fase II: Reconocimiento de la zona	38
II.1: Estado de cobertura del municipio Aquitania – Boyacá	38
Fase III: Requerimientos de potencial eléctrico.....	46
III.1: Estudio del consumo energético.....	46
III.2: Estudio del potencial eólico de zona rural Mombita del municipio de Aquitania-Boyacá.....	49
III.3: Selección de componentes electromecánicos del sistema	51
Fase IV: Lineamientos de estructura física	69
Fase V: Presupuesto del sistema.....	69
Conclusiones.....	71
Recomendaciones.....	73
Anexos	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Matriz energética mundial 2019.....	8
Figura 2. Capacidad instalada de energía eólica [GW] 1980 – 2019.	9
Figura 3. Capacidad instalada energía eólica por país [MW] 2019.	10
Figura 4. Porcentaje participación en el mercado mayores fabricantes turbinas eólicas 2019.....	11
Figura 5. Participación de energías renovables en ALC en 2018 (en porcentajes).	12
Figura 6. Capacidad instalada por tipo de fuentes en América del Sur, 2010 y 2018 (MW).....	13
Figura 7. Participación de energías renovables en América del Sur en 2018 (en porcentajes)	13
Figura 8. Capacidad total instalada por año en Colombia y participación por tipo de fuente, 2015 y 2018 (en porcentajes).....	15
Figura 9. Capacidad proyectada para implementación en Colombia [MW] 2019 - 2030. 16	
Figura 10. Parque eólico Jepírachi.	17
Figura 11. Proyectos eólicos proyectados en Colombia.	17
Figura 12. Índice de cobertura de energía eléctrica en el departamento de Boyacá en el año 2016.....	19
Figura 13. Mapa del Área de estudio: Colombia, Boyacá - Municipio de Aquitania.	20
Figura 14. Mapa veredal de Aquitania, Boyacá.	21
Figura 15. Esquema simplificado de un sistema de generación eólica.	25
Figura 16. Clasificación de Turbinas eólicas.	25
Figura 17. Turbinas a) barlovento y b) sotavento.	26
Figura 18. Turbinas eólicas de eje vertical. A) Savonius, b) Darrieus, c) Tipo H.....	27
Figura 19. Sistema eólico aislado para uso residencial.	27
Figura 20. Diseño cuya conexión puede referirse a cualquier HVAC-HVDC.	29
Figura 21. Leyes para promoción de energía eólica en Colombia.	30
Figura 22. Normatividad sobre energías renovables en Colombia.....	31
Figura 23. Promedio horario de la velocidad del viento estación Aquitania.	37
Figura 24. Índice de cobertura del municipio de Aquitania.	39
Figura 25. Viviendas sin energizar en Aquitania 2016.....	40
Figura 26. Zona definida para la implementación del sistema eólico.	43
Figura 27. Territorio definido para la implementación del sistema eólico.	44
Figura 28. Vista de la zona propuesta para la implementación del sistema.....	44
Figura 29. Otra perspectiva de la zona definida.	45
Figura 30. Viviendas a energizar con el sistema de generación eólico.....	45
Figura 31: Curva de producción del aerogenerador ZONHAN ZH1.5.....	55
Figura 33. Distribución de las cargas del sistema eólico.	69

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Top 10 en capacidad en energía eólica en el mundo en (GW). Fuente: (Santander, 2020).	9
Tabla 2. Valor agregado municipal sectores de mayor importancia de la economía municipal. Fuente: (Cardozo, 2016).....	22
Tabla 3: Actividades económicas según industria y comercio. Fuente: (Cardozo, 2016).22	22
Tabla 4: Distribución poblacional por vereda. Fuente: (Cardozo, 2016).	23
Tabla 5. Zonas del municipio de Aquitania sin cobertura eléctrica.	40
Tabla 6. Consumo de cargas requeridas.....	47
Tabla 7: Demanda de energía eléctrica del sistema.	49
Tabla 8. Características técnicas del aerogenerador ZONHAN ZH1.5.	52
Tabla 9: Capacidad de conductor a utilizar (Mercadolibre, s.f.).....	64
Tabla 10: Capacidad de conductor a utilizar (ENSA).	65
Tabla 11: Uso de postes normalizados (ENSA).	66
Tabla 12: Costos del equipo de generación eólica propuesto en COL.	70
Tabla 13: Velocidad promedio del viento en municipios con condiciones similares a Aquitania.	75
Tabla 14: Velocidad promedio del viento municipio Aquitania.....	77

Introducción

El uso de energías alternativas se ha convertido en un tema de investigación trascendental a nivel mundial. El problema de calentamiento global, producido por las altas emisiones de gases de efecto invernadero a causa del uso de fuentes de energía convencionales, ha hecho necesaria una evolución enfocada a la transición energética que mitigue el detrimento ambiental. Surge entonces la necesidad de aprovechar las energías renovables, las cuales provienen de fuentes naturales inagotables, capaces de ser renovadas por medios igualmente naturales. Esto, a su vez, permite hacer más eficientes las producciones industriales y mejorar la calidad de vida de la sociedad en general, reduciendo los niveles de contaminación en escalas de gran magnitud.

En Colombia se aprueba en 2014 la Ley 1715, la cual tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional (MinMinas GM - GREG, 2017). Además, constituye sustento y motivación para que empresas, industrias y la comunidad en general vean las energías renovables como una fuente de ahorro y sostenibilidad ambiental.

En aras de establecer un nivel de conciencia, llevado a futuro como un estilo de vida, por medio de la transición energética, la academia centra sus estudios en la innovación, uso e implementación de estas fuentes de energía. La Universidad Nacional, en el año 2018, a través de un estudio denominado “Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá”, logra demostrar el recurso eólico existente en el departamento de Boyacá. En este estudio se identificaron oportunidades de desarrollo eólico y se planteó la creación de cuatro parques eólicos con capacidad total instalada de 52,5 MW, mediante 21 aerogeneradores de potencia nominal de 2,5 MW que producirían una energía neta de

200020 MWh/año, con factores de carga superiores al promedio global ponderado del 2017 para la energía eólica *offshore* (Siabato, 2018). Una de las zonas identificadas en este estudio corresponde al municipio de Aquitania. Sin embargo, es un territorio limitado porque es dedicado a la agricultura, por lo que el estudio plantea situar dos aerogeneradores únicamente. Se busca identificar una zona de mayor extensión con el fin de plantear la implementación de un parque que garantice el máximo aprovechamiento del potencial eólico encontrado en el municipio.

Actualmente, Colombia apunta a una transición energética sostenible, además de contribuir al desarrollo de la matriz energética. Al ser un país con territorios geográficamente potenciales y un nivel climático favorable, se busca que se convierta en un país pionero en energías renovables. La revista GO ECO GREEN21, en su edición de septiembre de 2020, resalta que: Las fuentes no convencionales de energías renovables, serán protagonistas de la reactivación sostenible de Colombia. El país cuenta con 14 proyectos para la generación a partir de este tipo de tecnologías, nueve eólicos y cinco solares, que suman más de \$7 billones en inversión y más de 6 mil empleos, en La Guajira, Cesar, Tolima, Córdoba y Valle del Cauca (GREEN21, 2020).

Colombia cuenta actualmente con un parque eólico llamado “Jepírachi”, que en “Wayuunaiki” significa “vientos que vienen del nordeste”. Es el primer parque para la generación de energía eólica construido en Colombia pertenece a Empresas Públicas de Medellín EPM. Está conformado por 15 aerogeneradores marca Nordex N60/ con una capacidad de 1.300 kW cada uno, para una capacidad instalada total de 19,5 MW de potencia nominal (EPM, 2010).

Esta investigación fija su análisis en el departamento de Boyacá, que cuenta con 123 municipios y posee una condición favorable en recursos renovables de energía asociados al viento, contando con velocidades de vientos iguales o superiores a 5 m/s en varios meses del año. Dada su localización y accesibilidad al Sistema Interconectado Nacional (SIN), representa una opción idónea para la implementación de nuevas fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), que contribuyan a mejorar los niveles de confiabilidad del sistema de energía actual en el territorio (Siabato, 2018).

Se busca establecer las condiciones de diseño que permitan viabilidad técnica para la implementación de un sistema de generación eléctrica a partir del potencial eólico disponible en la zona de Aquitania, Boyacá. La introducción de las energías renovables representa múltiples beneficios en el municipio de Aquitania, traería consigo mejoras en la eficiencia del uso de la energía, yendo a la par con los cambios tecnológicos enfocados a la conservación del medio ambiente. Ello contribuiría a consolidar al departamento de Boyacá como una región con potencial en producción energética, en aras de mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero.

Justificación

Una de las fuentes de energía renovable que actualmente está siendo implementada por varios países y que ha demostrado alta eficiencia y contribución al desarrollo económico y sostenibilidad ambiental, es la generación eólica. La energía eólica es aquella proveniente del movimiento de una masa de aire que se presenta en forma de viento. Al igual que la mayoría de las fuentes de energía renovables, está estrechamente relacionada con el Sol, ya que son las diferencias de temperatura entre las distintas zonas geográficas de la tierra, las que producen la circulación de aire (Perdomo, Jaimes, & Almeida, 2014)

Antes de implementar proyectos de generación eólica, es necesario e importante realizar análisis, con el fin de obtener los índices que describan el efecto real de estos factores sobre el entorno del municipio. Para ello, se deben establecer los puntos de ubicación más adecuados para la obtención de datos meteorológicos, que se aproximen acertadamente al municipio objeto de investigación. Igualmente, se deben determinar los lugares en los cuales son promisorias las fuentes de aprovechamiento energético.

Mediante este tipo de trabajos se vislumbran nuevos horizontes de generación que pueden ser adoptados por los entes gubernamentales, las empresas relacionadas y la academia que quieran apostar por la implementación de los sistemas de energía renovable en el departamento, maximizando el uso de energías no convencionales en Boyacá. Esto lo llevará a ser uno de los territorios, no solo con mayor potencialidad de recursos para la implementación de energías renovables, sino en uno de los departamentos pioneros en el

estudio, uso, aporte en la contribución del desarrollo energético y por lo tanto económico, social y ambiental del país.

Al identificar la región con condiciones geográficas que permitan una instalación mayor y con condiciones propicias, es necesario hacer un análisis ambiental sobre las implicaciones que tendría la implementación de un sistema eólico, así como los recursos existentes en la zona, ya que de esto depende la no afectación por otros factores al ecosistema.

Como punto final de este trabajo, se establece el diseño técnico, modelado matemático, y demás requerimientos eléctricos y/o mecánicos que debe cumplir el sistema de generación de energía eléctrica a partir de un sistema eólico, según requerimientos analizados con anterioridad en el proyecto.

Identificación del problema

Es conocida la vulnerabilidad que presenta el sistema interconectado nacional (SIN) para suplir las demandas requeridas con generación hidroeléctrica debido a los fuertes períodos de estiaje que ha vivido el país en los últimos veinticinco años, a los altos costos asociados a la generación térmica y sus grandes emisiones de carbono. Por tales razones, resulta necesario evaluar y emplear fuentes de generación alternativas que no se vean afectadas por las variaciones constantes en las precipitaciones del país y que además reduzcan las emisiones de carbono (Siabato, 2018).

Sumado a esta problemática, el aumento de temperatura con reducción significativa de lluvias, el fenómeno de El Niño amenaza la seguridad en el suministro por reducción de la oferta e incremento de la demanda. Igualmente, genera pérdidas económicas por el pago de electricidad con altos precios y amenaza los ingresos de los generadores hidroeléctricos por una menor generación (UPME, 2013). Como consecuencia de estas situaciones, las centrales termoeléctricas representan en promedio el 36% de las emisiones del país del sector económico de minas y energía, el cual a su vez presenta el 10% de las emisiones totales del país (IDEAM, 2016), y sin embargo generan continuamente. Por lo anterior, es

importante realizar inversiones en nuevos proyectos de generación y obras de transmisión asociadas, a fin de recuperar los niveles de confiabilidad que la normatividad señala y reducir las emisiones del sistema (UPME, 2013).

La variabilidad climática ha tenido un gran impacto en el departamento de Boyacá. Esto se evidencia en fenómenos como las heladas en las zonas de mayor altitud y períodos secos más intensos, ocasionando importantes cambios en el desarrollo de las dinámicas regionales del departamento y sus diferentes sectores productivos conllevando a la afectación de las condiciones ambientales (Novoa, 2020).

El municipio de Aquitania, ubicado en la provincia de Sugamuxi, está siendo afectado por las consecuencias de este cambio climático, al ser una región cuya economía es principalmente agropecuaria. El sector primario de la economía de Aquitania está representado en ganadería (ganado bovino de raza criolla), agricultura (cebolla junca o larga, arveja, maíz, y papa), explotación de bosques nativos y minería (Montañez, 2018). La calidad y preservación del suelo y el medio ambiente es trascendental para el progreso de la región, sin embargo, este está siendo aquejado drásticamente por los efectos del calentamiento global, causados por las altas emisiones de gases de efecto invernadero.

Según el IDEAM 2019, la disponibilidad del recurso hídrico en las temporadas de sequía afecta al 35% de los municipios del departamento (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales , 2018). Asimismo, según el Estudio Nacional del Agua – ENA del año 2018, el departamento de Boyacá presentó un gran potencial de erosión hídrica debido a la pendiente de los suelos y a las condiciones de intervención antrópica sobre la vegetación, lo que desmejora las condiciones del suelo, afecta su calidad para actividades agrícolas y reduce a su vez la capacidad de retención de agua, lo que incrementa la vulnerabilidad departamental frente a fenómenos climáticos (Novoa, 2020), (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales , 2018).

Además, evidencian las implicaciones que tiene la variabilidad climática sobre la región y cómo fenómenos como las heladas, en las zonas de mayor altitud y períodos secos más intensos, en un intervalo de tiempo corto (inferior a 30 años), ocasionan importantes cambios en el desarrollo de las dinámicas regionales del departamento y sus diferentes sectores productivos. En consecuencia, se afecta la calidad de las condiciones

ambientales para la gestión de bienes y servicios ambientales, así como de productos de diferente índole (Novoa, 2020).

Por lo tanto, con el fin de aprovechar el potencial eólico del municipio de Aquitania y en consecución de la mitigación de las problemáticas enunciadas anteriormente, surge la necesidad de detectar una zona con condiciones geográficas y ambientales que brinden un mayor aprovechamiento del potencial eólico de la región. Este análisis servirá de insumo para la propuesta de un diseño de generación eléctrica a partir del potencial eólico, para garantizar la viabilidad de un proyecto de generación de energía eólica en el municipio de Aquitania – Boyacá.

El problema puede plantearse a través de la siguiente pregunta:

¿Cómo diseñar un sistema de generación de energía eléctrica a partir del potencial eólico en el municipio de Aquitania – Boyacá y analizar la factibilidad de su implementación?

Objetivo general

Diseñar un sistema de generación de energía eléctrica a partir del potencial eólico en el municipio de Aquitania - Boyacá.

Objetivos específicos

- Investigar los estudios realizados sobre generación de energía eléctrica a partir de sistemas eólicos, y del recurso eólico en la región.
- Realizar una evaluación que defina la región del municipio con condiciones adecuadas para la implementación y aprovechamiento del potencial eólico.
- Establecer los requerimientos eléctricos para el diseño del sistema de generación a partir del potencial eólico del municipio.
- Determinar los requerimientos mecánicos para el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica, a partir de turbinas eólicas en el municipio de Aquitania, Boyacá.

Capítulo 1: Marco referencial para el diseño de un sistema eólico

1.1 La energía eólica como potencial energético en el mundo

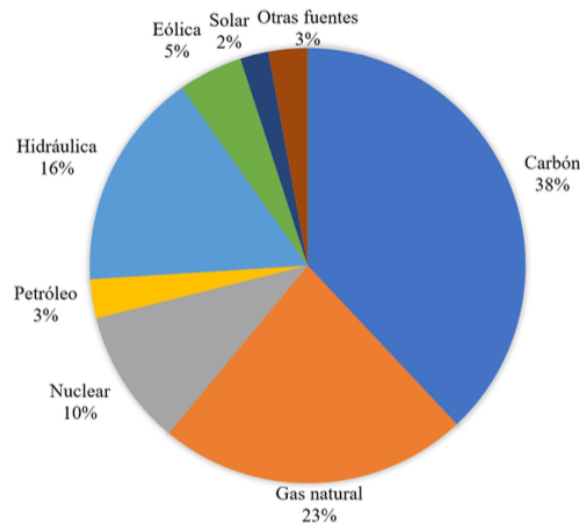
El viento ha sido usado a lo largo de la historia de la humanidad como un recurso de subsistencia y calidad de vida, ha marcado el desarrollo de los pueblos y ha sido una de las fuentes donde se constituyen las culturas y creencias de varias sociedades. Su uso como potencial para la producción de energía eléctrica se remonta a Dinamarca en el siglo XIX. El danés Poul la Cour (1846-1908), que tuvo originalmente una formación como meteorólogo, fue el pionero de las modernas turbinas eólicas generadoras de electricidad. En 1891 construyó su primera turbina eólica para generar electricidad destinada a la producción de hidrógeno, por electrólisis, que usaba como combustible en su escuela (Castro, 2008).

A partir de entonces comienza el estudio del potencial energético del viento, como fuente de grandes perspectivas de desarrollo en el mundo. La energía eólica hoy en día es uno de los temas de mayor auge a nivel de investigación y aún más a nivel de prospección económica. Las crisis energéticas presentadas en el mundo, las fluctuaciones en el precio del petróleo y la incertidumbre en su producción han ocasionado una inseguridad respecto a la estabilidad de la matriz energética de los países. Sumado a esto, el calentamiento global producido por las altas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se ha convertido en una problemática de grandes dimensiones, en la cual el uso de combustibles fósiles aporta gran parte a su incremento. Por estas razones, acuerdos mundiales como la Conferencia 21 de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el

Cambio Climático (COP 21) buscan que los gobiernos vuelquen esfuerzos en el uso de energías limpias, contribuyendo así en la disminución de emisiones de GEI.

El desarrollo de las fuentes renovables en el mundo ha estado determinado por factores como: financiación de las empresas, nivel investigativo, conciencia ambiental y en especial por la capacidad de adaptación de los gobiernos a las nuevas formas de mitigación del cambio climático y sostenibilidad económica. Esto se muestra en la medida en la que países a la fecha han logrado grandes desarrollos en su camino a la transición energética, mientras que en otros aún sigue siendo un tema rezagado. En la Figura 1 se muestran la participación en la matriz energética mundial de las fuentes de energía renovables y no renovables (Sosapanta, 2020).

Figura 1. Matriz energética mundial 2019.

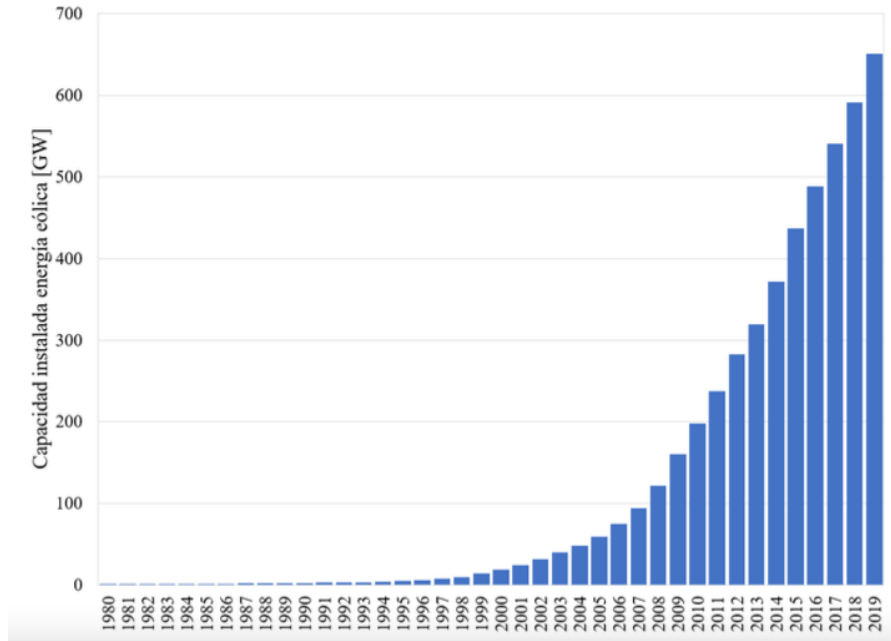


Fuente: (Sosapanta, 2020).

Se denota el dominio de fuentes energéticas que usan combustibles fósiles para su producción. El carbón, con un 38%, sigue constituyendo una de las principales fuentes energéticas del mundo. Sin embargo, el uso de combustibles fósiles era más predominante antes de la crisis del petróleo. Luego de esta, muchos países empezaron a ver su dependencia de este recurso agotable, volcando miradas hacia un horizonte de complementariedad en sus matrices energéticas. A partir de entonces y hasta la actualidad, la capacidad instalada de energía eólica a nivel mundial ha aumentado

exponencialmente, como se muestra en la Figura 2, con un crecimiento anual promedio de 15,2% en la última década (Oliveira, 2013) (Sosapanta, 2020).

Figura 2. Capacidad instalada de energía eólica [GW] 1980 – 2019.



Fuente: (Sosapanta, 2020).

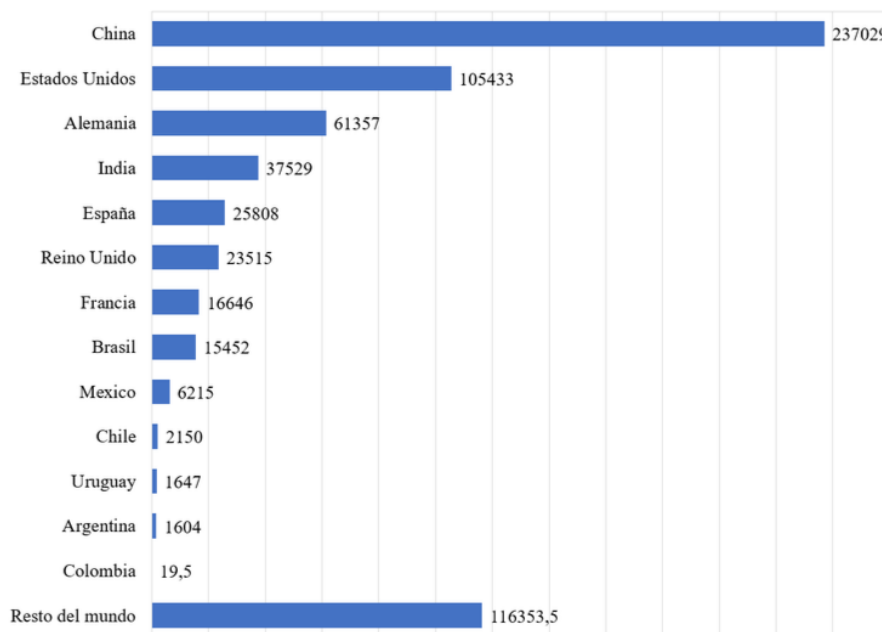
En la Tabla 1 se muestran los 10 principales países con mayor capacidad instalada de energía eólica en el mundo.

Tabla 1: Top 10 en capacidad en energía eólica en el mundo en (GW). Fuente: (Santander, 2020).

	2018
China	211.392
Estados Unidos	96.665
Alemania	59.311
India	35.039
España	23.484
Reino Unido	20.970
Francia	15.309
Canadá	12.805
Brasil	14.702
Italia	9.958
Resto del mundo	90.788

A nivel mundial, los países con mayor capacidad de infraestructura eólica son China, Estados Unidos y Alemania; sin embargo, la mayor parte de la demanda energética en estos países proviene de fuentes no renovables de energía (Pitteloud, 2019). En la Figura 3 se muestra un comparativo de la energía eólica instalada en la actualidad en los países líderes en esta tecnología, a nivel mundial y latinoamericano (Sosapanta, 2020).

Figura 3. Capacidad instalada energía eólica por país [MW] 2019.



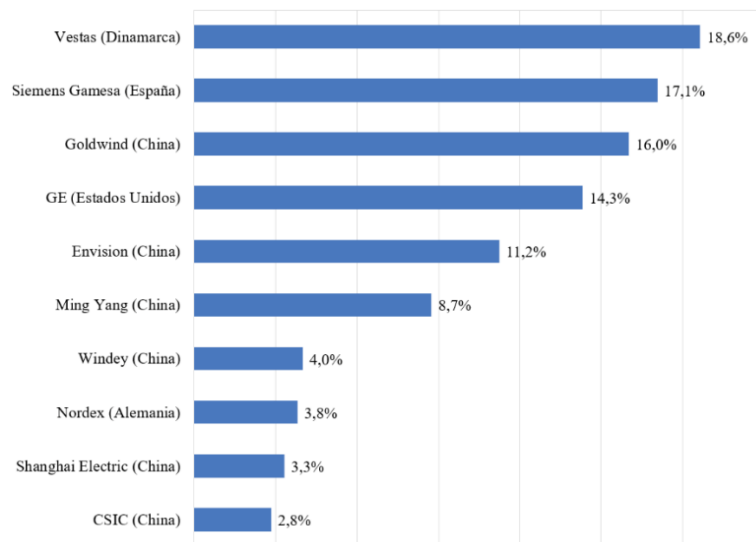
Fuente: (Sosapanta, 2020).

Es así como diferentes países, al interesarse en una nueva fuente de producción energética y con el horizonte de innovación y apertura de nuevas oportunidades económicas, se han abierto el mercado de fabricación de turbinas eólicas. Los diez mayores fabricantes de turbinas eólicas en el mundo aparecen en la Figura 4 (Sosapanta, 2020). Actualmente, este sigue siendo un tema de investigación. Los países pioneros en este tema pretenden agregar componentes de innovación que brinden mayor eficiencia energética y con ello la apertura a nuevos mercados.

Al surgir nuevos mercados de producción de turbinas se avizora una oferta, en la cual países que aún no han podido acceder masivamente a esta tecnología tienen mayores

posibilidades de empezar a implementar con mayor crecimiento este tipo de producción energética en sus territorios.

Figura 4. Porcentaje participación en el mercado mayores fabricantes turbinas eólicas 2019.



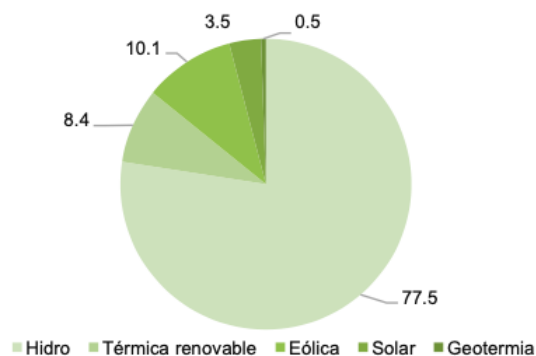
Fuente: (Sosapanta, 2020).

1.2 América Latina y el Caribe frente a los retos en energías renovables

América Latina y el Caribe han venido incorporando procesos en avance de implementación de fuentes de energía renovables. En el caso de la energía eólica, se ha consolidado como la mayor fuente de energía renovable variable, con aproximadamente 25 GW instalados en 2018, lo que representa un aumento de participación de 0.5 a 5.9% desde 2010 a 2018 (Messina, 2020). La región se percibe como una fuente de desarrollo en energías renovables, razón por la cual, las inversiones extranjeras han ido aumentando, permitiendo un mayor progreso en su apertura esto ya que en especial la energía solar y eólica han disminuido los costos de sus tecnologías drásticamente, por ello se registró un significativo avance en la inversión en estos proyectos en los últimos tres años (2015-2018).

Es así como en los países de América Latina y el Caribe (ALC) la energía renovable constituye alrededor de 247 GW de capacidad acumulada al año 2018; 191 GW corresponden a hidroenergía, representando esta fuente un 77.5% de la capacidad total acumulada de renovable al 2018. La energía eólica registra importantes avances en capacidad instalada, pues ha sumado 11 GW de potencia desde el 2010 al 2018, alcanzando 25 GW instalados. La capacidad instalada de energía térmica renovable (biomasa), es de 20.6 GW en 2018, mientras que la solar es de 8.7 GW y la geotermia 1,3 GW, según como se muestra en la Figura 5 (Messina, 2020).

Figura 5. Participación de energías renovables en ALC en 2018 (en porcentajes).



Fuente: (Messina, 2020) sobre la base de datos de SIELAC-OLADE.

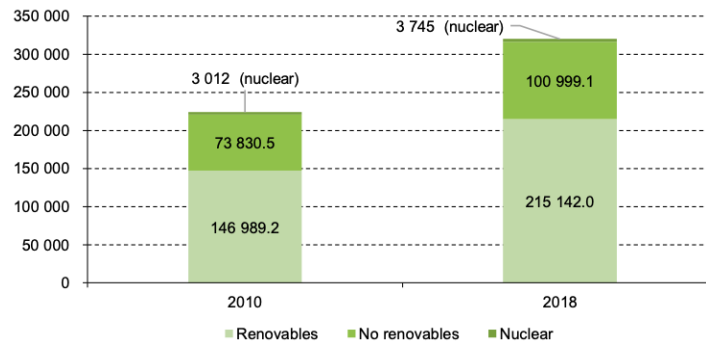
La hidroelectricidad se mantiene como una tecnología costo - eficiente, constituyendo la principal fuente de generación de ALC (Messina, 2020). Según tal tendencia, esta tecnología se mantendrá en el tiempo; sin embargo, es fuente de soporte en la entrada de energías renovables variables como la eólica.

En cuanto a América del Sur, en el período comprendido entre 2010 a 2018, la Figura 6 muestra que se instaló más energía renovable que fósil, alrededor de 68 GW adicionales de potencia renovable fueron instalados en dicho período, mientras que no renovable se instalaron 27 GW (Messina, 2020).

Analizando la matriz energética renovable, en la Figura 7 se observa que 80.8% de la capacidad renovable es hidroenergía, seguida por energía eólica con 8.8%, energía solar 2.6% y la energía térmica renovable cubre 7.8% (Messina, 2020). De esta manera, se

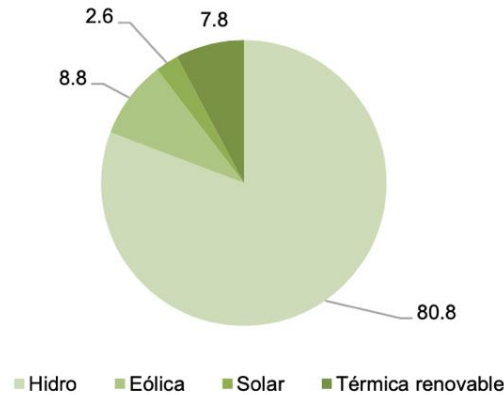
evidencia el gran potencial de desarrollo de la energía eólica en América del Sur, como consecuencia del interés general para producir energía a menor costo y de manera sostenible para el medioambiente.

Figura 6. Capacidad instalada por tipo de fuentes en América del Sur, 2010 y 2018 (MW).



Fuente: (Messina, 2020) sobre la base de datos de SIELAC-OLADE.

Figura 7. Participación de energías renovables en América del Sur en 2018 (en porcentajes)



Fuente: (Messina, 2020) sobre la base de datos de SIELAC-OLADE.

En el contexto latinoamericano, aproximadamente el 90% de la energía eólica instalada se construyó en la década 2010 – 2020. Esta posición rezagada se explica en la aparente poca necesidad de implementar nuevas fuentes de energía, pues en la mayoría de los países latinoamericanos, al igual que en Colombia, la tecnología más usada es la hidráulica (Ruiz, 2017), (Sosapanta, 2020). Además, las bajas emisiones de CO₂ al usar este tipo de tecnología no permitían ver la necesidad de una transición energética que complementara la matriz energética. Sin embargo, las sequías por las cuales ha atravesado esta región ha

sometido a sus países a crisis de deficiencia en el recurso energético. Por este motivo, es importante volcar esfuerzos en aras de la preservación ambiental, que vaya de la mano con el desarrollo de las matrices energéticas de los países en miras de permearlas de una sostenibilidad ambiental, social y económica de prevalencia y calidad.

En Latinoamérica y el Caribe, los líderes en energía eólica instalada son Brasil, México y Chile. Estos países ya han realizado procesos de subastas para incrementar la participación de las FNCER, creado de esta manera un escenario favorable para los inversionistas y que se soporta en leyes, mecanismos públicos e incentivos de financiación (Ruiz, 2017) (Sosapanta, 2020).

Brasil ha adoptado dos sistemas: la liberalización del mercado de energía y el Programa de Incentivos para Fuentes de Electricidad Alternativas (PROINFA) decretado en el 2002, que se complementó con las subastas iniciadas en el 2009. Sumado a esto, Brasil se ha convertido en centro de producción de turbinas eólicas (Ruiz, 2017) (Sosapanta, 2020).

México, por su parte, promovió la Ley de Transición Energética mediante la cual se han desarrollado subastas que han facultado el aumento en la cantidad de empresas ofertantes de energía, y por lo tanto la disminución del costo de la energía eléctrica (Ruiz, 2017).

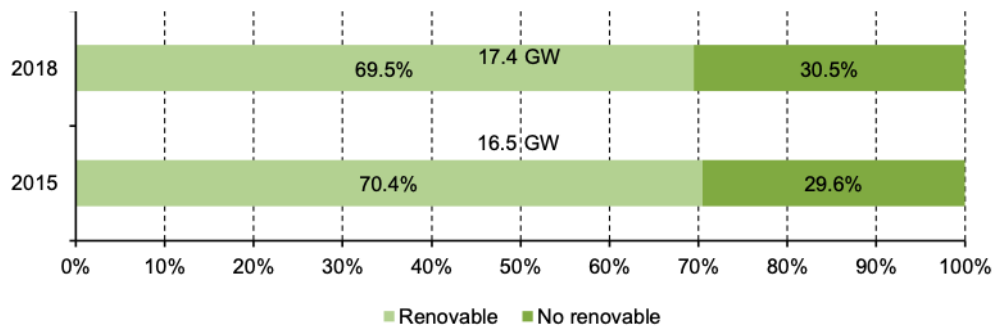
Chile, en una búsqueda para desligarse de la dependencia del suministro de gas natural desde Argentina, ha establecido una propuesta a largo plazo de diversificación de la matriz energética, donde las FNCER son una componente indispensable. Sin embargo, no han promovido las reglamentaciones referentes a incentivos fiscales en proyectos de energías renovables. Chile es uno de los países con mayor dependencia de combustibles fósiles en Latinoamérica en la generación de electricidad, para lo cual se ha implantado un impuesto al uso del carbón (Ruiz, 2017).

1.3 Colombia con miras a la transición energética

En Colombia, la matriz energética es fundamentada en la generación hidroeléctrica, siendo expuesta a la fluctuación de las variaciones climáticas, en especial en períodos de sequía. La riqueza de Colombia en recursos hídricos explica que actualmente el 69,2% de la generación de energía se realice con fuentes hidráulicas (Sosapanta, 2020). Esto ha conllevado a un panorama de incertidumbre, en el cual se hace necesaria la implementación de nuevas fuentes de generación que contribuyan a la complementariedad de la matriz energética del país.

Al analizar la participación de energías renovables variable (Figura 8), se constata que Colombia no ha incorporado estas energías significativamente, ya que entre energía eólica y solar suman 103.28 MW. Por otro lado, la energía térmica renovable alcanza solo un 0.8% de participación, con 145.15 MW instalados (Messina, 2020).

Figura 8. Capacidad total instalada por año en Colombia y participación por tipo de fuente, 2015 y 2018 (en porcentajes).



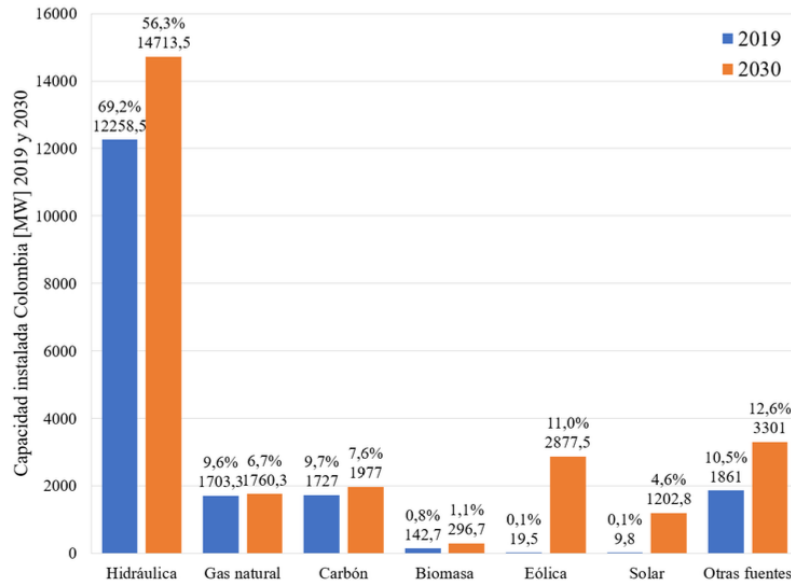
Fuente: (Messina, 2020).

Actualmente, la energía eólica suplente únicamente el 0,1% de la demanda eléctrica nacional. Uno de los motivos es la falta de empresas públicas y privadas que quieran apostar por estas energías, ocasionada por un contexto normativo donde no son claros los mecanismos de ingreso de la energía eólica en el mercado eléctrico (Sosapanta, 2020). Frente a esta situación, la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), entidad encargada de planear y financiar el desarrollo de los recursos energéticos en la expansión de las redes eléctricas, tiene como uno de sus objetivos suplir el 11,0% de la demanda

eléctrica nacional con energía eólica para finales de la década 2020 – 2030, como se indica en la Figura 9 (UPME, 2017).

En consonancia con el plan indicativo mencionado anteriormente, y al compararlo con un horizonte de futuro mas largo, establecido en el Plan Energético 2050 publicado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), estipula que en el año 2050 se cuente con una generación en base a fuente fotovoltaica de 0.5% y fuente eólica de 1.7%. Actualmente, la participación de ambas fuentes es de 0.02% y 0.06%, respectivamente (Messina, 2020). Se avizora una perspectiva donde es necesaria la suma de voluntades por parte de todos los sectores económicos, en especial del Gobierno, en fijar planes estratégicos que vayan encaminados al cumplimiento de los planes fijados por la UPME. De tal forma se involucraría al país en un camino de transición energética que no solo mitigue el calentamiento global, sino que brinde nuevas perspectivas en términos económicos y por ende de desarrollo.

Figura 9. Capacidad proyectada para implementación en Colombia [MW] 2019 - 2030.



Fuente: (Sosapanta, 2020).

El aporte actual de energía eólica en el país (0,1%) es proporcionado por el parque eólico Jepírachi (ver Figura 10), ubicado cerca de Puerto Bolívar, y el Cabo de la Vela en el

municipio de Uribia (La Guajira). Este parque eólico, propiedad de EPM, es el primero y hasta el momento el único en el país (Sosapanta, 2020).

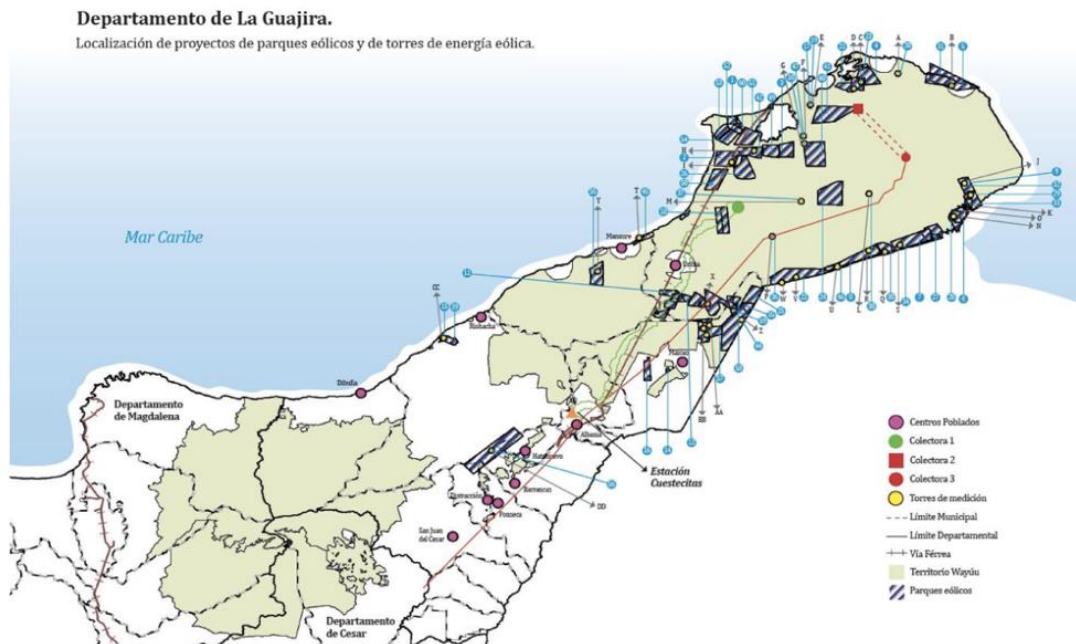
Como se mostró en la Figura 2, la energía eólica ha tenido un crecimiento exponencial en las últimas décadas. Para este propósito, actualmente en Colombia se encuentran en formulación 57 proyectos de parques eólicos, los cuales son llevados a cabo por 13 organizaciones multinacionales y 5 organizaciones locales. La ubicación planeada de estos 57 proyectos sería en el departamento de La Guajira, como se ilustra en la Figura 11 (Sosapanta, 2020).

Figura 10. Parque eólico Jepírachi.



Fuente: adaptado de Empresas Públicas de Medellín (2010).

Figura 11. Proyectos eólicos proyectados en Colombia.



Fuente: adaptado de (González, 2019).

En el país existen otros lugares donde se considera existen condiciones favorables de viento. Algunos son: San Andrés y Providencia, alrededores de Villa de Leyva, zonas aledañas a Cúcuta, algunas zonas de Santander, en Risaralda, en Vallé del Cauca, Huila, Boyacá (Perdomo, Jaimes, & Almeida, 2014). Es necesario entonces fijar la mirada en estas regiones, con el objetivo de maximizar esfuerzos que vayan en consonancia con el aprovechamiento del recurso eólico a lo largo del territorio colombiano.

Lo anteriormente explicado abre un horizonte de posibilidades de crecimiento para el país, y del cumplimiento de acuerdos establecidos, tales como el fijado en el Acuerdo de París, cuyo principal objetivo es limitar el incremento de la temperatura a 2°C para finales del siglo, tomando como referencia la temperatura terrestre de la era preindustrial. El Acuerdo de París considera además otros factores, como la reducción de emisiones, el compromiso de los países, la transparencia, los mecanismos de mercado, el compromiso financiero y las estrategias de cumplimiento (Iberdrola, 2020).

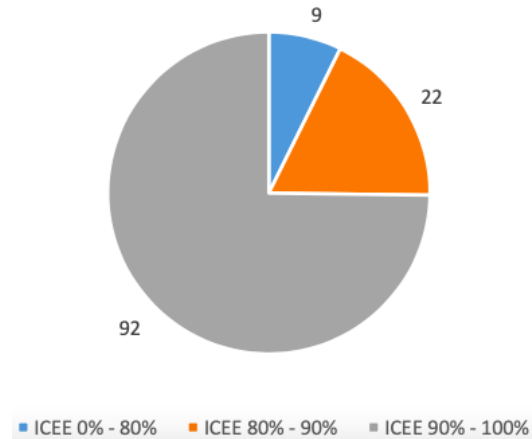
1.4. Potencial de energía eólica en Boyacá

Actualmente, la Empresa de Energía de Boyacá (EBSA) distribuye y comercializa la electricidad, además de contribuir a la modernización de las subestaciones del departamento (EBSA, 2017). El departamento cuenta con líneas de transmisión del Sistema Interconectado Nacional y las subestaciones Sochagota y Paipa. Dada su localización y la accesibilidad al SIN, Boyacá representa una opción idónea para la implementación de proyectos de generación complementarios que contribuyan a mejorar los niveles de confiabilidad del Sistema Interconectado Nacional.

El Departamento de Boyacá tiene 123 municipios, de los cuales 122 son atendidos por la Empresa de Energía de Boyacá S.A. - E.S.P. prestándole el servicio de energía a 351.004 clientes, 198.932 urbanos y 152.072 rurales. La Empresa de Energía de Boyacá S. A. E.S.P. participa en la actividad de Transmisión Nacional, por ser propietaria de dos módulos de línea para los circuitos a 230 kV Paipa, Sochagota, en la subestación Paipa. Por otro lado, EBSA es propietaria de la tercera parte del tramo en territorio colombiano de la línea El Corozo (Venezuela) - San Mateo (Colombia) a 230 kV, e igual participación en la propiedad de uno de sus módulos. Estos activos, que por disposiciones regulatorias son

considerados de conexión, son utilizados para exportación de energía eléctrica a Venezuela (XUÉ & Barión, 2020) . En la Figura 12 se muestra el nivel de cobertura en el departamento para el año 2016 (último año de actualización suministrado por la UPME).

Figura 12. Índice de cobertura de energía eléctrica en el departamento de Boyacá en el año 2016.



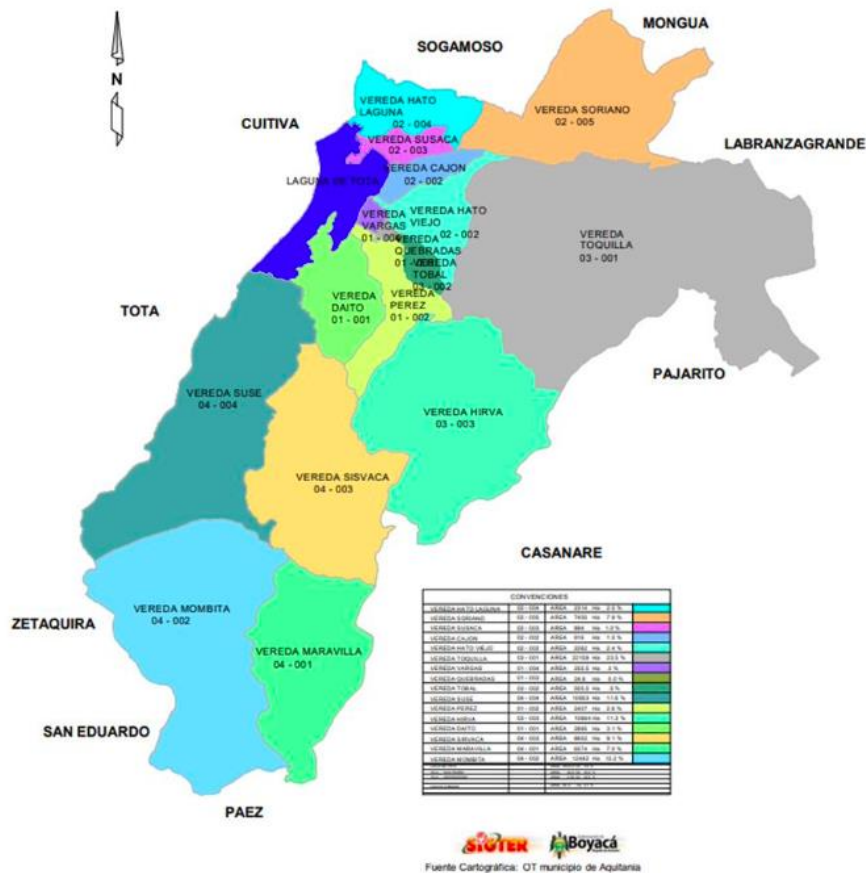
Fuente: (XUÉ & Barión, 2020).

1.5. Aquitania: territorio de análisis y exploración eólica

El municipio de Aquitania se localiza en la Provincia de Sugamuxi, al oriente del departamento de Boyacá, como se observa en la Figura 13. Regionalmente posee una ubicación estratégica sobre estribaciones de la Cordillera Oriental, al pasar por su territorio rural la vía que comunica a Boyacá con el Departamento del Casanare y con la vía marginal de los Llanos que sirve de comunicación con la región de la Orinoquía. Su área es una de las más extensas de Departamento (Corpoboyacá, 2020). El municipio posee parte de su territorio en zonas de páramos localizados por encima de los 3.200 metros sobre el nivel del mar, su temperatura media es de 11° C y tiene una precipitación anual de 1.716 mm (Mosquera, Martinez, & Hansen, 2010). Los meses secos en la cuenca del Lago de Tota se presentan de diciembre a marzo y los meses de lluvias van de abril hasta noviembre, siendo julio el mes de mayores precipitaciones (Chaparro J. , 2013).

explotación de bosques nativos y minería. El sector secundario se compone de industria, agroindustria, turismo y artesanías. En el municipio no existe aún un sector secundario fortalecido, pues la economía gira en torno al sector agropecuario y de servicios (Montañez, 2018).

Figura 14. Mapa veredal de Aquitania, Boyacá.



Fuente: (Gobernación de Boyacá, 2020).

Dentro de las actividades económicas se encuentran aquellas que dan un valor agregado, aportado por diferentes sectores, los cuales se muestran en la Tabla 2. Actividades como los restaurantes y la prestación de servicios realizan movimientos y dinámicas importantes para el municipio (Cardozo, 2016). Estas son fortalecidas especialmente por la actividad turística que presenta el municipio gracias a la Laguna de Tota y reservas ecológicas de la región, razón por la cual se ha incrementado el turismo en la región y con ello ha fortalecido los niveles de ingreso con esta actividad. En la Tabla 3 se muestran las actividades económicas según el número de establecimientos de comercio por año.

Tabla 2. Valor agregado municipal sectores de mayor importancia de la economía municipal. Fuente: (Cardozo, 2016).

Sector	Miles de millones de pesos (corrientes)
Industria manufacturera	6,0
Comercio	19,6
Intermediación financiera	2,4
Actividades inmobiliarias	1,6
Otros	282,6
Valor agregado Municipal	310,5
Valor agregado Percapita (Pesos corrientes)	\$ 20.374.844

Tabla 3: Actividades económicas según industria y comercio. Fuente: (Cardozo, 2016).

Año	Establecimientos de comercio
2008	272
2009	162
2011	103
2012	147
2013	87
2014	129

En el municipio, la principal actividad comercial en materia de servicios está representada en tiendas y cafeterías, estaciones de servicio, restaurantes y hoteles (Cardozo, 2016).

POBLACIÓN

Según las proyecciones del DANE, en el municipio de Aquitania se evidencia el desarrollo habitacional en las zonas rurales, adquiriendo características de ciudad en sus justas proporciones. Los análisis permiten identificar el descenso de la población rural, en proporciones casi directamente proporcionales con el aumento en la población urbana, llevando a que en el 2020 se pueda establecer un escenario de equilibrio (Cardozo, 2016). En la Tabla 4 se muestra la distribución poblacional rural y por vereda del municipio de Aquitania, según la categoría de hombres y mujeres.

Tabla 4: Distribución poblacional por vereda. Fuente: (Cardozo, 2016).

VEREDA	POBLACIÓN	HOMBRES	MUJERES
URBANO	4511	2188	2323
VARGAS	706	365	341
PÉREZ	1736	896	840
TOQUILLA	865	420	445
SUSE	1591	812	779
CAJÓN	637	345	292
HATO VIEJO	1433	741	692
QUEBRADAS	284	139	145
TOBAL	454	244	210
HATO LAGUNA	593	315	278
SUSACÁ	559	282	277
DAITÓ	1557	796	761
MARAVILLA	62	37	25
MOMBITA	478	262	216
SISVACA	353	182	171
HIRVA	125	65	60
SORIANO	115	58	57
TOTAL	16059	8147	7912
URBANO	4511	2188	2323
RURAL	11548	5959	5589

VIVIENDA

Según la información del Departamento Nacional de Estadísticas- DANE, censo poblacional 2018, en ese momento el municipio de Aquitania contaba con un total de 6,702 viviendas y 4,621 hogares. Se indicaba que cada vivienda era ocupada por 0,69 hogares, siendo menor el número de viviendas respecto al número de familias. El número promedio de integrantes por familia era de 3 personas (ESE Salud Aquitania, 2019).

En (Cardozo, 2016) se denota la necesidad de avanzar hacia la inversión en el mejoramiento de las condiciones cualitativas de los hogares, en la medida en que es común encontrar un número importante de viviendas con pisos en tierra, cocina de leña en el mismo cuarto del dormitorio, entre otros factores. A ello se sumaba que muchas viviendas carecían de suministro de energía eléctrica, aumentando la pobreza e incrementando las brechas digitales.

1.6. La energía eólica

Surge gracias a la energía solar, producida por el calentamiento de la atmosfera y el diferencial con las irregularidades del relieve de la superficie terrestre. Su uso como energético se dio desde la antigüedad, en la ganadería y agricultura. Sin embargo, hace poco empezó el auge y desarrollo en la necesidad de buscar nuevas fuentes energéticas que mitiguen las consecuencias del cambio climático y como complementariedad al desarrollo de la matriz energética de los países.

1.7. El viento y su función como potencial energético

En el estudio del potencial del viento como fuente de generación energético. Surge la densidad del aire como uno de los principales puntos sinérgicos de análisis. Esta depende de la energía cinética del viento, directamente relacionada con la masa por la unidad de volumen. El reconocimiento de esta variable es de gran importancia debido a que cuanto mas denso sea el aire mas energía potencial recibirá el aerogenerador, aumentando el nivel de producción de los sistemas eólicos.

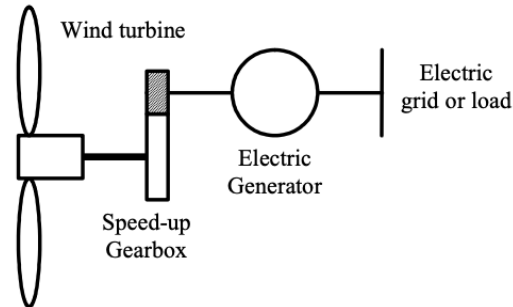
1.8. Sistemas eólicos

Los sistemas de potencia aislados que utilizan tecnología eólica y otras formas de energía renovable están emergiendo como opciones técnicamente confiables para suministro energético. Dichos sistemas son generalmente percibidos como más adecuados para la alimentación local de potencia en países en desarrollo, pero los desarrollos tecnológicos involucrados en estos tienen un considerable potencial como elementos de generación distribuida para grandes redes de potencia del primer mundo.

El principio de operación de un sistema de aerogeneración, mostrado en la Figura 15, se basa principalmente en dos procesos de conversión de la energía: extraer la energía cinética del viento por medio de una turbina eólica y convertirla en un par mecánico, que a su vez, a través de un generador eléctrico, es convertido en energía eléctrica. Por lo tanto,

la principal componente donde se lleva a cabo la conversión de la energía es el eje que une la turbina con el generador eléctrico (Aragón, Lopez, Escarela, Campero, & Guzman, 2014).

Figura 15. Esquema simplificado de un sistema de generación eólica.

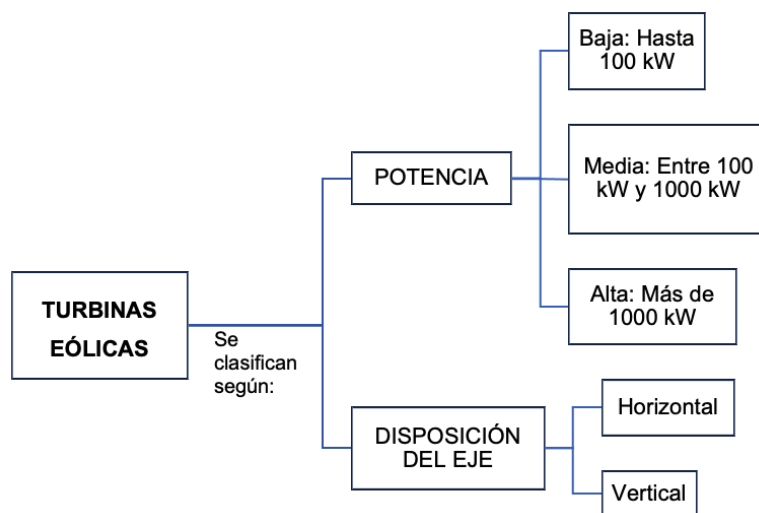


Fuente: (Lopez, Vannier, & Sadarnac, 2007).

TURBINAS EÓLICAS

Las turbinas eólicas son las máquinas empleadas para la transformación de la energía cinética del aire en energía mecánica para después, mediante una serie de elementos, convertirla en energía eléctrica (Moyano & Pinzón, 2018). Algunas de las formas en las que se clasifican estas máquinas son mostradas en la Figura 16:

Figura 16. Clasificación de Turbinas eólicas.

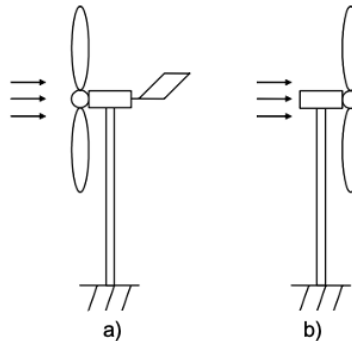


Fuente: Elaboración propia en base a (Moyano & Pinzón, 2018).

Turbinas Eólicas de Eje Horizontal (HAWT)

Son las turbinas más conocidas y utilizadas en sistemas de generación eólicos. Se caracterizan principalmente porque el eje del rotor se encuentra paralelo a la corriente de viento. Gracias a que proporcionan una alta eficiencia son empleados tanto para la generación a pequeña como a gran escala. A su vez, se subdividen en dos categorías. La primera (Figura 17-a) es la turbina con rotor a barlovento (la corriente de aire fluye de cara al rotor y las palas) y la segunda es la turbina con rotor a sotavento (Figura 17-b) que es cuando la corriente de aire fluye por el lado posterior del rotor y las palas (Moyano & Pinzón, 2018). La categoría más utilizada es a barlovento.

Figura 17. Turbinas a) barlovento y b) sotavento.

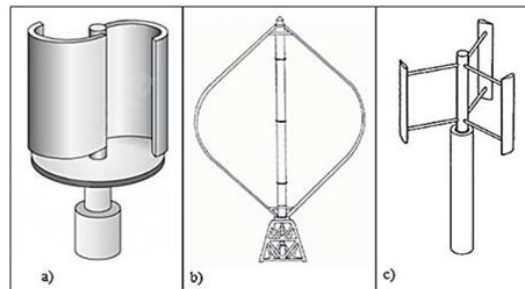


Fuente: (Lopez, Vannier, & Sadarnac, 2007).

Turbinas eólicas de eje vertical (VAWT)

El eje de rotación de una VAWT es vertical respecto del suelo y casi perpendicular a la dirección del viento. Estos tipos de turbina pueden recibir viento de cualquier dirección, por lo que los complicados dispositivos de orientación pueden también eliminarse. El generador y la caja de cambios pueden estar a nivel del suelo, lo que hace que el diseño de la torre sea más simple y económico (Mathew, 2006) citado por (Lopez, Vannier, & Sadarnac, 2007). Además, la mantención del sistema también es a ras de piso. Tampoco necesitan control del ángulo de pala, como cierto tipo de HAWT. En la Figura 18 (a, b y c) se muestran los tipos de turbinas de eje vertical.

Figura 18. Turbinas eólicas de eje vertical. A) Savonius, b) Darrieus, c) Tipo H.

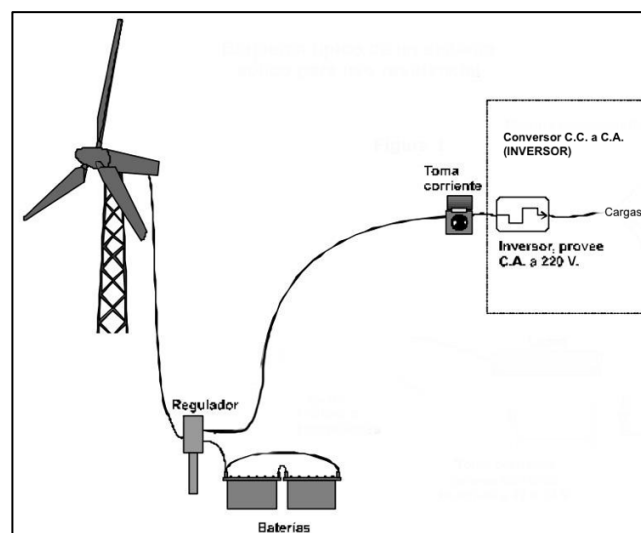


Fuente: (Moyano & Pinzón, 2018).

Configuración y características de los generadores eólicos aislados

La configuración de los sistemas eólicos aislados es mostrada en la Figura 19. En ella se consideran las cargas según requiera la zona de desarrollo, estas consideraciones de las cargas son dadas por las características socio – económicas de la región. Estos sistemas son autónomos, refiriéndose a que no están conectados a la red.

Figura 19. Sistema eólico aislado para uso residencial.



Fuente: Adaptado de (Moragues & Rapallini, 2003).

Esta configuración, analizada para uso residencial, está formada principalmente por los siguientes elementos:

- **Baterías:** son empleadas para almacenar la energía proveniente de los generadores (eólicos o solares) (Palacios Briones, 2019). Constituyen uno de los elementos de mayor importancia en sistemas eólicos no conectados a la red eléctrica nacional, debido a que permiten garantizar el abastecimiento energético, en especial en períodos de escasez del recurso.
- **Regulador de carga:** Permite la conversión de la energía proveniente del aerogenerador, garantiza el correcto funcionamiento de las baterías del sistema.
- **Inversor:** Componente electrónico utilizado para la conversión de la corriente directa en alterna, con el fin de que pueda ser usado por el usuario final.
- **Máxima demanda:** Es analizada en un periodo de tiempo establecido y denota la máxima potencia del sistema.
- **Factor de carga:** Valor que indica la eficiencia con que se utiliza la energía eléctrica producida. También se define como el cociente entre la demanda promedio y la demanda máxima presentada en un intervalo de tiempo (Palacios Briones, 2019).
- **Red de distribución secundaria:** Conjunto de conductores y/o equipos que suministrarán la energía eléctrica.

SISTEMA ELÉCTRICO

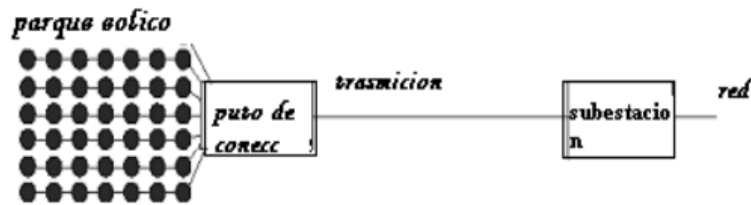
Nuevos tipos de configuraciones de múltiples polos y máquinas de alto voltaje, de reluctancia conmutada, de flujo axial y transversal se están desarrollando para reducir la masa y mejorar la eficiencia del generador (Lopez, Vannier, & Sadarnac, 2007).

SISTEMA DE TRANSMISIÓN

En tierra firme, la solución es una transmisión de corriente alterna por la cercanía de los generadores a la red, que recoge la producción de energía de cada aerogenerador. El nivel de voltaje dentro del parque eólico es habitualmente el mismo que el de media tensión de la red de distribución.

Según las consideraciones para las conexiones de un sistema eólico, las de mayores resultados son la transmisión mediante alto voltaje de corriente alterna (HVAC) y la otra es de corriente directa (HVDC) para la exploración más eficiente, pues las pérdidas disminuyen. La última presenta dos opciones técnicas: Convertidor de conmutación lineal (LCC) y Convertidor con fuente de voltaje (VSC) (Reyes, 2008). En la Figura 20 se muestra la configuración para una conexión mediante alto voltaje de corriente alterna o directa.

Figura 20. Diseño cuya conexión puede referirse a cualquier HVAC-HVDC.



Fuente: (Reyes, 2008).

1.9. Impactos ambientales

Es de gran importancia analizar las posibles afectaciones ambientales que pueda traer la implementación de sistemas eólicos para las regiones. En un proyecto eólico es necesario revisar:

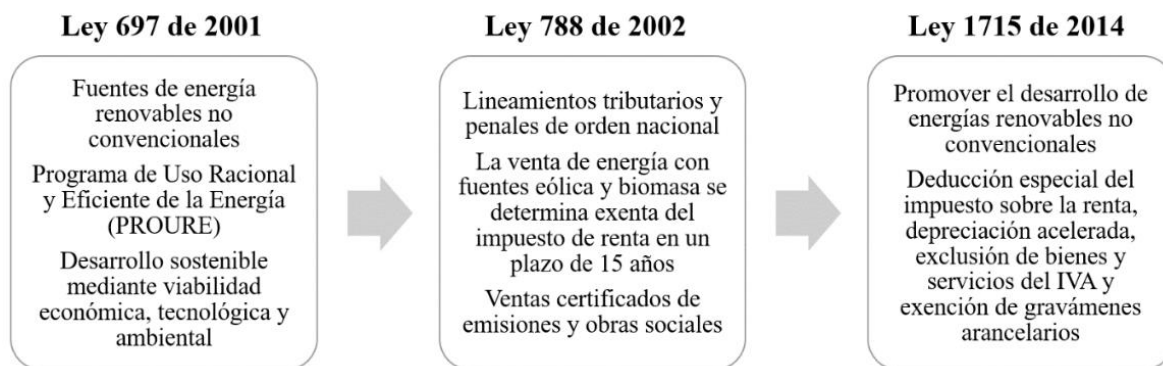
- Que el lugar donde se desee instalar el sistema eólico no coincida con las rutas de aves migratorias, dado el caso, los aerogeneradores implicarían un riesgo para la vida y desarrollo de aves y murciélagos (Valenzuela, 2009).
- Es necesario considerar el nivel de ruido que pueda generar el sistema eólico debido al funcionamiento de las turbinas. Esto con el fin de evitar contaminación auditiva.

1.10. Regulación y normatividad en Colombia

La normatividad colombiana se ha desarrollado hacia un sistema que integre las energías renovables, con el fin de incentivar a la población en general a su uso y adecuación y en aras de brindar sostenibilidad regulatoria y económica al sector público y privado.

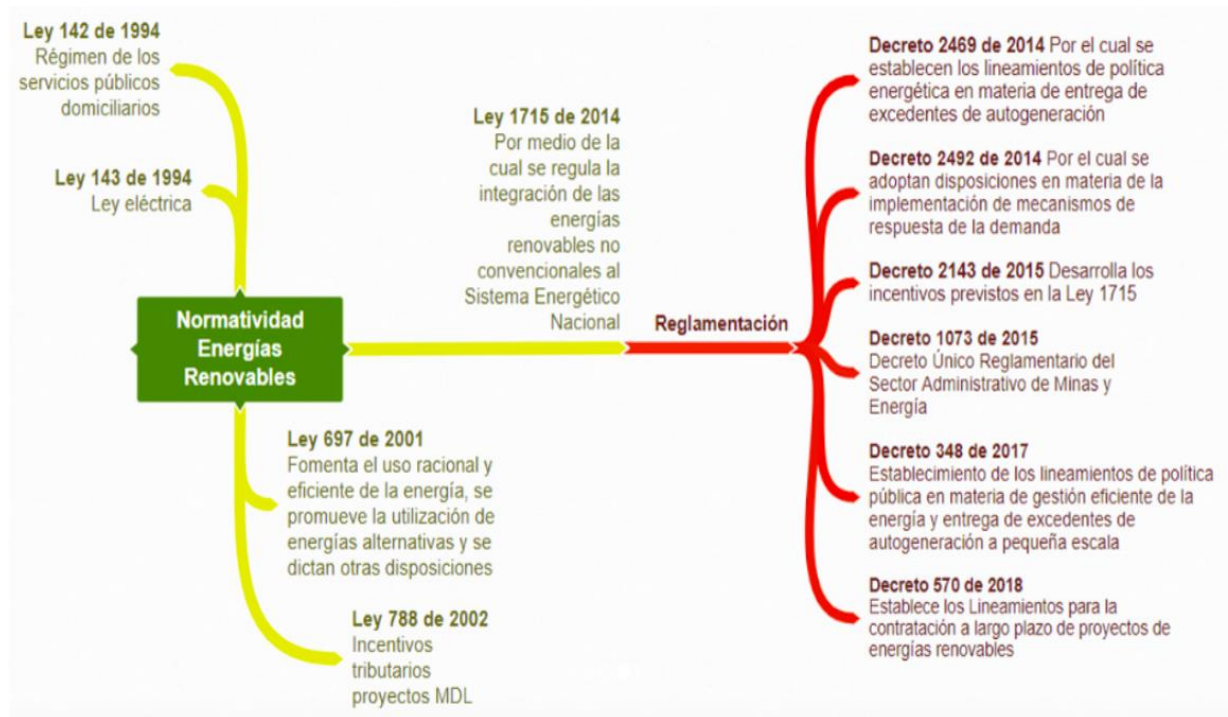
En el año 2014 se emite la Ley 1715, con el objetivo de favorecer el crecimiento de las fuentes de energía no convencionales en el país. En la Figura 21 se resumen las leyes que favorecen el uso de energía eólica en el país, en tanto en la Figura 22 se presenta la normatividad colombiana sobre energías renovables.

Figura 21. Leyes para promoción de energía eólica en Colombia.



Fuente: (Sosapanta, 2020).

Figura 22. Normatividad sobre energías renovables en Colombia.



Fuente: (Pereira Blanco & Turizo Pereira, 2020)

Capítulo 2: Metodología de diseño del sistema eólico para Aquitania-Boyacá

La metodología utilizada para este proyecto es de tipo empírico – analítica. Sus fases fueron las siguientes:

FASE I: Revisión de información relevante

Se desarrolla una investigación de los estudios que se han hecho, de generación eléctrica a partir de la implementación de sistemas eólicos, en zonas con características similares a la región de estudio.

FASE II: Reconocimiento de la zona

Reconocimiento de una zona que se adapte para la implementación de un sistema eólico en Aquitania- Boyacá. Para la realización de esta fase se priorizarán las actividades:

2.1 TRABAJO EN CAMPO: Análisis del investigador del territorio obtenido.

2.2 Establecimiento de las herramientas para el estudio del recurso eólico.

2.3 Análisis del comportamiento del viento en el municipio.

2.4 Establecimiento de zonas para la instalación, así como priorización de las más adecuadas.

Reconocimiento geográfico: Ubicación geográfica de la zona más apropiada para la implementación del sistema eólico.

FASE III: Establecimiento de los requerimientos del potencial eléctrico.

Se propone las consideraciones eléctricas que debe cumplir el sistema eólico para la generación de energía. Para la realización de esta fase se establecerán las siguientes actividades:

- 3.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO: Cálculo del sistema eólico, según características de potencia, eficiencia energética, equipos a alimentar y demás componentes del sistema.
- 3.2 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS: Análisis de las características técnicas que deben tener los equipos según normatividad y regulación.

FASE IV: Establecimiento de los lineamientos de estructura física.

Consideraciones técnicas de los componentes mecánicos del sistema:

- 4.1 SELECCIÓN DE EQUIPOS: Con la actividad anterior se establece un paralelo de posibilidades entre los equipos que se ofrecen en el mercado, con el fin de ajustar las características a los que menor impacto ambiental produzcan y posean los precios más convenientes, según las características de este proyecto.
- 4.2 DESCRIPCIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS EQUIPOS: Cálculo de las distancias entre aerogeneradores.
- 4.3 ESTABLECER CARACTERÍSTICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN: Finalmente, se establecen las principales características ambientales y sociales que existen en el territorio, para ser tenidas en cuenta en el momento de la implementación de un proyecto del sistema eólico.
- 4.4 FORMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO: Establecida para la implementación del sistema eólico en el municipio de Aquitania.

Fase V: Presupuesto del sistema.

Estimación de costos del sistema eólico.

Capítulo 3: Resultados

Fase I: Búsqueda de información relevante

I.1: Análisis de estudios locales precedentes

En esta fase se revisaron los estudios sobre generación eléctrica a partir de la implementación de potenciales eólicos en Colombia bajo condiciones más cercanas a esta investigación, en particular, sobre zonas aledañas.

Se toman las siguientes investigaciones realizadas en zonas de similar altura sobre el nivel del mar, temperatura, presencia de áreas montañosas y viabilidad en instalación de sistemas eólicos, con el fin de establecer una proximidad al caso de estudio que se desarrolla:

- Diseño y Construcción de un Prototipo para Aerogeneración de 1 kW (Chaparro, Carreño, & Gonzales, 2014): El objetivo es diseñar y construir un prototipo pionero en Boyacá, capaz de captar energía eólica y convertirla en energía eléctrica almacenable para el posterior consumo doméstico, principalmente, en zonas alejadas, donde no exista el acceso a la interconexión eléctrica y donde se tengan condiciones propicias de viento.
- Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá, departamento de Boyacá a 3534 m.s.n.m (Avellaneda & Varila, 2013): Se realizó la instalación de una estación de monitoreo del viento, denominada Los monjes, la cual está ubicada a 3531 msnm

en el cerro Los monjes, páramo de Chontales, municipio de Sotaquirá, departamento de Boyacá.

- Evaluación del potencial eólico en el alto de Soracá –Tunja (Álvarez, Alvarado, & Cardona, 2014): El Grupo de Investigación de la Universidad de Santo Tomás GIDINT, en el contexto del desarrollo de la investigación titulada “Estudio técnico-económico para la implementación de sistemas de energía alternativa, híbrido solar-eólico en el campus de la Universidad de Santo Tomás, en Tunja”, llevó a cabo un registro de datos en el Alto de Soracá durante un año para determinar el potencial eólico en este sector de la ciudad de Tunja.
- Diseño de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica en la finca “El alto del Gavilán”, Boyacá (Gonzalez & Sanchez, 2019): En este proyecto se diseña un aerogenerador para la producción de energía eléctrica en una zona rural de Boyacá de 4 KWh.

En el Anexo A, se muestran los resultados de velocidad promedio del viento encontradas en cada uno de las investigaciones estudiadas, así como el estudio realizado por la Universidad Nacional, por el cual se partió esta investigación. En el anexo es mostrado únicamente el apartado correspondiente al municipio de Aquitania, ya que engloba la zona objeto de esta investigación.

I.2: Investigación y análisis del recurso eólico en Aquitania-Boyacá

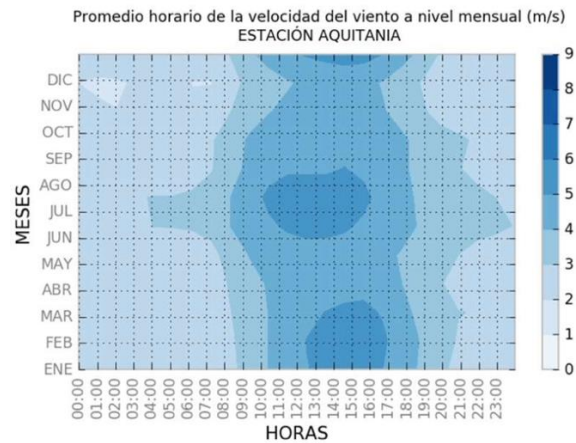
Como primer caso de estudio se encuentra el realizado por la Universidad Nacional en el año 2018, denominado: *“Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá”* (Siabato, 2018),

Además de priorizar las estaciones que tomaban una medición a 10 metros de altura, se tuvieron en cuenta tres criterios principales: localización dentro del área de interés, la

disponibilidad de registros de velocidad y dirección del viento para un período mínimo de un año y una resolución de registros a nivel horario (Siabato, 2018).

Se hizo énfasis especialmente en la zona de interés para esta investigación, correspondiente al municipio de Aquitania. Se destacan dos ciclos de mayor intensidad comprendidos entre las 10:00 a.m. y 5:00 p.m. (Figura 23), con valores superiores a 5 m/s, el primero entre los meses de enero y marzo y el segundo entre junio y agosto (Siabato, 2018).

Figura 23. Promedio horario de la velocidad del viento estación Aquitania.



Fuente: (Siabato, 2018).

En síntesis, a partir de los estudios revisados se concluye que existen zonas con características geográficas, de temperatura y a una altura sobre el nivel del mar aproximadamente igual al área de interés del proyecto. Se estableció que la zona de estudio presenta potencial eólico para generación de energía eléctrica, por lo que es viable la apertura de proyectos con la proyección de este tipo de energía renovable, con características similares a esta investigación.

La revisión de esas fuentes facilitó el análisis de velocidades del viento; extrapolaciones, toma de datos, sitios de muestreo, con los cuales se pudo establecer la densidad del viento y a partir de esto llegar a obtener análisis de viabilidad técnica para la apertura de proyectos eólicos. Se analizaron las oportunidades de implementación de sistemas eólicos para

consumo doméstico identificadas en esos estudios previos, principalmente, en zonas alejadas; que coinciden con el objeto de la presente investigación. Todos esos antecedentes constituyeron insumos para el análisis y posterior diseño de este proyecto.

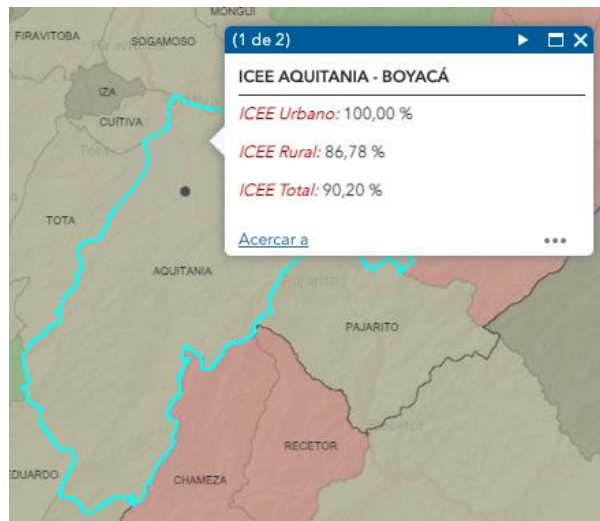
Fase II: Reconocimiento de la zona

En esta fase se definió la región del municipio que reunía las condiciones, técnicas, ambientales y sociales que se requerían para el aprovechamiento del potencial eólico. Para ello se hizo el análisis que se detalla a continuación.

II.1: Estado de cobertura del municipio Aquitania – Boyacá

El índice de cobertura de energía eléctrica a 2016, correspondiente al último año de actualización suministrado por la UPME a través de la plataforma: <https://upmeonline.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=2126e84d9dbc476988d1acb704a40b1f> permite identificar, como se observa en la Figura 24, el índice de cobertura del municipio de Aquitania. El estado de cobertura en la zona rural es de 86,78%, correspondiendo a un total de zonas no interconectadas ZIN del 13,22%. El análisis del enfoque que debe tener este tipo de proyectos lo introduce en una problemática de brecha digital por acceso. Las zonas sin cobertura no cuentan con herramientas tecnológicas, lo cual produce un atraso, reflejado en el desarrollo social, económico y educativo de estas regiones.

Figura 24. Índice de cobertura del municipio de Aquitania.

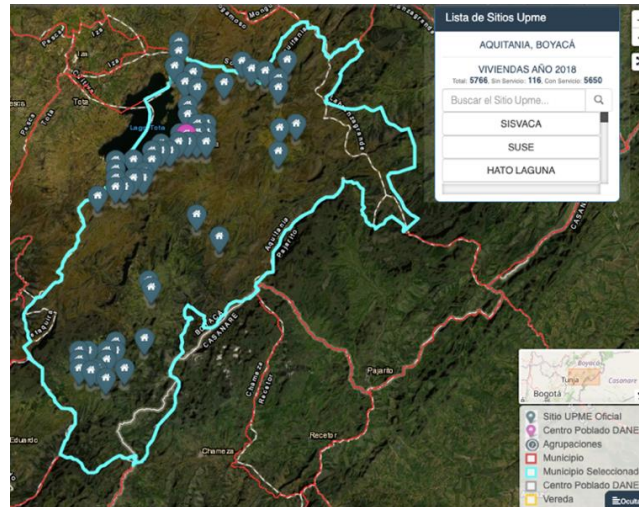


Fuente: (UPME, 2016).

Se propone el análisis de este proyecto para una zona no interconectada del municipio, priorizando las siguientes consideraciones:

- Las FNCER constituyen una solución sostenible con el medio ambiente. Las zonas rurales no energizadas del municipio son en gran parte ricas en fauna y flora; regiones amplias paisajísticamente, por tanto, las FNCER permiten brindar sostenibilidad ambiental al ser energías limpias, que no aumentarían las emisiones de GEI.
- Las FNCER en zonas no interconectadas permiten gran versatilidad en cuanto al acceso. Son estructuralmente más asequibles para zonas de difícil acceso geográfico, que en la mayoría de los casos son las que no cuentan con conexión a la red nacional, por brindar facilidad para su traslado y posterior puesta en marcha.
- Al llegar a zonas de difícil acceso que no cuentan con cobertura eléctrica, las FNCER constituyen una solución de energización, permitiendo la disminución de la brecha digital existente en estas zonas.

En la Figura 25 se muestran los sitios UPME a energizar para el año 2016 en el municipio de Aquitania, Boyacá, según la última fecha de actualización entregada por esta entidad.

Figura 25. Viviendas sin energizar en Aquitania 2016.

Fuente: (UPME, 2016).

En la Tabla 5 se realiza un consolidado de las zonas sin suministro de energía eléctrica en el municipio de Aquitania a partir de los datos suministrados por la UPME.

Tabla 5. Zonas del municipio de Aquitania sin cobertura eléctrica.

SECTOR	TIPO DE ZONA	VIVIENDAS RURALES	VIVIENDAS ZIN RURALES
Daito	Caserío	227	6
EI CAJÓN	Caserío	103	1
Hato Laguna	Caserío	370	7
Hato Viejo	Caserío	228	7
Hirva	Caserío	355	4
Maravilla	Caserío	8	4
Mombita	Caserío	419	17
Perez	Caserío	628	12
Primavera	Caserío	343	4
Quebradas	Caserío	343	4
Sisvaca	Caserío	11	2
Soriano	Caserío	382	11
Suce	Caserío	554	17
Susaca	Caserío	23	3
Tobal	Caserío	56	1
Torquilla	Caserío	42	3

Fuente: Elaboración propia en base (UPME, 2016).

Se observan las zonas con mayor número de viviendas a energizar y se toman las siguientes características para la definición y priorización de la zona, además de presentar las condiciones meteorológicas óptimas para el desarrollo del potencial eólico se considera para la priorización de la zona en este trabajo:

- Terreno con una extensión territorial propicia para la implementación de los generadores.
- La zona debe estar ubicada en una región preferiblemente elevada, con pocas pendientes.
- Debe contar con una exposición favorable para la propagación del viento, áreas de fuertes vientos de altura o fuertes gradientes térmicos.
- Además de lo mencionado anteriormente, se toman en cuenta consideraciones sociales y demográficas:
- El territorio debe contar preferiblemente con mayor número de zonas sin energizar.
- Evaluar la cantidad de familias que resultan beneficiadas.

Debido a que se propone el diseño de un sistema autónomo y con el objetivo de llegar a zonas no cubiertas por la red eléctrica nacional, se consideran solamente las regiones rurales ZIN, al analizar que la región urbana está energizada en su totalidad para el municipio de Aquitania-Boyacá. En la Tabla 5 se presentan los sectores sin cobertura eléctrica de Aquitania.

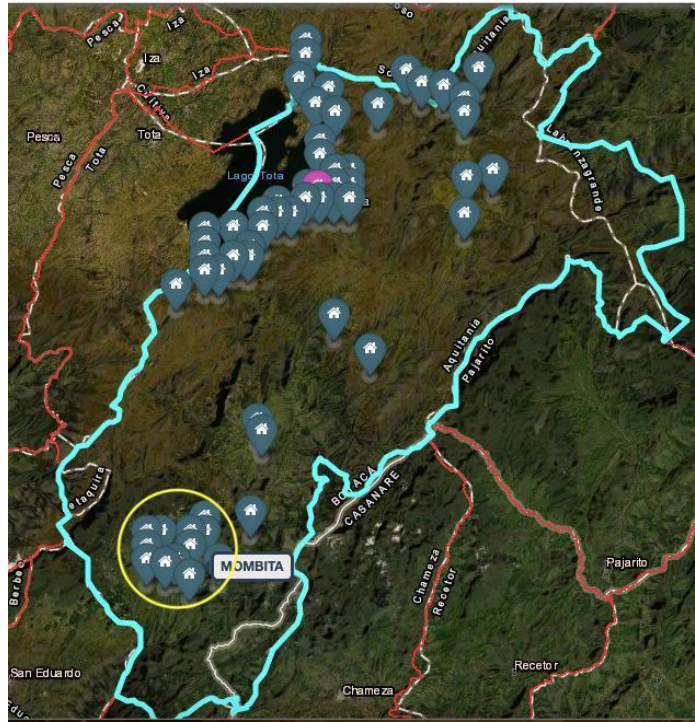
Se observa que las regiones de Suce, Mombita y Pérez corresponden a las que tienen mayor cantidad de viviendas sin energizar, característica de priorización para este proyecto. Sin embargo, al realizar un trabajo de campo para el reconocimiento de estas zonas, se conoció, mediante esta visita a habitantes del sector de Suce que aproximadamente ocho (8) meses atrás se había realizado una extensión de la red eléctrica, motivo por el cual el sector de Suce quedó energizado prácticamente en su totalidad. Esto se llevó a cabo solo en esta parte del territorio de Aquitania.

Según el período de tiempos que se refirió y los cotejados por la plataforma de la Unidad de Planeación Minero-Energética, que corresponden a registros de 2016, se actualizó información acerca de cuáles eran las áreas del municipio de Aquitania que no estaban alimentadas con las últimas implementaciones de extensión de la red. Con este dato, se procedió a priorizar la zona inmediatamente siguiente, correspondiente a la región denominada Mombita, que cuenta con un total de 17 casas sin energizar. Lo evidenciado en el reconocimiento de la zona, corrobora que esas viviendas no cuentan con suministro energético.

Tal consideración se tomó como punto de referencia para la elección de la zona para la implementación del sistema eólico. Además de cumplir con este requisito que se había preestablecido, para contribuir a disminuir la brecha social, se observa que es una zona con una extensión territorial adecuada para el funcionamiento de los generadores. Al ser una región que colinda con el lago ofrece mejores posibilidades de elevación, lo cual favorece la circulación de fuertes vientos y permite el aprovechamiento del potencial del recurso generado por el lago de Tota.

Una vez realizado el análisis integral antes descrito, se concluye que Mombita cumple con los requisitos priorizados para la ubicación de la zona más adecuada para esta propuesta. Por lo tanto, se establece esta región como la población y zona objetivo de esta investigación. En la Figura 26 se muestra la ubicación de la zona definida para la propuesta de implementación.

Figura 26. Zona definida para la implementación del sistema eólico.



Fuente: Elaboración propia basado en (UPME, 2016).

De acuerdo con los ítems establecidos, mediante trabajo de campo se identificó (ver Figura 27) un terreno propicio en extensión, colindante con las 17 viviendas a energizar. En las fotografías que aparecen como Figuras 28 y 29 se muestran dos tomas diferentes de la zona propuesta para la implementación del sistema de generación eólico. Se aprecia que el área cuenta con una elevación que permite ubicar los aerogeneradores para garantizar mayor eficiencia en cuanto a propagación del viento, al evitarse obstáculos, como plantaciones. También se tiene una primera perspectiva de las viviendas estimadas para la elaboración del diseño eólico.

Figura 27. Territorio definido para la implementación del sistema eólico.



Fuente: Autores.

Figura 28. Vista de la zona propuesta para la implementación del sistema.



Fuente: Autores

Figura 29. Otra perspectiva de la zona definida.



Fuente: Autores.

En la Figura 30 se observa con mayor nivel de detalle el grupo de viviendas a energizar con el sistema eólico, además de mostrar la proximidad entre la región prevista para la instalación y las viviendas.

Figura 30. Viviendas a energizar con el sistema de generación eólico.



Fuente: Autores.

Por todo lo anterior, se establece:

- **Zona definida para la implementación del sistema eólico:** Vereda Mombita (Cuarto Primavera) – municipio Aquitania, Boyacá.
- **Total de viviendas en energizar:** 17 viviendas.
- **Población beneficiada:** al estimar un aproximado de 4 a 6 personas por vivienda de acuerdo con lo estudiado en el Capítulo 1, literal 1.8 - Vivienda y Población, se toma como población beneficiada la cantidad de 102 habitantes.

Fase III: Requerimientos de potencial eléctrico

Se realizan los cálculos para establecer las condiciones de potencia requeridas dentro del sistema eólico para el suministro de energía eléctrica en la zona identificada, según la población que se quiere beneficiar. Para el establecimiento de esta fase se analizan los elementos expuestos a continuación.

III.1: Estudio del consumo energético

Se definen las cargas o equipos que se desean energizar a través del sistema eólico. Estas, constituyen los elementos mínimos necesarios para una vivienda de la zona. Se considera un número de horas diarias de uso y la potencia requerida para el funcionamiento por cada una de las cargas establecidas; obteniendo la máxima demanda y la energía consumida en dicho tiempo. Los resultados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Consumo de cargas requeridas.

No. CARGAS	CARGA	CANTIDAD	POTENCIA UNITARIA (W)	POTENCIA TOTAL (W)	HORAS DE USO DIARIO (h/día)	ENERGÍA PARCIAL (Wh/día)
1	Bombillos	5	12	60	5	300
2	TV color (24"-29")	1	60	60	4	240
3	Refrigerador (230 litros)	1	120	120	11	1320
4	Teléfono inteligente: Recarga	2	6	12	1	12
5	Radio	1	40	40	5	200
TOTALES		10	238	292	26	2072

Fuente: Elaboración propia.

Estimación del gasto energético

Al considerar las cargas aproximadas para una casa y un tiempo de uso diario (suponiendo tiempos constantes), tenemos:

Demanda de energía eléctrica (E_D) de una vivienda en un día:

$$E_D = 2072 \text{ Wh/ día}$$

Demanda máxima de energía (MD):

$$MD = 292 \text{ W}$$

Con el objetivo de estudiar el aprovechamiento de la capacidad instalada del sistema, referido al factor de carga (F_C). Se establece una relación entre la máxima demanda del sistema y su capacidad nominal.

Por lo tanto:

$$F_C = \frac{E_D}{MD \cdot h} \quad (3.1)$$

Donde:

E_D - energía consumida de una vivienda (Wh);

MD - máxima demanda de una vivienda (W);

h - tiempo de uso de los equipos eléctricos.

$$Fc = \frac{2072}{292 * 26}$$

$$Fc = 0,27 \text{ o } 27\%$$

Se establece la demanda de energía eléctrica por una vivienda en la proyección del tiempo.

Valor de la energía demandada (E_D) por vivienda al mes:

$$(E_D) = \left(30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}\right) * (\text{energía consumida diaria})$$

$$(E_D) = \left(30 \frac{\text{días}}{\text{mes}}\right) * \left(2072 \frac{\text{Wh}}{\text{día}}\right)$$

$$(E_D) = 62,160 \text{ KWh/mes}$$

Valor de la energía demandada (E_D) por vivienda al año:

$$(E_D) = \left(12 \frac{\text{mes}}{\text{año}}\right) * (\text{energía consumida mensual})$$

$$(E_D) = \left(12 \frac{\text{mes}}{\text{año}}\right) * 2072 \text{ Wh/mes}$$

$$(E_D) = 745,92 \text{ KWh/año}$$

La información obtenida se puede sintetizar en la Tabla 7.

Tabla 7: Demanda de energía eléctrica del sistema.

Demanda de energía eléctrica		
Tiempo	Una vivienda	Sistema eólico: 17 viviendas
Día	2072 Wh/ día	35,224 KWh/ día
Mes	62,16 KWh/ mes	1056, 72 KWh/ mes
Año	745,92 KWh/año	12680,64 KWh/ año

Fuente: Elaboración propia.

III.2: Estudio del potencial eólico de zona rural Mombita del municipio de Aquitania-Boyacá

Es necesario obtener un análisis del potencial del viento en la zona de estudio. Este proveerá la viabilidad de implementación del sistema eólico; relacionado directamente con el potencial eólico que pueda suministrar al aerogenerador y por lo tanto la eficiencia en su funcionamiento. El potencial eólico es caracterizado y definido por la magnitud del viento en la zona de estudio.

Para esto, es necesario analizar la potencia del viento (P) en la zona de estudio, que se relaciona directamente con la densidad del aire (ρ) en Kg/m^3 (depende de la temperatura ambiente y de la altura del sitio sobre el nivel del mar), el área interceptada por la hélice del aerogenerador (A) en m^2 en y la velocidad del viento (V) en m/s (Valenzuela, 2009).

Teniendo en cuenta la velocidad media encontrada en el municipio de Aquitania y sabiendo a través del estudio proporcionada por la Universidad Nacional (ver Fase 1 y Anexo A) sobre la demostración del potencial eólico, se halla el potencial eólico de la región de estudio.

Para la zona de estudio, la velocidad presenta diferentes variaciones en el transcurso del año. Se toma una velocidad que presente niveles de mayor constancia y se establece una velocidad media en promedio de 5 m/s, notado en el estudio de los vientos Anexo A. En consecuencia, a partir de la Ecuación (3.2) se determina la potencia del viento:

$$P = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * A \quad (3.2)$$

$$P = \frac{1}{2} * \rho * V^3 * \pi * r^2$$

El potencial del viento (P) depende de:

ρ - densidad del aire (Kg/m^3);

A - área interceptada por la hélice (m^2);

V - velocidad del viento (m/s).

Por lo tanto, es necesario conocer la densidad del viento (ρ). Si la densidad del aire a presión atmosférica estándar es $1,225 \text{ kg/m}^3$ y la temperatura del ambiente es 15°C , se tiene a partir de la Ecuación (3.3):

$$\rho = 1,225 e^{\left[\left(\frac{-z}{8435}\right) - \left(\frac{T-15}{288}\right)\right]} \quad (3.3)$$

Donde:

Z - altura en m.s.n.m. de la zona

T - temperatura promedio de la zona [$^\circ\text{C}$].

$$\rho = 1,225 e^{\left[\left(\frac{-3030}{8435}\right) - \left(\frac{14-15}{288}\right)\right]}$$

$$\rho = 0,8582 \text{ Kg/m}^3$$

La densidad del aire es una variable de suma importancia ya que la energía cinética del viento es directamente proporcional a esta. En términos generales, entre más pesado (denso) sea el aire mas energía podrá suministrar al aerogenerador.

Con los datos de demanda definidos se procede a encontrar el aerogenerador que reúna las características técnicas que se requieren para el suministro energético del sistema de generación eólico.

III.3: Selección de componentes electromecánicos del sistema

Dimensionamiento del sistema eólico aerogenerador

Para la elección del aerogenerador se tuvieron en cuenta las siguientes premisas de acuerdo con las curvas características (ver Anexo B) donde se muestran las curvas de potencia de salida, y la producción de energía eléctrica mensual:

- Cumplimientos de potencia respecto a la velocidad del viento de la zona.
- Demanda máxima requerida por el sistema según cargas definidas para una vivienda.
- Demanda máxima anual que puede exigir el sistema eólico frente al potencial del viento en la zona.

Además, se priorizó un generador que fuera suministrado por el mercado colombiano, con el fin de reducir costos y usar los recursos existentes. Cumplidas las características citadas, se elige el aerogenerador ZONHAN ZH1.5, la ficha técnica es mostrada en el Anexo B.

Las características técnicas del aerogenerador elegido para este proyecto se muestran a continuación, tabla 8.

Tabla 8. Características técnicas del aerogenerador ZONHAN ZH1.5.

Diámetro del rotor	3,2 m
Material y número de palas	3 x fibra de vidrio reforzada
Potencia nominal / potencia máxima	1,5 KW /1,8 KW
Velocidad de arranque del viento	2,5 m/s
Velocidad nominal del viento	3-25 m/s
Tensión de trabajo	VDC 24 / 48 V (voltaje mas alto opcional)
Tipo de generador	Trifásico, imanes permanentes.
Tipo	Rotor horizontal
Controlador de carga	autoturl
Altura de la torre	12 m

Fuente: Elaboración propia en base a Anexo B.

Potencial de producción de energía del aerogenerador

Con el fin de establecer el análisis de la energía del viento que se transmitirán hacia las hélices del aerogenerador y por consiguiente a la turbina – rotor, obteniendo la potencia que puede producir el aerogenerador a partir de las características del potencial eólico de la zona, se analiza desde dos perspectivas definidas a continuación.

1. Mediante del área de barrido

A partir de la Ecuación 3.2 y luego de definir las características técnicas del aerogenerador, la potencia extraíble del viento es:

$$P = \frac{1}{2} * (0,8582) * (5)^3 * \pi * (1,6)^2$$

$$P = 431,378 W$$

Limite de Betz

Es enuncia por el alemán Albert Betz, quien predijo la fuerza transmitida por el viento (Valenzuela, 2009). Este límite aún no ha sido alcanzado en forma “práctica” por un aerogenerador, además porque se sabe que el viento es un recurso que está en constante fluctuación y la obtención de datos precisos es compleja. Por lo tanto, se establece una aproximación.

Según el teorema de Betz, la energía máxima que podrá captarse del viento para que el rendimiento sea el máximo es el 59% de la energía cinética del viento; lo cual se traduce también como una pérdida del rendimiento final de la turbina (Eraso, Escobar, Paz, & Morales, 2017). Este factor es denominado coeficiente de potencia C_p y se puede interpretar también como la eficiencia con la cual el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad.

Por lo tanto, la potencia (P_A) que se puede extraer del viento con un aerogenerador está determinada por la Ecuación (3.4):

$$P_A = C_p * \frac{\rho}{2} * \frac{\pi D^2}{4} * V^3 \quad (3.4)$$

Donde:

C_p - coeficiente de potencia;

ρ - densidad del aire (Kg/m^3);

V - velocidad del viento (m/s);

D - diámetro de las hélices (m).

$$P_A = 0,59 * \frac{0,8582}{2} * \frac{\pi(3,2^2)}{4} * 5^3$$

$$P_A = 254,513 W$$

Para calcular la generación anual de energía (GAE) o la cantidad de energía que el aerogenerador puede producir durante un año, se analiza el método de área de barrido en conjunto con la distribución Rayleigh del viento. Por lo tanto, se utiliza el factor de patrón de energía (FPE) cuyo valor para la distribución de Rayleigh es de 1.91. Este FPE puede variar según la zona, oscilando entre 1,4 a 2,4 según la distribución del viento (Valenzuela, 2009).

Entonces, la generación anual de energía estará dada por ecuación 3.5:

$$GAE = P_A(FPE)(horas \text{ año}) \quad (3.5)$$

$$GAE = (254,513)(1,91)(8760)$$

$$GAE = 4258,36 \text{ KWh/año}$$

Al calcular los aerogeneradores requeridos para satisfacer el consumo energético de las 17 viviendas, y a partir de $E_D = 12680,64 \text{ Wh/año}$ se tiene:

$$A_T = \frac{E_D}{GAE}$$

Donde:

A_T – número de aerogeneradores requeridos para el sistema.

$$A_T = \frac{12680,64}{4258,36}$$

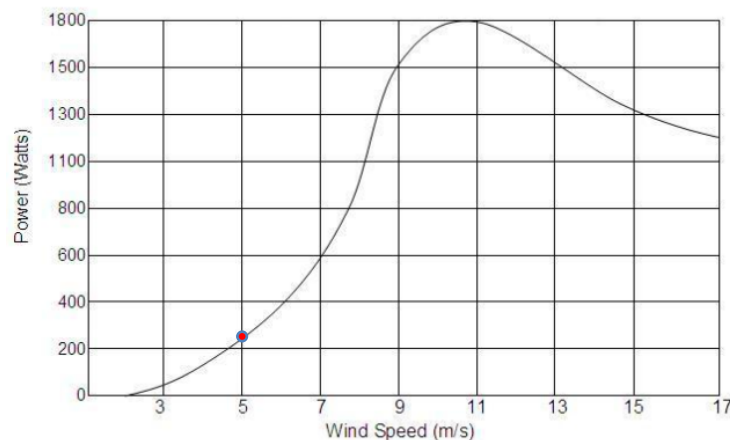
$$A_T = 2,98 \approx 3$$

Con el análisis de área de barrido se obtiene un total de tres (3) aerogeneradores para el diseño del sistema. Sin embargo, se hace la evaluación mediante el análisis de la curva de potencia suministrada por el proveedor del aerogenerador, con el fin de realizar un cotejo de datos y evaluación de los requerimientos técnicos mas acertados para asegurar una mayor eficiencia y puesta en marcha del sistema de generación eléctrica a partir del recurso eólico de la región.

2. Mediante la curva de potencia

A partir del análisis de la demanda estudiado en la fase I, se establece una evaluación de la producción anual, mediante la curva de potencia del aerogenerador proveída por la fabricante mostrada en la Figura 31:

Figura 31: Curva de producción del aerogenerador ZONHAN ZH1.5



Fuente: (ProViento, s.f.).

Se observa que en las condiciones de velocidad del viento de la zona a 5 m/s se produce aproximadamente 230 W por cada aerogenerador, es decir 690 W en total y tenemos una demanda de energía requerida de 292 W estaríamos dentro de los límites de generación requerida con los tres (3) aerogeneradores para suplir la demanda de energía eléctrica de la ZIN de la vereda de Mombita, municipio de Aquitania-Boyacá.

Estudio de las pérdidas del sistema

Para la evaluación del consumo energético total del sistema, es necesario primero considerar las pérdidas que lo componen, con el fin de tener una fiabilidad en el margen de seguridad de funcionamiento. Las pérdidas están constituidas por cada factor de pérdida de los elementos que hacen parte del sistema de generación eléctrico. El factor de pérdidas se establece a través de la ecuación (3.6) y cada uno de los factores se denota a continuación:

$$F = 1 - \left(\frac{f_a * N}{Pd} \right) - f_b - f_i - f_j \quad (3.6)$$

Factores de pérdida de energía:

f_a - por la auto - descarga de la(s) batería(s);

f_b - debido a la eficiencia de la batería;

f_i - debido a la eficiencia del inversor;

f_j - debido a calentamiento, conexiones, etc.;

Pd - profundidad de descarga máxima de las baterías;

N - días de autonomía del sistema.

La magnitud de los factores de pérdidas son las siguientes, según referencia bibliográfica: Instalaciones de energía solar, Tomo V. Sistemas de conversión eléctrica por CENSOLAR, extraído de (Palacios Briones, 2019).

$$f_a = 0,005$$

$$f_b = 0,05$$

$$f_i = 0,13$$

$$f_j = 0,05$$

Para establecer el factor de pérdidas es necesario analizar los días de autonomía del sistema. Estos se constituyen en el tiempo en el cual se podrá suplir el consumo energético requerido por el sistema en el tiempo de carencia de energía eólica. Se establece para una fiabilidad en el sistema un total de 3 días.

$$N = 3 \text{ días}$$

En este proyecto se toman baterías estacionarias de gel, para estas el valor de profundidad de descarga (Pd) está entre los límites de 60 a 100% de su capacidad nominal, el cual se puede ver en el *datasheet* de la batería (Anexo C). Por lo tanto, se aplica el 60%:

$$Pd = 0,60$$

Reemplazando en la ecuación (3.6) se determina el factor de pérdidas:

$$F = 0,745$$

Como se estableció en el estudio de potencias, según las cargas estimadas para el sistema se genera una demanda de energía diaria (E_{dia}). La misma proporciona la energía necesaria (E_N) que debe generar el sistema eólico, Ecuación 3.7.

$$E_N = \frac{E_{dia}}{F} \quad (3.7)$$

$$E_N = \frac{35,224 \text{ KWh/día}}{0,745}$$

$$E_N = 47,28 \text{ KWh/día}$$

Regulador de carga

El regulador permite controlar la tensión generada por el sistema. Es necesario realizar los cálculos, con el fin de establecer las características que debe tener según las especificaciones técnicas hasta el momento encontradas. Para obtener la capacidad del equipo a utilizar, se emplean las ecuaciones (3.8) y (3.9):

$$I_e = \frac{Pe}{Ve} \quad (3.8)$$

Donde:

I_e - intensidad de la corriente de entrada del sistema;

Pe - potencia eléctrica que entrega el aerogenerador;

Ve - voltaje del sistema de generación;

I_n - Intensidad nominal de corriente, determina la elección del regulador.

$$I_e = \frac{230}{48} \quad I_e = 4,8 \text{ A}$$

Cuando los vientos ascienden a una velocidad de 11 m/s o velocidad máxima. Tendremos una corriente máxima, con el fin de dimensionar el cableado y el regulador.

$$I_{emax} = \frac{1800}{48} \quad I_{emax} = 37,5 \text{ A}$$

Se utiliza el factor de 1,25 para prever el aumento de intensidades y tensiones que pueden variar con el clima.

$$I_n = I_{emax} * 1,25 \quad (3.9)$$

$$I_n = 37,5 * 1,25$$

$$I_n = 46,87 \cong 47 \text{ A}$$

Se elige por lo tanto un regulador por aerogenerador: (Regulador ISRAEL777 Mppt 60 Amp 3200w 12v 24v 36v 48v), (Anexo D). Debido a que la máxima potencia del aerogenerador es de 1,8 KW, considerando que no siempre tendremos un flujo de viento constante, y los aerogeneradores pueden tener diferentes velocidades. Por lo tanto se considera a los límites máximos para evitar daños en el sistema. Datasheet Anexo D.

Baterías

Este proyecto se fundamente en un diseño autónomo, razón por la cual es necesario dimensionar el banco de baterías a utilizar en el sistema aislado. Dentro de las configuraciones de baterías se encuentran dos tipos principales: baterías estacionarias de plomo-ácido y batería de gel. Básicamente, estos dos tipos tienen diferencias en su composición química.

Además, es importante considerar que en sistemas aislados se suelen emplear baterías estacionarias preparadas para descarga profunda, ya que en algunas instalaciones deben soportar el consumo durante varios días. También debe reseñarse que cuanto mayor es la profundidad de descarga (DOD, de la expresión en inglés *Depth of Discharge*), menos ciclos de uso que nos va a poder dar una batería (Europe, 2007).

Se consideraron las siguientes características para su elección:

- Para este tipo de proyectos se considera preferiblemente un régimen de descarga lento, ya que permitirá que el tiempo de vida útil sea más prolongado.
- Al tratarse de un proyecto que pretende ser implementado en una zona lejana, hay que considerar los aspectos de mantenimiento. Se priorizan baterías que no requieran mantenimiento.
- Se consideran baterías completamente selladas, con el fin de evitar liberación de gases y posterior corrosión de los postes; además de minimizar riesgos de contaminación por estas circunstancias.

Banco de baterías

Se selecciona la batería (6-GFM G -150Ah Gel Battery) (ver Anexo C). Es necesario determinar la capacidad nominal (C_n) del banco de baterías, a partir de la Ecuación (3.10).

$$C_n = \frac{MD * N}{P_d * V} \quad (3.10)$$

Donde:

V - voltaje del banco de baterías;

MD - máxima demanda diaria del sistema.

$$MD = E_D * N_{VI}$$

$$MD = 2072 \text{ Wh/día} * 17 \text{ viviendas}$$

$$MD = 35224 \text{ Wh/día}$$

$$C_n = \frac{35224 * 3 \text{ días}}{0,6 * 48}$$

$$C_n = 3669 \text{ Ah}$$

El número de baterías en serie demandado es:

$$N_{serie} = \frac{48}{12}$$

$$N_{serie} = 4$$

Al tener en cuenta que se considera que los días de autonomía (N), deben ser en total 3 días, se hace un nuevo dimensionamiento del banco de baterías. Si el recurso eólico disminuye, se garantiza el suministro de energía eléctrica durante estos 3 días que se consideraron como máximo.

En paralelo:

$$N_{paralelo} = \frac{C_n}{C}$$

$$N_{paralelo} = \frac{3669 \text{ Ah}}{150}$$

$$N_{paralelo} = 24,4 \approx 24 \text{ bloques}$$

Número total de baterías:

$$N_T = N_{serie} * N_{paralelo}$$

$$N_T = 96 \text{ baterías}$$

Capacidad del banco de baterías por aerogenerador.

$$C_T = C_{nb} * N_{paralelo}$$

$$C_T = 150 \text{ Ah} * 24$$

$$C_T = 3600 \text{ Ah}$$

Este arreglo tendrá una capacidad de 3600 Ah.

Cumpliendo con

$$C_T \geq C_n$$

$$3600 \text{ Ah} \geq 3669 \text{ Ah}$$

Por este análisis se llega a la conclusión de utilizar noventa y seis (96) baterías (6 - GFM G -150 Ah Gel Battery) Anexo C, para la implementación del sistema, al considerar un período de 3 días, en el cual el recurso eólico puede escasear.

Distribuidas de la siguiente manera: 24 bloques en paralelo, con 4 baterías en serie por bloque, para un total de 96 baterías.

Inversor

La función del inversor es extraer la corriente continua almacenada en las baterías y convertirla en corriente alterna. El nivel de tensión al cual trabajan los equipos e instalaciones de la mayoría de los consumidores finales es el de 120V AC (Comisión de Regulación de Energía y Gas GREG, 2008).

Con el fin de dimensionar el inversor se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

MD- máxima demanda diaria del sistema: 35224Wh/día.

Factor de seguridad: 1,2.

Se calcula la potencia del inversor a partir de la Ecuación (3.11):

$$P_{inv} = M_D * f_s \quad (3.11)$$

$$P_{inv} = 42269W$$

$$C_{inv} = \frac{P_{inv} * 100\%}{80\%}$$

$$C_{inv} = 52836VA$$

Por lo tanto, escogemos un INVERSOR-GRID-TIE-60KVA-TRIFASICO-ON-GRID

El datasheet se muestra en el Anexo E.

Dimensionamiento del sistema eléctrico

Se utilizara un tablero principal con su respectivo interruptor. También un interruptor termomagnético para la protección de los circuitos.

(3.12)

$$I_N = \frac{P}{\sqrt{3} * V * FP}$$

Donde:

I_N - intensidad de corriente de nominal;

I_D - intensidad de corriente de diseño;

P - potencia del aerogenerador (1800 W);

FP - factor de potencia, se asume 0,85.

$$I_N = \frac{1800}{\sqrt{3} * 48 * 0,85}$$

$$I_N = 25,5 A$$

$$I_D = I_N * FP$$

Por lo tanto la corriente de diseño:

$$I_D = 21,6 A$$

Por lo tanto, utilizamos totalizadores de 20-25 A.

Aerogenerador a regulador

Según la Norma Técnica Colombia 2050 (INCONTEC, 1998) se permite utilizar cables monopolares certificados para uso exterior, resistentes a la luz del sol y a la humedad.

Para el conductor correspondiente del aerogenerador al regulador y del regulador al cuarto de máquinas, utilizamos conductores sencillos siliconados para DC en cobre numero 4 AWG diámetro interno 5,92 y diámetro externo 10,26. Se muestra en la tabla 9.

Tabla 9: Capacidad de conductor a utilizar (Mercadolibre, s.f.).

ESPECIFICACIONES GENERALES CABLES SOLDAFLEX							
Conductor		Espesor de Aislamiento mm	Resistencia DC a 20°C Ohm/km	Diámetro Exterior mm	Peso Total Aproximado kg/km	Capacidad de Corriente	
Calibre AWG o kcmil	Diámetro mm					Continua* A	Ciclos* A
6	4,90	2,0	1,323	9,24	171	75	125
4	5,92	2,0	0,848	10,26	252	95	170
2	7,48	2,0	0,533	11,82	378	130	230
1/0	9,44	2,2	0,335	14,16	584	170	320
2/0	10,58	2,4	0,266	15,30	728	195	370
3/0	11,88	2,6	0,211	17,40	913	225	430
4/0	14,02	2,6	0,169	19,56	1142	260	500
350	18,10	3,2	0,102	24,49	1888	350	570
500	21,55	3,4	0,072	28,73	2632	430	700

La longitud considerada es de 60 metros por línea o polo. (Conductor tramo aerogenerador-regulador-banco de baterías, teniendo en cuenta la altura de la torre que es de 12 m).

Inversor a las viviendas

Para el conductor correspondiente del inversor a las viviendas utilizamos conductores aislados cuádruplex en aluminio trenzado 1C/C-2/0 forrado 194 A.

Se muestra en la tabla 10.

Tabla 10: Capacidad de conductor a utilizar (ENSA).

I.P.	AMPERE DE LOS CABLES DE COBRE		
150 A - 2P 127.5 A (85%)	1/C-2/0 forrado 195 A	1/C-#2 forrado 130 A	1/C-#2 desnudo 185 A
400 A - 2P 340 A (85%)	1/C-500 forrado 430 A	1/C-500 desnudo 703 A	1/C-4/0 desnudo 443 A
600 A - 3P 510 A (85%)	2/C-500 forrado 860 A	1/C-500 desnudo 703 A	1/C-4/0 desnudo 443 A

La longitud máxima considerada es de 300 metros, entre el inversor y las viviendas, para evitar caídas de tensión significativas.

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN EN LA ZONA (ZIN) DE LA VEREDA MOMBITA EN EL MUNICIPIO DE AQUITANIA-BOYACÁ

Como se ha explicado a lo largo de este trabajo, se considera este diseño para una zona que no tiene cobertura de la red eléctrica nacional. A partir de la estimación de consumo considerado por una vivienda se dimensiona el sistema en su totalidad, para un total de 17 viviendas correspondientes a las encontradas en la zona y que se pretenden energizar, a partir del sistema eólico diseñado. Se procede entonces a diseñar la red de baja tensión, con el fin de suplir la energía necesaria por los habitantes de esta zona del municipio.

A continuación, se presenta el plano de distribución eléctrica del sistema eólico (Plano 1) que cuenta con 01 circuito y el diagrama unifilar (Plano 2) del sistema eólico.

Todo lo anterior se lleva a cabo y se plantea nuevos puntos con el fin de lograr una instalación eléctrica de calidad en apego a la norma vigente. Dejando la salvedad de que no se calculan los accesorios eléctricos dentro de la vivienda, ya que estos son ajenos al proyecto. Sin embargo, deben cumplir con la norma RETIE para instalaciones residenciales.

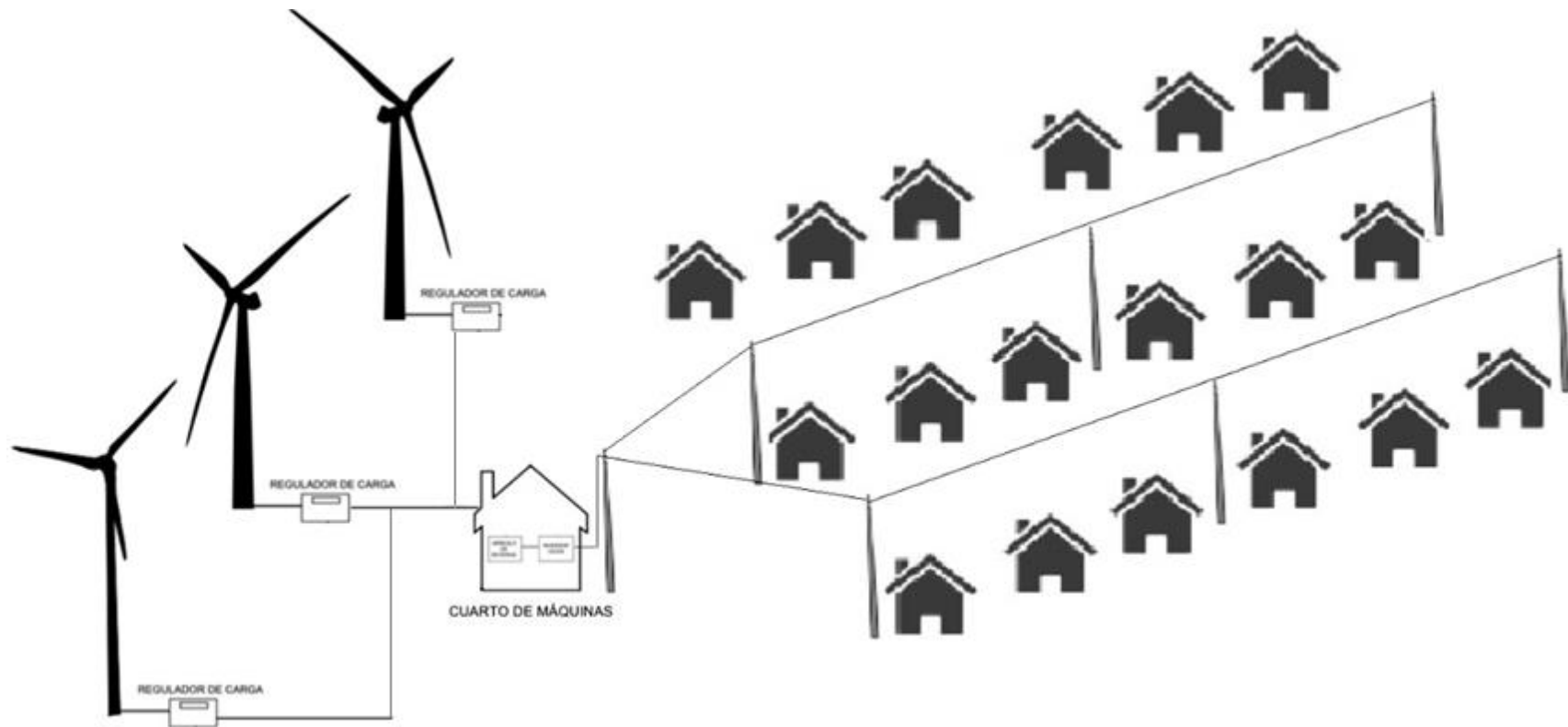
La alimentación de cada vivienda se tomará monofásica del sistema eólico formado por tres conductores que serán una fase, un neutro y de protección puesta a tierra la tensión del servicio será 120 V y 60 Hz.

Se toman diez postes de hormigón o Ferro concreto mostrados en la Tabla 11, con el distanciamiento necesario para el funcionamiento del sistema (Plano 2). La altura de los postes será de 12 metros.

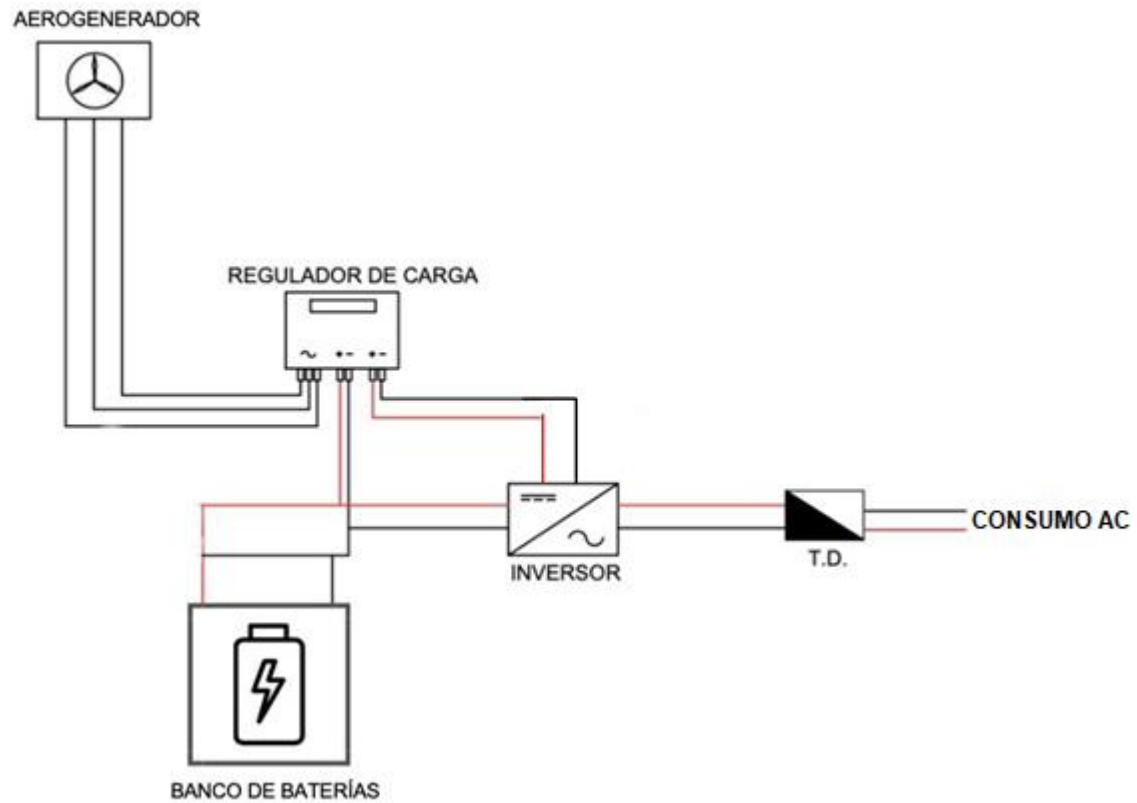
Tabla 11: Uso de postes normalizados (ENSA).

ÁREAS METRO Y ÁREAS URBANAS	ÁREAS RURALES	APLICACIÓN
Hormigón 11 m Tipo 9	Madera 30' Clase 9	Para extensión en BT, sin media tensión.
Hormigón 11 m Tipo 9	Madera 35' Clase 7	Para circuitos en media tensión, monofásicos y retenidas.
Hormigón 11 m Tipo 13 (500 kg)	---	Final de calle y ángulos sin retenidas.
Hormigón 12 m Tipo 13	Madera 40' Clase 5	Para circuitos en media tensión, bifásicos y trifásicos.
Hormigón 14 m Tipo 19	Madera 45' Clase 4	Para circuitos en media tensión, doble circuito, trifásicos y derivaciones.

Plano 1. Distribución eléctrica del diseño de generación eólico.



Fuente: Elaboración propia.

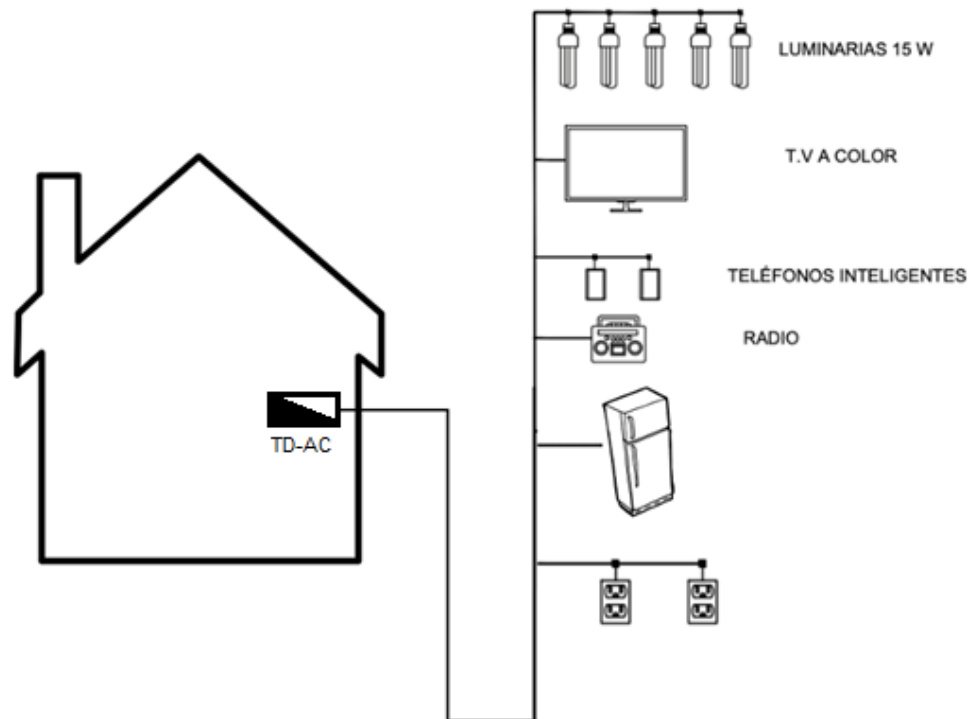
Plano 2. Diagrama unifilar del sistema eólico a modo general.

Fuente: Elaboración propia.

Fase IV: Lineamientos de estructura física

Se establece la distribución según la disposición de cargas determinadas para el sistema de generación eólico, se muestra en la Figura 38.

Figura 32. Distribución de las cargas del sistema eólico.



Fuente: Elaboración propia.

Fase V: Presupuesto del sistema

La estimación de costos se estableció en pesos colombianos (COL\$) (Tabla 12). Solamente fue tenido en cuenta el equipo de generación eólica diseñado, para el total de 17 viviendas establecidas en este proyecto. Cabe aclarar que en el momento de implementar el sistema eólico en la práctica, también se requerirá calcular los costos de obra civil, instalación de componentes y otros que pueda generar el proyecto.

Tabla 12: Costos del equipo de generación eólica propuesto en COL.

EQUIPO DE GENERACIÓN EÓLICA				
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	PRECIO TOTAL
1	Aerogenerador ZONHAN ZH1.5	3	\$ 8.658.000,00	\$ 25.974.000,00
2	Baterías 12 V – 150 Ah	96	\$ 1.154.400,00	\$ 110.822.400,00
3	INVERSOR-GRID-TIE-60KVA-TRIFASICO-ON-GRID	1	\$ 20.800.000,00	\$ 20.800.000,00
4	Regulador ISRAEL777 48V/60A	3	\$ 850.000,00	\$ 2.550.000,00
5	Cableado eléctrico AWG 4 (m)	120	\$ 17.000,00	\$ 2.040.000,00
6	Cableado eléctrico cuádruplex en aluminio trenzado 1C/C-2/0 forrado 194v A (m)	300	\$ 16.000,00	\$ 4.800.000,00
7	Postes 12m.	10	\$ 689.900,00	\$ 6.899.000,00
8	Construcción cuarta de maquinas	1	\$ 5.000.000,00	\$ 5.000.000,00
9	Cofre distribución 400x300x200	1	\$ 159.900,00	\$ 159.900,00
10	Totalizadores 250 A trifásicos	1	\$ 215.000,00	\$ 215.000,00
11	Varios	Gl.	\$ 15.000.000,00	\$ 15.000.000,00
TOTAL				\$ 1 94.260.300,00

Fuente: Elaboración propia, basada en los precios actuales del mercado.

Observaciones:

- **Mano de obra:** Este costo no se considera para este presupuesto ya que se espera que al momento de la implementación se realice una socialización con la comunidad, para llevar a cabo un trabajo comunal, en el cual, los habitantes de la zona se interesen por una apropiación del sistema. Generando una sostenibilidad reflejada en el cuidado del mismo. Además, este proyecto representa un nicho de trabajo para los mismos habitantes de la región, por lo cual, puede generar un interés en su integración laboral. Tiempo en el cual se fijarán estos costos de mano de obra.

Los sistemas eólicos aún siguen siendo de alto costo. Sin embargo, como es estudiado en el trabajo *“Prefactibilidad de sistemas eólicos y solares para autosuficiencia residencial en cuatro localidades urbanas de Colombia: Implicación de nuevos incentivos incluidos en la*

Ley 1715”, la inversión en sistemas de energía renovable a escala residencial debe considerarse en un contexto más amplio que solo su mérito financiero.

Conclusiones

- Con el presente proyecto se estableció el diseño de un sistema de generación de energía eléctrica a partir del potencial eólico del municipio de Aquitania, considerándose cumplido el Objetivo General y los objetivos específicos planteados en el presente proyecto.
- Para ello, primero se realizó un estudio de la región, que situó a la vereda Mombita como beneficiada para implementar el sistema, por su potencial eólico y por priorizarse zonas que aún no contaran con suministro eléctrico, con el fin de impactar especialmente a regiones de difícil acceso. El diseño se basó en la velocidad del viento de la región, el cual presenta una constancia sobre los 5 m/s, y se adoptó un aerogenerador con las características de generación de potencia requerida para energizar las cargas consideradas en el estudio para una vivienda de la vereda. Se propuso el diseño articulado para un total de 17 viviendas sin energizar, con lo cual se lograrían impactar un aproximado de 102 habitantes.
- Finalmente, se realizó un estimado de los costos, que alcanzan la cifra de 95 344 891 COP correspondiente al equipo de generación eólico propuesto.
- En los sistemas no interconectados a la red, es necesario fijar un análisis para que los incentivos creados para las ZIN se masifiquen de una forma mas acelerada, si

bien no hay una contribución a la red, la amortiguación de los costos se refleja en la creación de nuevos puestos de trabajo, desarrollo económico de las regiones, disminuciones de brechas y lo mas importante, la llegada de energía eléctrica de carácter renovable y amigable con el medio ambiente.

- En el desarrollo de diseños de sistemas de energía renovable es necesario tener en cuenta el mantenimiento que se tiene que dar al banco de baterías, muchas veces al no tener en cuenta esta variable los sistemas quedan a la deriva reduciendo su vida útil y posteriormente quedando inutilizados.
- Los sistemas de generación eléctrica a partir de potenciales renovables constituyen una solución de fácil implementación, consecuente con el medio ambiente y como característica no menos importante, su construcción modular, permite que sean sistemas que pueden llegar a regiones de difícil acceso que son por lo general donde se encuentra población vulnerable por el desarrollo de brechas sociales, económicas que no han permitido su desarrollo, contribuyendo así con la disminución de brechas digitales.
- En Aquitania el principal medio económico es la agricultura y la ganadería. Los sistemas de generación eólica son una solución de producción energética apta para este tipo de zonas del país, debido a que pueden integrarse fácilmente a la actividad agrícola de las regiones sin repercutir en el desarrollo de los trabajos realizados en las zonas, por su altura estructural no requiere de una región independiente para su funcionamiento, brindando oportunidades de desarrollo económico y mejoras en la calidad de vida de los habitantes.

Recomendaciones

Se recomienda para un posterior diseño considerar un sistema híbrido que convine la generación fotovoltaica junto con la eólica, debido a que la zona además del potencial eólico presentado también tiene potencial de radiación solar; permitiendo que sea un sistema sinérgico en el cual, en periodos donde haya baja velocidad en el viento, sea suplido mediante el potencial solar.

Anexos

Anexo A: Investigación y análisis del recurso eólico en Aquitania - Boyacá.

A continuación se presentan las velocidades promedio de viento encontradas en municipios del departamento de Boyacá con características similares a nuestra zona de estudio.

Tabla 13: Velocidad promedio del viento en municipios con condiciones similares a Aquitania.

Nombre del proyecto de investigación	Municipio (Departamento de Boyacá)	Altura msnm	Velocidad promedio del viento	Metodo de recolección y análisis de datos
Diseño y Construcción de un Prototipo para Aerogeneración de 1kW	Aquitania	3030	Aproximadamente 10 m/s.	Construcción de la rosa de los vientos del lugar de emplazamiento (la finca Soriano, vereda San José municipio de Aquitania, Boyacá). Promedio de velocidades construido con los datos recolectados desde el 1 de mayo del 2011 hasta el 28 de septiembre de 2012. La recolección de datos se realizó con un sistema de veleta y anemómetro de cazoletas a 10 m de altura con sistema de registro de datos configurado para tomar un registro cada 5 minutos.

Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá, departamento de Boyacá a 3534 m.s.n.m	Paipa y Sotaquirá	3534	Vientos que oscilan entre 3 y 5 m/s.	La investigación se desarrolló a partir de revisar y analizar la dinámica de la dirección y la velocidad del viento en diversas zonas de alta montaña, y realizar mediciones durante seis meses en el páramo de Chontales, ubicado en los municipios de Sotaquirá y Paipa, a 3534 msnm, mediante la instalación de una estación de monitoreo del viento denominada Los monjes, la cual estuvo operando los meses de junio, julio, agosto, septiembre y diciembre de 2010 y enero de 2011. Durante los 184 días de evaluación se reco- pilaron un total 4416 datos de velocidad y dirección del viento de periodicidad horaria. La información generada a partir de estos análisis permitió observar que el promedio total de velocidad del viento para los 184 días de evaluación fue de 4,57 m/s. correspondiente con los datos de IDEAM que estiman que en la zona montañosa centro occidental de Boyacá, que corresponde a los macizos montañosos de La rusia, Chontales e Iguaque, tienen vientos que oscilan entre 3 y 5 m/s, con velocidad media del viento en superficie, en promedio multianual.
Evaluación del potencial eólico en el Alto de Soracá –Tunja	Tunja	2484	Velocidad de 6.7035 m/s.	La información utilizada para este trabajo es obtenida mediante una estación meteorológica Davis Vantage Pro 2, instalada en el alto de Soracá de la ciudad de Tunja. Considerando los resultados presentados en el atlas de viento, es evidente que la zona de estudio presenta un potencial eólico activo para explotar, con una velocidad promedio de 6.70 m/s puede ser clasificado este viento como un viento persistente.
Diseño de un aerogenerador para la producción de energía eléctrica en la finca “El alto del Gavilán”, Boyacá	Saboyá	2600	Velocidad de 5.5 m/s	Se tomaron datos del IDEAM y se tomaron datos propios a través del anemómetro en diferentes puntos. Se seleccionaron varios puntos para la toma de estos datos. Estos datos fueron tomados en puntos diferentes de la finca “El alto del Gavilán”, en Boyacá.

Se presenta a continuación los apartados principales tomados del estudio: “Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá”, del cual, se tomo como punto de partida para el desarrollo de este proyecto de investigación. Se establece solamente del municipio de Aquitania ya que esta es nuestra zona objeto de investigación.

Tabla 14: Velocidad promedio del viento municipio Aquitania.

Nombre del proyecto de investigación	Municipio (Departamento de Boyacá)	Altura msnm	Velocidad promedio del viento	Metodo de recolección y análisis de datos
Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá	Aquitania	3030	5 m/s	<p>La identificación de estos puntos de potencial eólico se realizó a partir de los registros de las estaciones meteorológicas que miden dirección y velocidad del viento en el país, de un total de 101 estaciones empleadas en la elaboración del Atlas en el año 2006, se emplearon siete estaciones en el departamento de Boyacá y para la versión interactiva del Atlas en el año 2015 se emplearon seis.</p> <p>Metodo: En el departamento de Boyacá se encuentran localizadas 304 estaciones. Sin embargo, únicamente 26 miden la velocidad y dirección del viento y 18 de éstas cuentan con registros.</p> <p>Las estaciones meteorológicas miden a 10 metros de altura, la altura recomendable para realizar medidas de viento de la World Meteorological Organization (WMO) para evitar que el efecto de la superficie altere las mediciones. De las 18 estaciones del IDEAM, todas miden el viento a 10 metros según los estándares recomendados, al igual que las tres estaciones de la CAR.</p> <p>De acuerdo a la distribución de frecuencias del viento y la velocidad media estimada para cada una de las estaciones, existen periodos del año durante ciertas horas del día en los cuales para ocho estaciones la velocidad media en superficie es superior a los 5 m/s, la cual corresponde a la velocidad de referencia para identificar áreas de potencial eólico.</p> <p>En el Atlas se identificaron registros de estaciones en el departamento con velocidades promedio del viento superiores a los 4 m/s, dentro de las cuales se resalta la estación Gachaneca en el municipio de Samacá al occidente del departamento, con intensidades superiores a 5 m/s, el promedio de velocidad del viento se ubican a lo largo del año entre las 8 a.m. y 5 p.m. Sin embargo, hacia la mitad de año pueden alcanzar intensidades promedio cercanas a los 7 m/s extendiéndose desde las 5 a.m. hasta las 5 p.m. La dirección predominante de donde sopla el viento es del sur-sureste (UPME, IDEAM, 2006), y la estación Villa Carmen también en el municipio de Samacá, en la cual el ciclo diurno muestra vientos con intensidades promedio superiores a 5 m/s, principalmente entre las 10 a.m. y 5 p.m. a lo largo del año. Sin embargo, en los meses de mitad de año las velocidades promedio alcanzan los 7 m/s. La dirección predominante de donde sopla el viento es del sureste (UPME, IDEAM, 2006).</p>

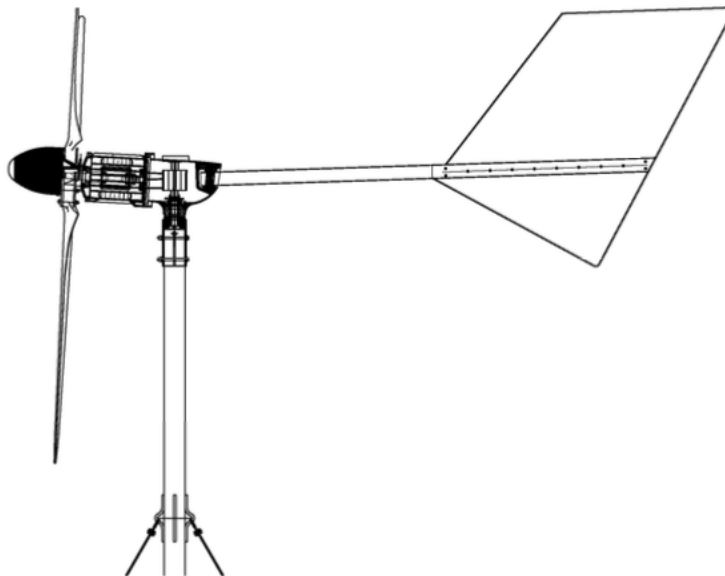
Tabla A-1: Registros hidrológicos en las zonas de estudio.

N°	Código Estación	Nombre	Tipo	Categoría	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha de Instalación
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)									
1	2312510	Buenavista	CON	CP	Buenavista	5°30'53.7" N	73°56'35.2" W	2200	15/11/1993
2	2401522	Villa Carmen	CON	CP	Samacá	5°30'33.8" N	73°29'44.8" W	2600	15/02/1968
3	2401529	Gachaneca	CON	CP	Samacá	5°26'0" N	73°33'0" W	3400	15/07/1979
4	2401530	Villa de Leiva	CON	CP	Villa De Leiva	5°39'21" N	73°32'38.2" W	2215	15/12/1979
5	2403512	Surbata - Bonza	CON	AM	Duitama	5°48'8.8" N	73°4'28.1" W	2485	15/03/1944
6	2403513	UPTC	CON	CP	Funja	5°32'35.079"N	73°21'38.9" W	2690	15/02/1962
7	2403515	Belencito	CON	CP	Nobsa	5°46'53.7" N	72°53'39.5" W	2530	15/02/1967
8	2403517	Tunguavita	CON	AM	Paipa	5°44'45.3" N	73°6'58.9" W	2470	15/01/1968
N°	Código Estación	Nombre	Tipo	Categoría	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)	Fecha de Instalación
9	2403535	Andalucía	CON	CP	Duitama	5°54'4.1" N	73°3'30" W	3265	15/09/1996
10	3507504	Inst. Agr. Macanal	CON	CP	Macanal	4°58'27.7" N	73°19'0.3" W	1300	15/07/1982
11	2312516	San Pablo de Borbur	AUT	CP	San Pablo De Borbur	5°38'49.3" N	74°4'16.7" W	742	14/12/2004
12	2403538	Nev. Del Cocuy	AUT	CP	Suicán	5°30'32.8" N	72°18'51" W	4676	19/11/2005
13	2403543	Tunguavita Automática	AUT	AM	Paipa	5°44'45.3" N	73°6'58.9" W	2470	15/12/2004
14	3507507	Chinavita	AUT	AM	Chinavita	5°13'9.3" N	73°21'1.4" W	2012	06/03/2005
15	3508506	Zetaquirá	AUT	CP	Zetaquirá	5°17'41.8" N	73°10'11.8" W	1436	12/12/2004
16	3508507	Sta. María	AUT	CP	Santa María	4°50'28.5" N	73°15'24.1" W	1300	10/03/2005
17	3508508	La Capilla	AUT	CP	La Capilla	5°5'57.1" N	73°26'9.6" W	1917	08/03/2005
18	3509512	Aquitania	AUT	CP	Aquitania	5°33'23.9" N	72°52'54.3" W	3021	06/12/2004
Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)									
1	24015180	Esclusa Tolón	CON	CP	Chiquinquirá	5°37'0"N	73°47'0"W	2545	15/05/1963
2	35095040	El Olarte	CON	CP	Aquitania	5°29'0"N	72°56'0"W	3030	15/02/1984
3	24015504	Ráquira	AUT	CP	Ráquira	5°32'8.44"N	73°38'28"W	2260	04/12/2010

Anexo B: Aerogenerador ZONHAN ZH1.5

Generador propuesto a implementar, encontrado en la empresa “Idelect” (Idelect, s.f.) dedicada atender las necesidades de suministro energético a partir de la utilización de energía renovables, está ubicada en la ciudad de Bogotá, razón por lo cual se facilita la adquisición de los aerogeneradores. A continuación, se muestran las características técnicas del aerogenerador, disponible en (ProViento, s.f.).

Operating & Installation Manual (ZH1.5kw wind turbine system)






Startup wind speed	2.5 m/s
Working wind speed	3-25 m/s
maximum wind speed	50 m/s
Working voltage	DC24/48V (higher voltage optional)
Generator type	Three phase, permanent magnet
Charging	Constant voltage
Speed regulation method	Autofurl
Tower height	12mtrs
Life time	10-15years

Rotor Diameter	3.2mtrs
Material and number of the blades	3 x reinforced fiber glass
Rated power/maximum power	1.5kW / 1.8 kW
Rated wind speed	9m/s

Anexo C: Batería

Suministradas por la empresa “Pro viento”, ubicada en la ciudad de Bogotá. A continuación, se muestran las características técnicas de la batería, disponible en (ProViento, s.f.).

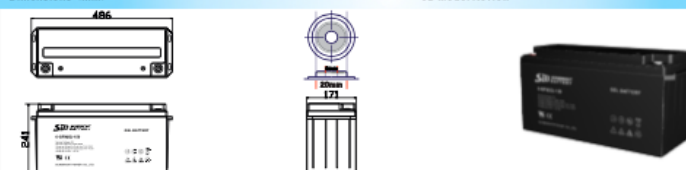





6-GFM(G)-150Ah Gel Battery Specification

We are an ISO9001 certified organization. And the products are approved by CE & UL. The nominal voltage of this series is 12V. And the capacity ranges from 33Ah to 250Ah. Their typical applications include: emergency lighting systems, electricity power supply systems, communication systems, UPS systems, starting systems, solar systems etc.

Battery Construction		General Features
Component	Material	Maintenance free
Positive plate	Lead dioxide	Convenient for installation
Negative plate	Lead	Safety and no leakage
Container	ABS	Excellent recharge and discharge performance
Cover	ABS	Low self-discharge rate, charge each standby 6 months, temperature 25°C
Safety valve	Rubber	Adapt to high or low temperature
Terminal	Copper	Good deep discharge performance
Electrolyte	Gelled acid	Longer cycle life
		UL approval

Performance Characteristics	
1. Dimension and weight	
Length	486mm
Width	171mm
Height	241mm
Total Height	241mm
Reference Weight	47kg
2. Functional Parameter	
Rated Voltage	12V
Numbers of Cells	6 Cells
Designed Life	10-12 Years
3. Rated Capacity at 25°C (77° F)	
10 hr rate (0.1C, 10.8V)	150Ah
3 hr rate (0.25C, 10.8V)	108.7Ah
1 hr rate (0.55C, 10.5V)	82.4Ah
4. Capacity affected by Temperature (10hour rate)	
40 °C (104° F)	103%
25 °C (77° F)	100%
0 °C (32° F)	85%
-15°C (5° F)	65%
5. Charge Method: constant-voltage charging at 25°C (77° F)	
Cyclic use	14.4-14.9V
Maximum charging current	37.5A
Temperature Compensation	-30mV/°C
Float Use	13.6-13.8V
Temperature Compensation	-20mV/°C
6. Environment Temperature Requirements	
Discharge Temperature	-20-60°C
Charge Temperature	0-50°C
Storage Temperature	-20-60°C
7. Inner Resistance & Max. Discharge Current	
A fully charged battery at 25°C (77° F)	4mΩ
Max. Discharge Current	2250A (5s)
Short Circuit Current	7500A
8. Self-discharge	
3% Of the capacity per month at 25°C (77° F)	
Capacity after 3 month storage	91%
Capacity after 6 month storage	82%
Capacity after 12 month storage	64%
Dimensions (mm)	
	

Constant-current discharge parameter Unit: A (25°C)											
F.V/Time	20min	30min	45min	1h	2h	3h	5h	6h	8h	10h	20h
1.80V/cell	159.51	122.20	91.95	77.07	47.93	36.22	25.37	21.83	17.44	15.00	8.23
1.75V/cell	179.27	134.39	99.39	82.44	50.73	38.17	26.34	22.68	17.93	15.32	8.40
1.70V/cell	193.17	143.90	105.61	87.32	53.78	39.76	27.20	23.41	18.54	15.73	8.50
1.65V/cell	200.98	149.51	109.27	90.61	55.24	41.10	27.68	23.78	18.78	15.85	8.59
1.60V/cell	217.80	160.00	117.44	96.10	57.44	42.68	28.54	24.39	19.15	16.22	8.71

Constant-current discharge parameter Unit: V (25°C)											
F.V/Time	20min	30min	45min	1h	2h	3h	5h	6h	8h	10h	20h
1.80V/cell	301.34	233.17	177.07	149.27	93.17	70.61	49.88	43.17	34.63	29.88	16.46
1.75V/cell	334.88	254.15	190.00	158.90	98.54	74.39	51.71	44.51	35.61	30.49	16.71
1.70V/cell	356.83	269.76	200.24	167.20	103.90	77.32	53.17	45.98	36.59	31.10	16.95
1.65V/cell	367.32	277.44	205.98	172.44	106.10	79.39	54.02	46.59	37.07	31.46	17.07
1.60V/cell	393.54	294.15	219.63	182.20	109.76	82.20	55.61	47.56	37.67	32.01	17.32

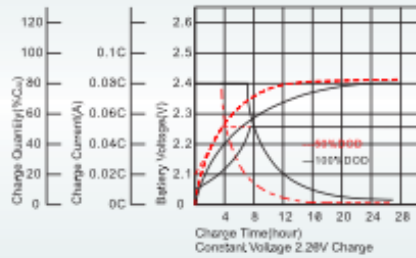
EDITION 2014



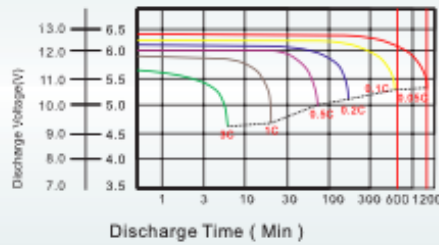
Sunbright Power Co.,LTD.

6-GFM(G)-150Ah Gel Battery Specification

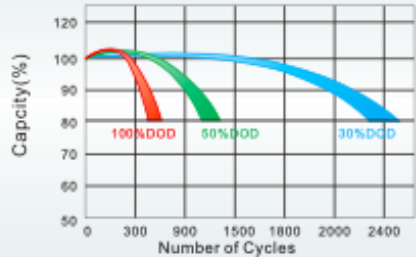
Charge Characteristics for Float Use @ 25°C/77°F



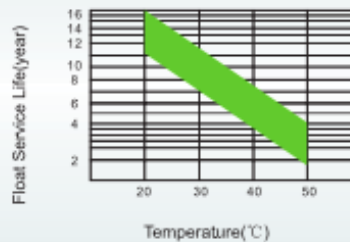
Discharge Characteristics at Various Rates @ 25°C/77°F



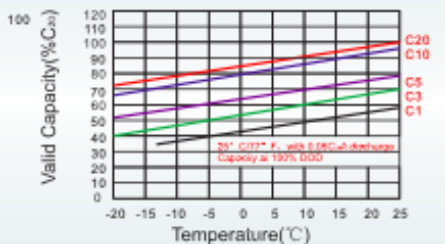
Cycle Life in Relation to Depth of Discharge



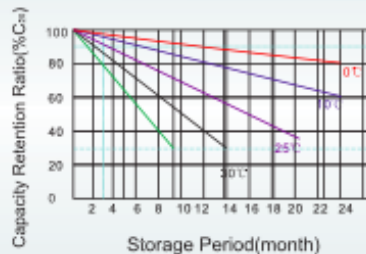
Float Service Life



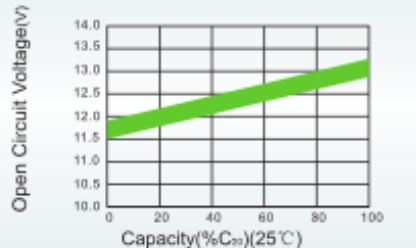
Temperature and Valid Capacity



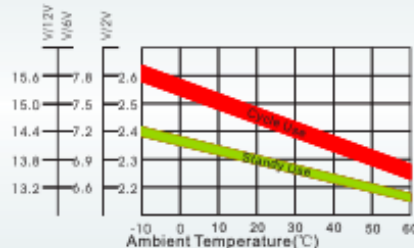
Self Discharge Characteristics



Capacity and Open Circuit Voltage



Relationship between Charging Voltage and Temperature



EDITION 2014



SUNBRIGHT POWER CO.,LTD.

ADD: No.18, Keji Road, Science & Technology Industry Zone, Ninghai, Zhejiang, China, 315600

Tel: +86-574-88111982 Fax: +86-574-56655050

E-mail: sale@sbb-battery.com

Http://www.sbb-battery.com



Anexo D: Regulador ISRAEL777 Mppt 60 Amp 3200w 12v 24v 36v 48v

Suministradas por la empresa “VENTASYSERVICIOSISRAELIMPOR”, ubicada en la ciudad de Medellín Antioquia. A continuación, se muestran las características técnicas del regulador.



DESCRIPCIÓN

Marca ISRAEL777

Modelo ISRAEL

Controlador solar de refrigeración por ventilador MPPT 60A

Principales características

12V/24V/36V/48VAuto, MaxPVInput160V

Tecnología de seguimiento de PowerPoint máximo inteligente, adecuado para tipos de baterías de ácido, gel ventilado y litio sellados, retroiluminación multifunción Pantallas LCD

Con un código de referencia por defecto exacto para la corrección. Enfriamiento de aire forzado por ventilador, temperatura de encendido del ventilador > 40 ° C, apagado <35 ° C

Diseño de die-castaluminum, asegurando una excelente disipación del calor

2 años de garantía

Tipo de regulador: Step-down, Voltaje mínimo de entrada - Voltaje máximo de entrada: 14V - 70V. Voltaje mínimo de salida - Voltaje máximo de salida: 14V - 70V. Corriente máxima de salida: 60 A. Con voltaje de salida regulable: Sí

Anexo E: INVERSOR-GRID-TIE-60KVA-TRIFASICO-ON-GRID

Suministradas por la empresa "SOLARTEX", ubicada en la ciudad de Bogotá. A continuación, se muestran las características técnicas.



FUNCIONAMIENTO

The 50 & 60kW medium power CPS three phase string inverters are designed for ground mount, large rooftop and carport applications. The units are high performance, advanced

and reliable inverters designed specifically for the North American environment and grid. High efficiency at 98.8% peak and 98.5% CEC, wide operating voltages, broad temperature ranges and a NEMA Type 4X enclosure enable this inverter platform to operate at high performance across many applications. The CPS 50/60kW products ship with either the standard wire-box or the H4 style wire-box, each fully integrated and separable with touch safe fusing, monitoring, and AC and DC disconnect switches. The CPS Flex Gateway enables monitoring, controls and remote product upgrades.

Características principales

NEC 2014 compliant & UL listed Arc-Fault circuit protection

0-90° Mounting orientation for lay flat roof installs

Touch safe DC Fuse holders adds convenience and safety

CPS Flex Gateway enables remote FW upgrades

Integrated AC & DC disconnect switches

Optional factory installed H4 connectors

MPPT's with 5 inputs each for maximum flexibility

Copper and Aluminum compatible AC connections

NEMA Type 4X outdoor rated, tough tested enclosure

Advanced Smart-Grid features (Rule 21, HECO compatible)

Separable wire-box design for fast service

Standard 10 year warranty with extensions to 20 years

Generous 1.5 DC/AC Inverter Load Ratio

Model Name	CPS SCA50KTL-DO/US-480	CPS SCA60KTL-DO/US-480
DC Input		
Max. PV Power	75kW (25kW per MPPT)	90kW (30kW per MPPT)
Max. DC Input Voltage	1000Vdc	
Operating DC Input Voltage Range	200-950Vdc	
Start-up DC Input Voltage / Power	330V / 80W	
Number of MPP Trackers	3	
MPPT Voltage Range	480-850Vdc	540-850Vdc
Max. Operating Current (Imp)	108A (36A per MPPT)	114A (38A per MPPT)
Max. PV Input Current (Isc x 1.25)	180A (60A per MPPT)	
Number of DC Inputs	15 inputs, 5 per MPPT	
DC Disconnection Type	Load rated DC switch	
AC Output		
Rated AC Output Power	50kW	60kW
Max. AC Output Power	50kVA	60kVA
Rated Output Voltage	480Vac	
Output Voltage Range ¹	422 - 528Vac	
Grid Connection Type	3Φ / PE / N	
Nominal AC Output Current @480Vac	60.2A	72.2A
Rated Output Frequency	60Hz	
Output Frequency Range ¹	57 - 63Hz	
Power Factor	>0.99 (±0.8 adjustable)	
Current THD @ Rated Load	<3%	
AC Disconnection Type	Load rated AC switch	

Bibliografía

- Álvarez, C. W., Alvarado, F. A., & Cardona, C. (2014). Evaluación del potencial eólico en el alto de Soracá –Tunja. *Revista Colombiana de Tecnologías Avanzada*, Volumen 2 - Número 24.
- Aragón, V. D., Lopez, G. I., Escarela, P. R., Campero, L. E., & Guzman, J. (2014). La energía eólica en la generación de energía eléctrica en el mundo. *17 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura - Palacio de convenciones de la Habana* (pág. 10). Cujae.
- Avellaneda, C. A., & Varila, Q. J. (2013). Estudio del potencial de generación de energía eólica en la zona del páramo de Chontales, municipios de Paipa y Sotaquirá, departamento de Boyacá a 3534 m.s.n.m. *AVANCES Investigación en Ingeniería*, Vol. 10 - No. 2.
- Cardozo, M. F. (2016). *Calameo*. Obtenido de Plan de desarrollo municipal Aquitania 2016-2019,: <https://es.calameo.com/read/0047100161acd3f4c18db>
- Castro, M. J. (2008). *Optimización Global de Parques Eólicos Mediante Algoritmos Evolutivos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Chaparro, J. (2013). *Cambios institucionales para preservar la cantidad y la calidad del agua en la cuenca*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Chaparro, S. A., Carreño, B. C., & Gonzales, C. M. (2014). Diseño y Contrucción de un Prototipo para Aerogeneración de 1kW. *Ingenio Magno*, 5, pp. 52-60.
- Comisión de Regulación de Energía y Gas GREG. (2008). *Distribución de Energía Eléctrica*. Bogotá D.C. -Colombia.
- Corpoboyacá. (2020). *Corpoboyacá*. Obtenido de Municipio de Aquitania: <https://www.corpoboyaca.gov.co/seguimiento/municipio-de-aquitania/>
- Cuesta, M. J., Pérez, M., & Cabrera, J. A. (2008). *Aerogeneradores de potencia inferior a 100kW*. España: Centro de investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas.
- ENSA. (s.f.). *Especificaciones Generales Para La Construcción De Líneas Aéreas De Distribución Eléctrica 13.2 kV Y 34.5 kV*. Obtenido de https://www.ensa.com.pa/sites/default/files/02_capitulo_1_normas_de_construccion_aerea_ver.2.2.pdf
- EPM. (2010). *Jepírachi: una experiencia con la comunidad indígena Wayuu de la Alta Guajira colombiana*. Empresas Públicas de Medellín.

- Eraso, C. F., Escobar, R. E., Paz, D. F., & Morales, C. (2017). Metodología para la determinación de características del viento y evaluación del potencial de energía eólica en Túquerres - Nariño. *Revista Científica*, 1(31), 19-31.
- ESE Salud Aquitania. (2019). *Análisis de situación de salud con el modelo de los determinantes sociales de salud, municipio de Aquitania Boyacá 2019*. Municipio de Aquitania: Área de Vigilancia en Salud Pública.
- Europe, D. t. (2007). *SUNFIELDS EUROPE*. Recuperado el Marzo de 2021, de Batería AGM o Gel: www.sfe-solar.com
- Gobernación de Boyacá. (2020). *Dvisión Política Municipios*. Obtenido de Aquitania-Veredal: <https://www.dapboyaca.gov.co/wp-content/uploads/2015/06/AQUITANIA-VEREDAL.pdf>
- González, C. (2019). *El viento del este llega con revoluciones. Multinacionales y transición con energía eólica en territorio Wayúu*. Bogotá: Fundación Heinrich Böll.
- Gonzalez, C. N., & Sanchez, H. J. (2019). *Diseño de un aerogenerador para la producción de energía en la finca "El alto del Gavilán", Boyacá*. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América - facultad de ingenierías - Programa de ingeniería mecánica.
- GREEN21, G. E. (2020). Destacados: Colombia avanza con éxito 9 proyectos de energía eólica y 5 de energía solar. *GO ECO GREEN21*.
- Iberdrola. (2020). *Las principales cumbres climáticas. Obtenido de Acuerdos internacionales sobre el cambio climático*. Obtenido de <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad>
- IDEAM. (2016). *Boletín de predicción climática*. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales - Ministerio de Ambiente.
- Idelect. (s.f.). *Idelect - Ingeniería y diseño electrónico*. Obtenido de <http://www.idelect.net/index.html>
- INCONTEC. (1998). *NTC2050 - CEE*. Obtenido de Norma Técnica Colombiana 2050: <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/ntc%2020500.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales . (2018). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- León, V. F., García, J. M., & Krejci, E. (2019). Pre-feasibility of wind and solar systems for residential self-sufficiency in four urban locations of Colombia: Implication of new incentives included in Law 1715. *Renewable Energy*, 1082-1091.

- Lopez, M., Vannier, J.-C., & Sadarnac, D. (2007). Sistemas de conversión de energía eólica control y diseño. *Asociation Chilienne de Controle Automatique*.
- Mathew, S. (2006). *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*.
- Mercadolibre. (s.f.). Obtenido de Cable calibre #4: <https://articulo.mercadolibre.com.co>
- Messina, D. (2020). *Contribuciones determinadas a nivel nacional del sector eléctrico en América Latina y el Caribe Análisis de la transición hacia el uso sostenible de las fuentes energéticas*. (CEPAL, Ed.) Santiago: Naciones Unidas - Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- MinMinas GM - GREG. (2017). *Resolución No. 121 DE 2017*. Obtenido de Comisión de Regulación de Energía:
<http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/b5341fbcfab96db80525819b006d42fa?OpenDocument>
- Montañez, V. C. (2018). *Caracterización y mapeo participativo de servicios ecosistémicos en paisajes socio-ecológicos de producción. Caso de estudio: Aquitania, Boyacá (Colombia)*. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana Facultad de Estudios Ambientales y Rurales (EAR) Carrera de Ecología.
- Moragues, J., & Rapallini, A. (2003). *Energía eólica*. Instituto Argentino de la Energía "General Mosconi".
- Moreno Figueredo, C. (2006). *Breve guía de los principales elementos que conforman los aerogeneradores actuales*. Cuba.
- Mosquera, V. C., Martinez, C. M., & Hansen, E. W. (2010). Caracterización estructural de la materia orgánica de tres suelos provenientes del municipio de Aquitania-Boyacá, Colombia. *Revista colombiana de Química*, 39(1), 47-60.
- Moyano, C. D., & Pinzón, C. C. (2018). *Diseño de un prototipo de turbina eólica de eje vertical para pruebas de laboratorio*. Bogotá D.C.: Fundación Universidad de América - Facultad de ingenierías - Programa de ingeniería mecánica.
- Novoa, C. J. (2020). *Impactos del cambio climático en los cultivos de papa del departamento de Boyacá – Colombia, análisis de causas y soluciones para la región*. Bogotá: Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD.
- Oliveira, M. d. (2013). *Fundamentos de la energía eólica*. Rio de Janeiro: Editorial libros técnicos y científicos Ltda.
- Palacios Briones, B. P. (2019). *Diseño de un sistema eólico para suministrar energía eléctrica al fundo Chucupe – Lambayeque*. Chiclayo-Perú: Universidad César Vallejo-Facultad de ingeniería.

- Perdomo, D. A., Jaimes, H. M., & Almeida, J. (Diciembre de 2014). La energía eólica como energía alternativa para el futuro en Colombia. *EL CENTAURO*(9), 10.
- Pereira Blanco, M., & Turizo Pereira, L. A. (2020). Medidas para la implementación del uso racional y eficiente de la energía. Caso de las energías renovables en Colombia: Estado del Arte, avances y retos. *Revista Jurídica*, 17, 43-72.
- Pitteloud, J. (2019). *Wind energy International*. Obtenido de Global wind installations: <https://library.wwindea.org/global-statistics/>
- ProViento. (s.f.). *ProViento S.A.S. - Energías Renovables*. Obtenido de Baterías: <http://www.proviento.com.co/baterias.html#>
- Reyes, M. Y. (2008). *Criterios para el diseño de parques eólicos*. Santa Clara, Cuba: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas - Facultad de ingeniería eléctrica - Departamento de Electroenergética.
- Ruiz, X. (2017). *Latinoamérica y España: caminos opuestos en el fomento de las energías renovables*. Valencia: Universidad Internacional de Valencia.
- Santander, B. F. (2020). Consideraciones de estudio para aprovechar la energía eólica y combatir el cambio climático. En C. A. Rodríguez Castañón, & J. Chihuahue Alcantar, *El cambio climático. Una verdad irrefutable*. Mexico: Publicaciones UPG de la Universidad Politécnica de Guanajuato.
- Siabato, B. R. (2018). *Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Solener. (s.f.). *sm1500*. Obtenido de Inversores de onda senoidal modificada: <https://www.solener.com/sm1500.html>
- Sosapanta, S. J. (2020). *Energía eólica en Colombia: panorama y perspectivas bajo la triple cuenta de resultados*. Universidad Nacional Abierta y a Distancia – UNAD.
- UPME. (2013). *Informe de gestión 2013*. Unidad de planeación minero energético - Ministerio de Minas y Energía.
- UPME. (2016). *Unidad de Planeación Minero Energético*. Recuperado el Febrero de 2021, de Índice de Cobertura Energía Eléctrica 2016: <https://upmeonline.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=2126e84d9dbc476988d1acb704a40b1f>
- UPME. (2017). *Plan de expansión de referencia generación - transmisión 2017- 2031*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero Energética.

- Valenzuela, Z. M. (2009). *Tecnologías Solar-Eólica-Hidrógeno-Pilas de Combustible como fuentes de energía*. Ecatepec de Morelos, Estado de Mexico, Mexico: Libro de Ciencia y Tecnología N°2, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.
- XUÉ, & Barión. (2020). *Estado de la cobertura eléctrica y las zonas no interconectadas en la región central*. (G. d.-S. Barión, Ed.) Colombia: Región Administrativa y de Planeación Especial RAP-E - Universidad Distrital Francisco José de Caldas.