

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA PARA LA ZONA RURAL DE
VILLAVICENCIO



LAURA TATIANA CUCAITA PERDOMO



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
VILLAVICENCIO

2022

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA TURBINA EÓLICA PARA LA ZONA RURAL DE
VILLAVICENCIO

LAURA TATIANA CUCAITA PERDOMO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Industrial

Asesor

JHON ADEMIR PALOMINO PARRA

Magister

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
VILLAVICENCIO

2022

Autoridades Académicas

FRAY JOSÉ GABRIEL MESA ANGULO, O.P.

Rector General

FRAY EDUARDO GONZÁLEZ GIL, O. P.

Vicerrector Académico General

PADRE JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

FRAY RODRIGO GARCÍA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Mg. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

Mg. HÉCTOR MANUEL ÁVILA SIERRA

Decano de la Facultad de ingeniería industrial

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia y cada persona que me apoyo en el desarrollo de actividades pedagógicas relacionadas a mi carrera profesional.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres quienes me han motivado a realizar cada importante paso para finalizar con éxito mi carrera universitaria. Asimismo, agradezco de manera especial a todo el cuerpo docente que se involucró en mi proceso de aprendizaje y brindó un gran aporte a mi vida.

Contenido

	Pág.
Resumen	10
Abstract.....	11
Glosario.....	12
Introducción	13
1. Energías	14
1.1. Energías alternativas	14
1.2. Aprovechamiento de la energía eólica	15
2. Línea de investigación.....	17
3. Planteamiento del problema	18
3.1. <i>Pregunta de investigación</i>	19
4. Justificación.....	20
5. Objetivos	22
5.1. Objetivo general	22
5.2. Objetivos específicos.....	22
6. Alcance o delimitación	23
7. Marco teórico	24
7.1. Marco conceptual	24
7.1.1 Villavicencio	24
7.1.2 Historia de la energía eólica.....	27
7.1.3 Aspectos generales de las turbinas eólicas verticales	31
7.1.4 Componentes de una turbina eólica	32
7.1.5 El aire y su naturaleza	34
7.1.6 Cálculos aerodinámicos de las turbinas	35
7.2. Antecedentes	37
7.3. Marco legal o normativo	41
7.3.1 Norma técnica colombiana: NTC 5725	41
8. Metodología.....	44
8.1. Simulación y Medida	44

9. Resultados	45
10. Conclusiones	51
11. Referencias bibliográficas.....	53

Lista de Tablas

Pág.

Tabla 1 Medidas para turbina Savonius (Pamungkas et al., 2018).....	46
Tabla 2 Resultados de la simulación utilizando Savonius a una velocidad del viento 2,5 m/s	48
Tabla 3 Resultados de la simulación utilizando Savonius a una velocidad del viento de 3,5 m/s	48

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Comunicación entre la red eléctrica convencional y las renovables para beneficiar al consumidor y el medio ambiente(U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012b)	14
Figura 2 Escudo del Municipio de Villavicencio (Cajal, 2017)	26
Figura 3 Bandera del Municipio de Villavicencio (Robles, 2017)	26
Figura 4 Mapa político del Meta con localización de Villavicencio (Wikimedia, 2012)	27
Figura 5 Turbina eólica de eje. Adaptado de “Power Generation Technologies”	29
Figura 6 Turbina Eólica Darrieus y Tipo H.(Power Generation Technologies)	30
Figura 7 Geometría Savonius clásica.(Future Energy - Opportunities and Challenges)	30
Figura 8 Modelo comercial turbinas savonius	31
Figura 9 Primeras Turbinas Eólicas de Eje Vertical. (The wind energy (r)evolution: A short review of a long history)	32
Figura 10 Ruta de Decisión para Diseño de una Turbina Eólica. (NTC572. IEC 61400-2)	43
Figura 11 Detalles modelo Savonius	46
Figura 12 Simulación en SolidWorks de la turbina eólica tipo savonius	26
Figura 13 Vista de la simulación	48
Figura 14 Visualización simulación.....	48

Resumen

La zona rural de la ciudad de Villavicencio está dividida en sectores conocidos como corregimientos, a pesar de la cercanía con la capital del departamento del Meta algunos no reciben el servicio de energía eléctrica, servicio necesario para la realización de las labores cotidianas en la actualidad. Es por esto que el presente trabajo de grado presenta una posibilidad de implementación de una solución en estas zonas para poder subsanar la falta de este servicio, a partir del diseño de una turbina eólica de eje vertical llamada savonius en el programa de diseño SolidWorks, simulador que permite revisar los flujos de aire a los cuales se vería realmente sometida la turbina en la ciudad.

Palabras Clave: Savonius, Villavicencio, energía eólica, diseño, SolidWorks.

Abstract

The rural area of the city of Villavicencio is divided into sectors known as townships, despite the proximity to the capital of the department of Meta, some of them do not receive electricity service, a service necessary for the performance of daily tasks at present. For this reason, the present work presents the possibility of implementing a solution in these areas to remedy the lack of this service, based on the design of a vertical axis wind turbine called savonius in the design program SolidWorks, a simulator that allows reviewing the air flows to which the turbine would actually be subjected in the city.

Key Word: Savonius, Villavicencio, wind energy, design, SolidWorks.

Glosario

Lista alfabética de términos y sus definiciones necesarias para la comprensión del documento.

HAWT

Aerogenerador de eje horizontal

VAWT

Aerogenerador de eje vertical

kW

Kilovatio

kWh

Kilovatio hora

Whr

Vatios Hora

Introducción

La generación de energía mundialmente a lo largo de los años ha sufrido grandes cambios y ha transformado sus procesos con el propósito de adaptarse a las necesidades de la población, la cual ha evolucionado paulatinamente y ha adquirido hábitos de consumo excesivos. Sin embargo, para suplir este estilo de vida es indispensable el alto consumo de energía; a su vez hay varias zonas que no tienen acceso a al servicio de energía eléctrica, por ende existen dos panoramas opuestos en donde hay comunidades que emplean de manera desmesurada la energía y otras personas que no disponen de redes eléctricas en su territorio. Igualmente, en distintos países la energía convencional depende de recursos naturales no renovables que tienen la posibilidad de escasear, agotarse y generar contaminación; por otro lado, en las últimas décadas han surgido diferentes alternativas sostenibles no tan comunes que tienen en cuenta los impactos medio ambientales consecuencia de la generación de energía.

En Colombia aunque en distintas ciudades su red eléctrica funciona con hidroeléctricas, que no contaminan directamente los ecosistemas, si producen otros efectos negativos en la fauna y la flora. Por lo tanto, es imperativo desarrollar un conjunto de alternativas sostenibles que correspondan a las características de la región y tengan un rango de alcance amplio y estable.

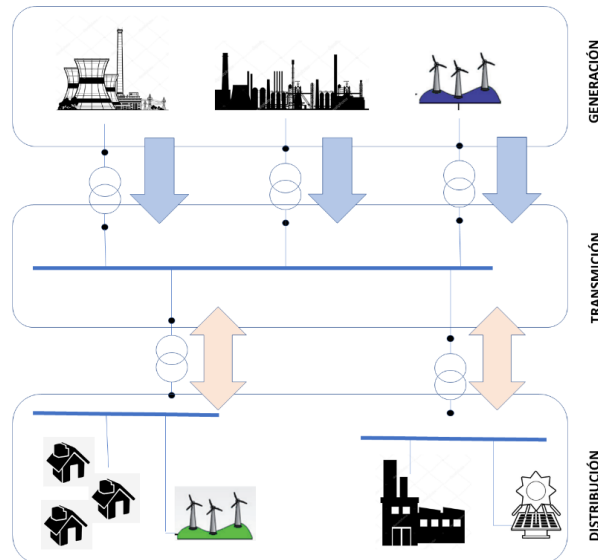
Así mismo, la ciudad de Villavicencio siendo una capital de departamento, que además está cerca de la capital del país, debe presentar un cubrimiento casi que completo en el área eléctrica dentro de toda la ciudad, no solamente dentro de la zona urbana, por ello se procede a diseñar una turbina eólica con eje vertical, las cuales son más fáciles de implementar en las zonas rurales que como en la mayoría de la zona rural montañosa de la capital del Meta, se encuentra rodeada de árboles y no puede ser tan alta.

1. Energías

1.1. Energías alternativas

Un elemento muy importante para evaluar a la hora de usar las Smart Grids, es la facilidad que presenta en el momento de adaptar a ellas las energías alternativas (Solar, eólica, hidroeléctrica, etc.), ya que su comunicación doble vía permite estar conectado a la red eléctrica de los hogares de los consumidores o de las industrias, manteniendo de esta manera un menor consumo por parte de la energía externa, reduciendo económicamente los gastos, además con la posibilidad de inyectar la energía eléctrica producida a la red eléctrica, lo cual tiene beneficios económicos para los consumidores, siendo esto importante para el momento donde el consumo de energía presente picos, dando energía extra para solventar toda la demanda. (Budka, K., Deshpande, J. and Thottan, 2014) (Andrés et al., 2011)

Figura 1 Comunicación entre la red eléctrica convencional y las renovables para beneficiar al consumidor y el medio ambiente (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012b)



Uno de los sucesos más importantes presentados por no tener redes que tengan la capacidad de reorganizar los caminos para el transporte de la energía eléctrica, fue el apagón masivo en Norte

América en el año 2003, el cual por la falla de una pequeña línea de transporte, provocó el mal funcionamiento de las estaciones de servicio de Estados Unidos y Canadá, dejando a más de 45 millones de personas sin el servicio, lugares donde es imprescindible, tuvieron problemas graves por el desabastecimiento de energía, si se hubiese tenido una Smart Grid, esta línea que presentó la falla habría sido aislada del sistema y sometida a reparaciones sin que se tuviese que apagar parte de la red.(Xiao, 2013)(U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012)

1.2. Aprovechamiento de la energía eólica

Se puede aprovechar la energía eólica, convirtiéndola en energía mecánica o eléctrica, gracias a máquinas particulares, parques eólicos. Existen diferentes tipos de máquinas eólicas, que difieren en la configuración de la planta (eje horizontal o vertical), en la producción de energía (turbinas grandes y aerogeneradores pequeños) y el lugar de instalación (en el mar, en tierra, en edificios). La energía eólica es una de las más importantes fuentes de energía renovable, capaz de aprovechar la energía solar que se transforma en viento en la Tierra. Los parques eólicos se basan en el aprovechamiento de la energía cinética del viento para generar energía mecánica, que a su vez se transforma en electricidad gracias al uso de unas máquinas llamadas aerogeneradores. Un conjunto de aerogeneradores individuales conectados entre sí constituye un parque eólico, las principales ventajas de esta fuente de energía alternativa se pueden resumir en las siguientes: ausencia de emisiones contaminantes durante la producción de energía; precio de venta muy competitivo de la energía producida en comparación con otras fuentes renovables. Los aspectos negativos son principalmente: producción de energía no constante (la velocidad del viento es, de hecho, variable en el tiempo y depende del lugar de instalación); la posibilidad de un fuerte impacto ambiental, principalmente visual; altos costos de construcción. El costo de instalar un sistema depende de muchos factores. Por ejemplo, para instalaciones on-shore (en tierra) el coste ronda el millón de euros por cada Mw instalado, pero si la planta se instala en un lugar suficientemente ventoso, los costes de construcción se pueden recuperar en muy pocos años. La elección del sitio donde construir el parque eólico es muy importante. En primer lugar, es necesario evaluar la productividad del sitio en sí, luego definir la continuidad e intensidad del viento en el área de interés.

Por lo tanto, una evaluación confiable de la productividad de un parque eólico debe basarse en una campaña anemométrica, realizada directamente en el sitio donde se construirá el parque. Generalmente, los mejores sitios donde se puede construir un parque eólico son en alta mar, por lo tanto, en mar abierto, pero también se construyen en las montañas y colinas. La razón principal por la que se prefieren estas zonas es la ausencia de obstáculos que puedan generar turbulencias y, por tanto, afectar negativamente a la velocidad y dirección del viento, en detrimento de la producción eléctrica. La turbulencia puede ser generada por una infinidad de factores:

Diversos factores están directamente relacionados con la orografía del terreno, mientras que otro aspecto muy importante a tener en cuenta durante la fase de diseño es la evaluación de la distancia entre los distintos aerogeneradores. Los componentes principales de un aerogenerador son: la cimentación, la torre, la góndola y el rotor.

Los cimientos son muy impresionantes, a menudo completamente subterráneos, y están contruidos con hormigón armado. Sostienen toda la máquina y ayudan a resistir las numerosas oscilaciones y vibraciones provocadas por la energía cinética del viento. Los zócalos y pilares de cimentación alcanzan profundidades considerables, de unos 20-25 metros de media en el suelo. La torre soporta la góndola y el rotor. Puede ser de acero reticular (como las torres de transmisión de electricidad de alta tensión), o de acero tubular por su mejor resistencia a los esfuerzos. Estos últimos se caracterizan por varios sillares que se ensamblan en el lugar. En el interior hay una escalera de acero que te permite llegar a la nave espacial, los cables eléctricos y la computadora que maneja toda la máquina. El rotor consta de un cubo en el que se fijan las palas. Existen diferentes configuraciones del rotor: de una, dos y tres palas. La eficiencia es casi la misma pero con las configuraciones de una y dos palas aumentan las vibraciones y el ruido. Las palas son de acero y fibra de vidrio, aunque las más modernas son de fibra de carbono. De hecho son mucho más ligeros, a costa de unos precios que aumentan mucho. Generalmente la altura de la torre es aproximadamente igual al diámetro de las palas. El barco se coloca en la torre. Su característica principal es la rotación sobre su eje según la dirección del viento. En el interior de la góndola hay una serie de componentes que permiten convertir la energía cinética del viento en energía eléctrica: el eje lento, el multiplicador de velocidad, el eje rápido, un sistema de frenado y el generador eléctrico. Muchas turbinas eólicas están equipadas con un dispositivo remoto de producción o control de fallas. El seguimiento, control y análisis estadístico se puede visualizar de forma local o remota.

2. Línea de investigación

La línea de investigación es medio ambiente y desarrollo sostenible ya que las temáticas corresponden a un eje ordenador que contempla diferentes actividades relacionadas a la resolución de un problema socio ambiental del departamento a partir de un prototipo ecológico.

3. Planteamiento del problema

La generación, transmisión y distribución del servicio de energía eléctrica ha evolucionado a través de los años en Colombia; pero el suministro actual a las zonas rurales de varios departamentos es inestable o en algunos casos inexistente ya que no se encuentran conectadas a la red eléctrica nacional. La mayoría de poblaciones rurales no tienen disponible una cobertura apropiada para realizar las actividades del hogar normalmente, sino que al estar alejadas del casco urbano optan por emplear otros métodos para hacer sus labores de manera remota. Una de las principales razones por las cuales el gobierno nacional no ha puesto en marcha la construcción de redes de energía rurales es “debido a los altos costos asociados a la instalación de torres de transmisión eléctrica, extender el cableado hasta los poblados rurales no sería un buen proyecto de inversión para las empresas de transmisión” (Montalvo, 2016).

Colombia es un país que posee una gran cantidad de zonas que no tienen acceso a la energía eléctrica, debido a que están ubicadas en lugares en donde las condiciones geográficas o largas distancias de las subestaciones, hacen muy difícil el acceso a este servicio. Según estudios de la Unidad de planeación minero-energética (UPME), departamentos como Vichada, Guainía, Amazonas, Vaupés, Putumayo, Caquetá, entre otros, no se encuentran comunicados a una subestación que les suministre el servicio de la energía eléctrica. Sin embargo, la misma UPME en otros estudios realizados, muestra que en estas zonas del llano y de la costa se puede obtener energía eólica en un rango de velocidades bajas (2 m/s - 5 m/s) que no están siendo aprovechadas, debido a que el diseño de turbinas eólicas actuales no satisface los requisitos de estas zonas.

Las zonas no interconectadas a la red eléctrica con alto potencial eólico están en un proceso de expansión poblacional, es decir, las zonas están necesitando una mayor cantidad de energía para desarrollarse, energía que lastimosamente, por su economía es incapaz de sostener ya que el costo para la obtención de energía en estas zonas es alto. Por esa razón, se busca una alternativa que sea económica y limpia con el medio ambiente, dándole una alta importancia a ser ecológica y no invasiva a la fauna y flora de la zona puesto que las otras alternativas que se han implementado son con combustible fósil, que contamina y emite gases que producen efecto invernadero.

Por otra parte, la energía eléctrica es de vital importancia en la sociedad, en consecuencia, no tener acceso a este servicio público produce una desconexión global de elementos como la educación, oportunidades de trabajo, mejora de procesos agropecuarios, entre otros. Es decir, es

elemental desarrollar técnicas y artefactos que no dependan del Estado ni recursos no renovables (gas y diésel) con el fin de tener la capacidad de obtener energía eléctrica con procesos sostenibles. Las energías no renovables tienen el riesgo de que sus materias primas puedan agotarse por su sobreexplotación, la extracción de los recursos sea contaminante, generación de desechos que impacten al medio ambiente negativamente y altos costos por su próxima escases.

3.1. *Pregunta de investigación*

¿Qué diseño de aerogenerador es el más adecuado según las características geográficas y climáticas para la implementación en el departamento del Meta?

4. Justificación

Entre 1990 y 2010, la cantidad de personas con acceso a energía eléctrica aumentó en 1700 millones, consecuencia por el crecimiento de la población mundial. Actualmente, la economía global depende en su mayoría de los combustibles fósiles para suplir la necesidad energética de la sociedad. Como es de conocimiento, los combustibles fósiles son los principales causantes de la emisión de gases del efecto invernadero, sino se buscan nuevas alternativas para generar energía, el aumento en las emisiones de gases será mucho más elevado que el que actualmente se registra, que es un 50% superior respecto al nivel en 1990. El momento de tomar iniciativas ecológicas es ahora, antes de causar mayores cambios drásticos en medio ambiente, cambios, cuyas consecuencias podrán ser irreversibles si no se toman medidas urgentes.

Para evitar la contaminación excesiva en las ciudades, debido a la mala gestión de los desechos generados por la sobrepoblación e industrialización, varios países desarrollados han iniciado el proceso de crear ciudades nuevas para potenciar la economía de regiones que no están siendo aprovechadas, zonas que en su mayoría son rurales. Colombia que es un país en vía de desarrollo presenta una cobertura eléctrica del 99.72% en áreas urbanas y 87.83% en áreas rurales, dejando así un promedio de 425.212 viviendas sin acceso a electricidad.

Entendiendo la información y proyectándose al continuo consumo, se deduce la necesidad de generar nuevas energías para la subsistencia del ser humano, energías ecológicas que reduzcan el presente desbalance ambiental mundial. El Programa de Asistencia en Gestión del Sector Energético del Banco Mundial (ESMAP), expone el gran potencial eólico del país, que del ser explotado podría cubrir más de la totalidad de las necesidades actuales de energía.

Actualmente el país cuenta con una capacidad de energía eólica promediada en 28.1 MW; en consecuencia, el gobierno colombiano cuenta con una ambiciosa agenda de reforma del sector energético, que pretende fomentar la inversión extranjera, simplificar modalidades para proyectos de energía en pequeña escala y renovar el interés en tecnologías de energía renovables no tradicionales con un marco regulatorio que facilite un cambio gradual en la matriz energética. Es así como la Ley 697 promotora del uso de energías alternas, eficientes y racionales es establecida; dicha ley contempla aspectos importantes tales como el estímulo a la educación e investigación en fuentes de energía renovable (FER).

El diseño del aerogenerador híbrido busca facilitar la obtención de la energía gracias a un bajo costo de fabricación, instalación y mantenimiento, además posee la ventaja de no estar limitado a sólo una velocidad lo que favorece la producción de energía con diferentes rangos de velocidad. Este diseño ayudará a las familias emprendedoras dándoles la oportunidad de utilizar la energía para ahorrar dinero desde sus casas, sin la preocupación de exceder los costos debido al sobreconsumo. Además, el diseño busca ser lo menos invasivo para no afectar el bienestar de la comunidad debido a que a pesar de ser ecológico el aerogenerador tiene dimensiones grandes que puede incomodar la visión de la población.

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Diseñar en SolidWorks un generador eólico de alta eficiencia teniendo en cuenta las necesidades de consumo energético y condiciones climáticas de la zona rural de la ciudad de Villavicencio.

5.2. Objetivos específicos

- Determinar las variables de comportamiento del viento y otros factores físicos presentes en la zona rural de Villavicencio con el fin de elaborar un perfil aerodinámico.
- Investigar el funcionamiento electromecánico de un aerogenerador de eje vertical.
- Elaborar la simulación en SolidWorks para verificar la correcta interacción de los factores naturales y las características de la turbina con los datos de la zona rural de la ciudad de Villavicencio.

6. Alcance o delimitación

El presente proyecto se realizara en municipios que “registran bajas coberturas de electrificación especialmente en los municipios afectados por el conflicto, siendo los de mayor deficiencia Vista Hermosa y Uribe, con solo 30 por ciento de cobertura, seguidos de Cabuyaro y Puerto Lleras, con 47 por ciento de cobertura.”(Pers, 2019); inicialmente para facilitar el análisis de datos e información relevante de las condiciones climáticas y contexto sociodemográfico de las familias de zonas rurales de Villavicencio.

7. Marco teórico

7.1. Marco conceptual

Diseñar: actividad destinada a realizar un proceso con el fin de crear algo nuevo o modificar algo existente, para resolver una problemática determinada.

Prototipo: representación o muestra demostrativa creada a raíz de una idea o concepto teórico.

Turbina: artefacto que a partir de la energía cinética de un fluido, transforma el movimiento mediante un rotor para generar generalmente energía eléctrica.

Energía eólica: se refiere a la energía cinética presente en el viento, es fuente renovable de energía que produce electricidad.

Aerogenerador híbrido: máquina que emplea aspectos característicos de aerogeneradores de distinto tipo, combinando diseños y estructuras para desarrollar un dispositivo capaz de convertir el viento en energía eléctrica.

Perfil aerodinámico: estructura plana transversal de un cuerpo que permite desplazarse por corrientes de aire.

Simulación: herramienta que evalúa el desempeño y funcionamiento de sistemas, procesos y reacción de objetos a ciertos escenarios estipulados.

Sostenible: gestión de recursos enfocada a la conservación de las condiciones presentes para no afectar a generaciones futuras.

Eficiencia: habilidad de obtener resultados óptimos que alcanzan unos objetivos establecidos.

7.1.1 Villavicencio

Villavicencio fue fundada el 6 de abril de 1840, donde se comenta que “gentes que iban a sacar ganados, y cazadores, entusiasmados por el párroco de San Martín presbítero Manuel Santos Martínez y por el relato que se hacía de la belleza y fertilidad de las tierras conocidas como Gramalote, iniciaron allí la construcción de una posada o “paradero” de ganados. Fue así como

vecinos de Quetame y Fosca, atraídos por la narración de sus amigos y paisanos, se trasladaron al lugar de promisión, siendo el primero en establecerse con su familia, Esteban Aguirre y como éste obtuviera éxito en el comienzo de su empresa de fundador, seguidamente llegaron Francisco Ruiz con su esposa Matea Fernández, su yerno Librado Hernández, Silvestre Velázquez y Francisco Ardila, quienes separadamente construyeron sus ranchos o viviendas en forma de poblado para habitar con sus familias; y el 6 de abril de 1840 quedó fundada una población, plantada sobre la margen derecha del caño Gramalote a la que se puso el mismo nombre del arroyo, llamado así porque sus riberas estaban cubiertas con una especie de pasto o gramínea conocida con tal nombre”(Dieres Monplaisir, 1998). Este lugar corresponde hoy a la parte baja o antigua del barrio El Barzal.

En 1890 se produce un incendio que arrasa con la población y destruye archivos con información valiosa para la entonces aldea y es trasladada a su actual ubicación. Antes del incendio el casco urbano quedaba en el actual barrio Barzal. En 1904 y al mando del padre Maurice Dières Monplaisir se establece la comunidad Monfortiana que (fundada por San Luis María Grignon de Monfort) se encargará de guiar el desarrollo social de la población al fundar el banco San José, el colegio femenino Nuestra Señora de la Sabiduría, el teatro Verdún, la imprenta de San José, diversos talleres de encuadernación, carpintería y herrería, la banda musical de Santa Cecilia, el hospital Monfort y diversas bibliotecas. En 1909 Villavicencio es erigida como capital de la Intendencia del Meta.

En 1936 se construyó la primera carretera para cruce vehicular que conectaba la ciudad con Bogotá, la capital del país. En 1949 el capitán Alfredo Silva, afiliado políticamente al Partido Liberal Colombiano y perteneciente al ejército, se rebela contra el entonces presidente Mariano Ospina Pérez apoyado por el directorio nacional Liberal más esta orden se revoca. Ésta no llega a tiempo y el capitán se toma la ciudad iniciando el primer episodio del periodo conocido como La Violencia en los Llanos Orientales de Colombia y el origen de las Guerrillas del Llano. En 1953 el general Gustavo Rojas Pinilla decreta la amnistía de los guerrilleros pacificándose así los Llanos Orientales y produciendo la llegada masiva de colonos provenientes de otras regiones de Colombia.(Instituto de Turismo de Villavicencio, 2016)

En 1959 se crea el Departamento del Meta y se ratifica a Villavicencio como capital. 1962: se crea la Cámara de Comercio de Villavicencio y en 1963 se crean las Empresas Públicas de

Villavicencio. Luego en 1967 se crea la Caja de Compensación Familiar Regional del Meta COFREM y en 1969 se crea la clínica Meta entidad hospitalaria de carácter privado.(Instituto de Turismo de Villavicencio, 2016). Sus símbolos municipales son los siguientes:

Figura 2 Escudo del Municipio de Villavicencio (Cajal, 2017)



Figura 3 Bandera del Municipio de Villavicencio (Robles, 2017)



Localización del municipio de Villavicencio

Villavicencio cuenta con sus vías en buen estado, se puede llegar en moto, carro, campero, bicicleta y se ubica en el piedemonte de la Cordillera Oriental, al noroccidente del departamento

del Meta, en la margen derecha del río Guatiquía (Figura 3), sus coordenadas son 4°08'33"N 73°37'46"O.

Figura 4 Mapa político del Meta con localización de Villavicencio (Wikimedia, 2012)

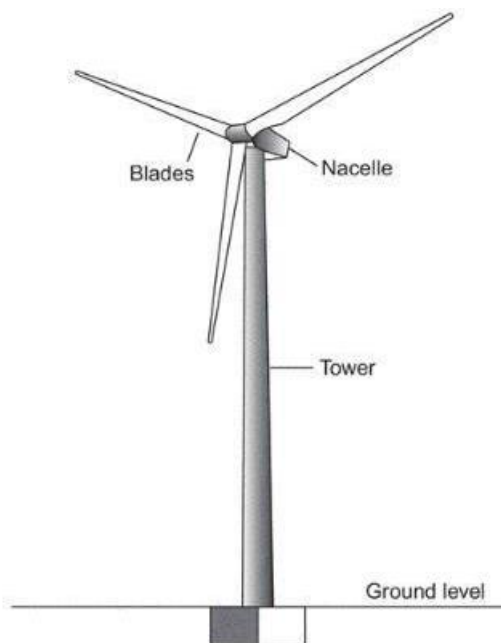


De acuerdo con el trabajo realizado en Villavicencio se evidencia que este cuenta con 446 barrios, 8 comunas y 7 corregimientos, de esta manera el estudio constante de la velocidad del viento en la ciudad muestra que en el año normalmente se encuentra entre 2.5 y 3.5 m/s (meteoblue, 2022)

7.1.2 Historia de la energía eólica

La historia de la generación de la energía eólica a nivel industrial a partir de turbinas eólicas surgió en la década de los 70 durante la crisis de las petroleras. Durante los inicios del desarrollo de la industria eólica, muchos tipos de turbinas fueron probados. La mayoría de estos eran turbinas eólicas de eje horizontal con un rotor en un extremo de un eje y un generador en el otro, todo montado en la parte más alta de una torre.

Figura 5. Turbina eólica de eje. Adaptado de “Power Generation Technologies”



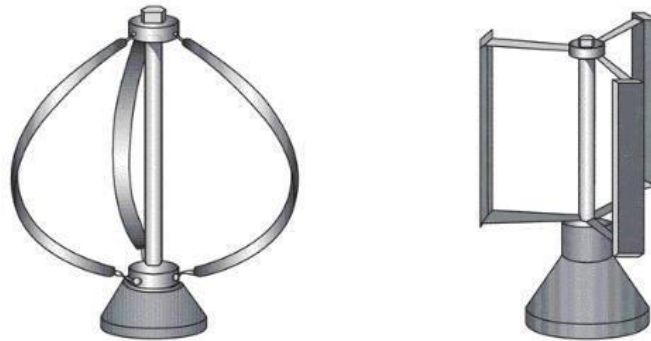
Este tipo de turbinas eran equipadas con una, dos, tres o más alabes. Disponían de diseños de viento ascendente, los cuales tenían el rotor de cara al viento y el generador detrás, o de viento descendente que tenían la disposición inversa. Todos estos diseños usaban cajas de cambios para sincronizar la velocidad del rotor con la del generador y así acoplarse con la red eléctrica para su control.

Por otro lado, el diseño de turbinas eólicas de tipo vertical también se desarrolló. El más común de ellos era la turbina Darrieus o batidor de huevos, llamado así porque sus cuchillas tenían la forma de un batidor de huevos. Este tipo de turbina eólica fue patentado por G. Darrieus en 1931 y se desarrollaron por el Laboratorio Sandia en los años 70. Su estructura básica consta de dos o tres palas de forma ovalada de perfil aerodinámico y tienen características parecidas a las de eje horizontal, cuya ventaja es un torque de arranque muy pequeño. El laboratorio Sandia construyó en 1974 un primer prototipo de 5 m de diámetro cuya potencia era pequeña. Aunque su aplicación es similar a las turbinas rápidas de eje horizontal, están poco implantados debido a que produce baja potencia.

Otros diseños de cuchillas probados incluyeron una configuración de eje vertical en forma de H. Las principales ventajas que poseían este tipo de turbinas de eje vertical están en no tener

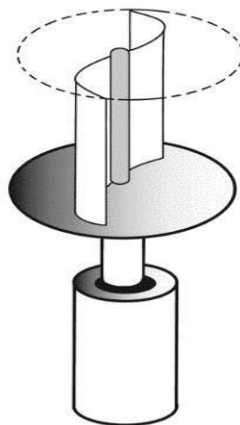
que direccionar el rotor hacia el viento y que sus componentes mecánicos como la caja de cambios y el generador se podían colocar en el suelo.

Figura 6. Turbina Eólica Darrieus y Tipo H. Fuente: Adaptado de “Power Generation Technologies”



Aunque el diseño más común fue el Darrieus, previamente un ingeniero finlandés en 1920 inventó la turbina eólica Savonius (llamado así por su apellido), basado principalmente en la fuerza de arrastre del viento. Su diseño es el más simple y económico de todas las turbinas eólicas pero su velocidad es de las más bajas, por lo general consiste en dos medios cilindros que se ubican en contra, formando casi una forma de “S”.

Figura 7. Geometría Savonius clásica. Fuente: Adaptado de “Future Energy - Opportunities and Challenges”

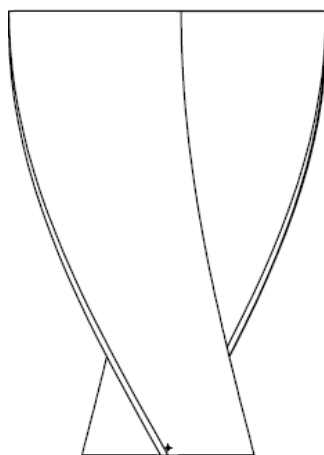


Sin embargo, la mayor desventaja de este diseño es el bajo rendimiento aerodinámico en comparación con otras turbinas debido a su baja velocidad. Este sistema presenta buenas características aerodinámicas para el autoarranque y la autorregulación. El mayor campo de aplicación de estas turbinas eólicas es la producción de electricidad o para el bombeo de agua.

A pesar de estas ventajas, las turbinas eólicas nunca prosperaron debido a su bajo nivel de producción de energía. Mientras que las turbinas eólicas horizontales producen energía en magnitudes de kilovatios hasta megavatios; en la década de los 80 una turbina promedio generaba 30kW, con el tiempo estas máquinas llegaron al rango de 2-3 MW; los verticales, producen energía en un orden menor a los 100kW.

En la actualidad existe un mercado para turbinas eólicas pequeñas que frecuentemente se usan para suministrar energía en lugares remotos, para el suministro de energía domestica no conectada a la red o para una gama de pequeñas aplicaciones de generación distribuida. Estados unidos es uno de los países con mayor mercado de turbinas pequeñas.

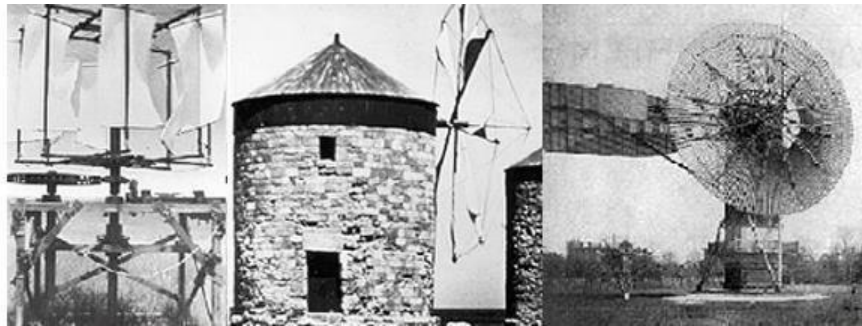
Figura 8. Modelo comercial turbinas savonius. Fuente: Autor



A pesar de su situación actual en el mercado comercial, las turbinas eólicas verticales tienen un lugar bastante importante en la historia de las turbinas eólicas. De hecho, las turbinas eólicas verticales fueron las primeras en ser construidos, anteriormente eran conocidos como los molinos de viento y su uso principal era el de moler el grano o bombear agua, como ejemplo se encuentran ruinas que datan del 200 a.C en Persia (actualmente Irán).

Además, se deduce que los primeros diseños para sus alabes estaban basados en la tela de velas en lugar de materiales rígidos. Por lo tanto, a pesar de su situación actual, las persistencias de las turbinas eólicas verticales a lo largo de la historia suponen un gran desafío para los diseñadores con respecto a su potencial.

Figura 9. Primeras Turbinas Eólicas de Eje Vertical. Fuente: Adaptado de “The wind energy (r)evolution: A short review of a long history”



7.1.3 Aspectos generales de las turbinas eólicas verticales

Diseño Savonius

Las turbinas eólicas Savonius tienen una baja velocidad de corte y pueden operar con vientos de tan solo 2 m/s. Esto hace que el sistema sea adecuado para la generación de electricidad en aplicaciones de baja potencia, como instalaciones domésticas individuales. La máquina es especialmente adecuada para ubicaciones de dirección variable del viento. Una empresa suiza comercializa una versión de 6 kW de la Savonius. La eficiencia máxima de esta se aproxima al 30% (ver) y la relación punta velocidad es baja (TSR). Una desventaja de este diseño es su factor de alta solidez debido a que el material de construcción preferido es de metal, lo que implica peso y ruido.

Diseño Darrieus

A diferencia del rotor Savonius, la Darrieus no arranca por sí misma. El rotor de paso fijo debe estar en rotación antes de que el viento ejerza una fuerza motriz sobre él. En diseños prácticos, un rotor Savonius se incorpora a menudo en el eje Darrieus para proporcionar un par de arranque. A altas velocidades, la Darrieus produce más potencia que la Savonius y tiene una razón de punta mucho más alta.

Las máquinas Darrieus tienen un factor de baja solidez, comparable con el de un sistema de hélice de eje horizontal, lo que representa economía en los materiales del álabe. Las fuerzas en las cuchillas son similares en algunos aspectos a las fuerzas aerodinámicas en una sección del ala de un avión o aeroplano. Las fuerzas centrífugas de rotación ejercen tensiones de tracción en las cuchillas, que pueden ser metálicas o hechas de fibra de vidrio.

7.1.4 Componentes de una turbina eólica

Como se ha mencionado anteriormente, las turbinas eólicas o aerogeneradores son capaces de transformar la energía cinética del viento en energía mecánica de flecha para hacer girar un rotor gracias a un sistema de transmisión que puede aumentar las revoluciones recibidas por el generador transformando el movimiento rotatorio en energía eléctrica. Mencionado lo anterior, se describirán a continuación los principales elementos que componen una turbina eólica de tipo vertical.

Subsistema de captación

Es el encargado de recibir el flujo del viento y transformarlo en energía mecánica, básicamente se compone del eje, los álabes y las tapas. En este sistema el elemento más importante son los álabes pues a ser los encargados de convertir la fuerza del aire en un momento torsor que permite mover el eje. La geometría y el diseño son un campo de estudio bastante amplio como son los que reciben toda la fuerza, un excelente diseño y geometría implican un aumento en la eficiencia y captación de potencia útil.

Subsistema de transmisión

Está conformado por el sistema de poleas, correas, engranes, cajas multiplicadoras o cadenas que se encarguen de transferir la rotación que genera el rotor hacia el generador. Su función principal es aumentar las revoluciones del sistema para que el generador produzca la energía necesaria.

Subsistema de generación eléctrica

Su componente principal es el generador eléctrico, aspectos para tener en cuenta para la selección del dispositivo es saber cuántas revoluciones necesita para generar la potencia deseada, además de qué tipo de corriente se desea manejar (AC o DC).

La mayoría de los sistemas de generación eléctrica se basan en dos tipos de generadores, los de inducción y los síncronos. Los inductivos que son máquinas comparativamente simples y de bajo costo, que tienen la ventaja de poder ser motores o generadores, y los síncronos o alternadores, que son los más comunes para generar la parte de la energía AC en la actualidad.

Batería

Es un artefacto en el cual se almacena energía química que posteriormente se convierte en corriente eléctrica como resultado de varios procedimientos electroquímicos, en su interior se encuentran varias celdas con polo positivo y otro negativo las cuales proporcionan un movimiento continuo hacia los electrolitos encargados de expulsar la corriente continua de manera controlado, su capacidad varía de acuerdo a la naturaleza de su composición la cual se puede medir tanto en voltios, vatios, amperios o mAh.

Inversor

Es un dispositivo que transforma una tensión de entrada de corriente continua a corriente alterna, por medio de circuitos electrónicos los cuales hacen que el flujo de la corriente continua cambie de dirección de forma periódica. También puede modificar el voltaje de entrada por un voltaje de salida deseado para el uso cotidiano.

Controlador

La función del controlador de carga es suministrar la energía del generador al banco de baterías de una manera controlada. En los generadores de imanes permanentes comúnmente utilizados, el proceso se hace generalmente mediante el uso de rectificadores controlados. El controlador debe estar diseñado para limitar la corriente máxima en la batería, reducir la corriente de carga para el SOC (Estado de carga) de batería alta y mantener una carga de goteo durante los períodos completos de SOC.

7.1.5 El aire y su naturaleza

La energía que se puede obtener del aire varía en función del cubo de su velocidad, por lo que la comprensión de las características del viento es fundamental para todos los aspectos de explotación de energía eólica, desde la identificación de los lugares más adecuados y viabilidad económica hasta el diseño de las turbinas eólicas y la comprensión de su efecto no solo positivo a las redes de distribución sino ambientales también.

Desde el punto de vista de la energía eólica, la característica más llamativa del recurso eólico es su variabilidad. El viento es muy variable, tanto geográfica como temporalmente. Además, esta persiste en una amplia gama de escalas, tanto en el espacio como en el tiempo. La importancia de esto se amplifica por la relación cúbica con la energía disponible.

Este factor puede describirse a gran escala, donde aspectos como la latitud y geografía influye en el comportamiento del aire, o a pequeña escala donde los aspectos como el tipo de vegetación, altura, cantidad de montañas y obstáculos como árboles o edificios reducen las velocidades del viento.

Qué es el viento

El viento es aire en movimiento y aunque en general su movimiento es tridimensional, normalmente sólo se considera la velocidad y dirección horizontal puesto que a ser la que entra en contacto con la superficie de la turbina y es el causante del giro. En general para tratar aspectos de energía eólica se emplean criterios a nivel de meso escala y de escala pequeña, que en pocas palabras se refiere a los fenómenos conocidos como turbulencias, tormentas y brisas.

Dirección y velocidad del viento

La dirección del viento está determinada por el punto del horizonte del espectador desde el cual sopla. Actualmente, internacionalmente se usa la rosa dividida en 360° . El cálculo se realiza tomando como origen el norte y contando los grados en el sentido de giro del reloj. Para medir la velocidad del viento, en náutica lo mejor es utilizar la escala en nudos y con la escala Beaufort. La escala comprende 12 grados de intensidad creciente que describen el viento a partir del estado de la mar. Sin embargo, esta descripción es inexacta pues varía en función del tipo de aguas donde se manifiesta el viento. Pero con la llegada de anemómetros modernizados, a cada grado de la escala se le ha asignado una banda de velocidades medidas por lo menos durante 10 minutos a 10 metros de altura sobre el nivel del mar. En la meteorología sinóptica moderna, la escala Beaufort tiende a sustituirse por las mediciones precisas en nudos. Para análisis de viento dirigidos a su utilización energética se emplea como unidad de velocidad m/s.

Medición de la dirección y velocidad del viento

El dispositivo que tradicionalmente se utiliza para medir la dirección del viento es la veleta, que marca la dirección en grados en la propia rosa. Debe instalarse de acuerdo con los procedimientos internacionales vigentes (a partir de 10 m de altura las perturbaciones son insignificantes) para evitar las perturbaciones. La velocidad del viento se mide con el anemómetro, que es un molinillo de tres brazos, separados por ángulos de 120° , que se mueven alrededor de un eje vertical. Los brazos giran con el viento y permiten medir su velocidad.

7.1.6 Cálculos aerodinámicos de las turbinas

Potencia disponible

La potencia disponible en el viento varía con el cubo de la velocidad del viento, y depende también de la densidad del aire. Para calcular el potencial eólico se utilizan las ecuaciones de mecánica de fluidos, concretamente, la de conservación de la masa (ecuación de continuidad) y la de conservación de energía (ecuación de Bernoulli). Debido a la ley de Betz, es imposible extraer

toda la energía cinética existente en una corriente de aire. La potencia eólica disponible a través de una superficie de sección A, perpendicular al flujo de viento, v , viene dada por el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo como lo muestra la ecuación 6-1.

$$P_d = \frac{1}{2} * A * v^3 \quad 6-1$$

Límite de Betz

De todo el potencial eólico disponible, solo se extraerá y convertirá una parte. El límite de extracción teórico máximo fue calculado por Albert Betz (1885-1968), un físico alemán que participó en la elaboración de las bases teóricas de los modernos aerogeneradores, quién publicó en 1919 una teoría, conocida como ley de Betz. Según esta ley no puede convertirse más del 59,26% de la energía cinética del viento en energía mecánica mediante una turbina eólica. El físico alemán creó un modelo que permite calcular la potencia y la fuerza de empuje que produce el viento sobre el rotor, utilizando un modelo unidimensional muy simplificado.

$$P_{max} = 0.5926 * P_d \quad 6-2$$

Rendimiento de las turbinas eólicas

Para determinar el rendimiento es necesario conocer la relación de velocidad tangencial o TSR, la cual sirve para comparar el funcionamiento de máquinas eólicas diferentes, por lo que también se le suele denominar velocidad específica. Para la turbina eólica Savonius, se tiene un rendimiento, o coeficiente de potencia cercano al 20% y para el Darrieus 35% aproximadamente. Es un valor para tener en cuenta ya que, si este valor es mayor a 1, significa que la turbina empezará a sentir fuerzas de levantamiento.

$$TSR = \frac{2\pi * n * r}{60 * v} \quad 6-3$$

$$C_p = \frac{P_{extraida}}{P_d} \quad 6-4$$

Los aerogeneradores verticales son omnidireccionales y pueden recibir viento de cualquier dirección y, por lo tanto, no es necesario que sigan la dirección del viento. Debido a que es difícil de instalar en la torre, la columna se coloca cerca del nivel del suelo, lo cual es fácil de mantener e instalar en varios lugares, como techos. Las turbinas de eje vertical se pueden emplear en regiones donde la velocidad del viento es moderada, ya que funcionan a velocidades bajas. Una desventaja de este tipo de turbina es que no arranca sola y produce una cantidad limitada de energía debido a su proximidad a la superficie de la Tierra (Aymane et al., 2017) (Tahboub et al., 2011) (Albisher & Alsamamra, 2019).

7.2. Antecedentes

Durante los últimos años se han realizado varias investigaciones sobre las turbinas eólicas donde se tiene en cuenta los conceptos anteriormente mencionados, según Barbero. A, en su estudio y diseño de una turbina eólica, podemos observar que hay que tener en cuenta el efecto Magnus para entender la rotación de la turbina que se ve afectada por el aire. En este estudio se tienen en cuenta modelos matemáticos hechos en Matlab donde se analizan el número de hélices y su fricción.

Andrés Escobar y Luis Efrén (2009), realizan una investigación basada en un modelo físico para representar una turbina eólica. Se muestran las partes de la turbina, las variables a utilizar, la linealización de relación entre el torque y la velocidad del rotor y del viento.

Los investigadores N.H. Mahmood, A.A. El-Haroun, E. Wahba y M.H. Nasef (2012), este documento revisa varias configuraciones de VAWT junto con sus méritos y deméritos. Además, las técnicas de diseño empleadas para el diseño de VAWT también han sido revisadas junto con sus resultados. Se aprendió que el coeficiente de potencia (CP) para varias configuraciones es diferente y se puede optimizar con referencia a la relación de velocidad de la punta.

En el 2014, R. D. Maldonado, E. Huerta, J. E. Corona, O. Ceh, A. I. León- Castillo, M. P. Gómez-Acosta y E. Mendoza-Andrade, realizaron un diseño a partir de un software CAD de

una turbina eólica Savonius para casas subsidiadas de México con características óptimas. en este trabajo se investigó un estudio detallado del rotor Savonius con el fin de obtener las características óptimas. El ensamblaje del rotor Savonius fue desarrollado en software CAD. Las simulaciones de la interacción entre el flujo de aire y las cuchillas se desarrollaron a través del análisis de elementos finitos. Como resultado de estas simulaciones se muestra la distribución del perfil de velocidad para los álabes.

W.A. El-Askary, M.H. Nasef, A.A. AbdEL-hamid, H.E. Gad en el 2015, investigan métodos para controlar la dirección del viento y así mejorar el rendimiento del rotor. En este trabajo tres métodos para controlar el viento son utilizados para mejorar el rendimiento del rotor Savonius. La idea de crear nuevos diseños para mejorar la captación del viento a la entrada para así generar una corriente de viento en la parte cóncava del alabe para evitar direcciones en contraflujo.

En ese mismo año los investigadores Frederikus Wenehenubun, Andy Saputra, Hadi Sutanto, realizan un estudio que tiene como objetivo investigar el efecto del número de álabes en el rendimiento del modelo de la turbina eólica Savonius. Los experimentos suelen comparar turbinas de 2,3 y cuatro álabes para mostrar la relación de velocidad de punta (TSR), torque y coeficiente de potencia relacionados con la velocidad del viento. Al finalizar, llegan a la conclusión de que una turbina eólica de tres aspas tiene mejor rendimiento.

Daniela Torres (2015), estudiante de ingeniería mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, realiza un diseño de una turbina eólica Savonius de baja potencia para aprovechar el potencial eólico de la Universidad Tecnológica de Pereira, donde ubica el dispositivo. La turbina, entrega la energía suficiente para cargar una batería de 12V, la cual utilizada en dispositivos tales como UPS, equipos médicos y de comunicación, entre otros.

Sergio Montelpare, Valerio D' Alessandro, Andrea Zoppi, Renato Ricci en el 2016, investigan el rendimiento aerodinámico de una turbina eólica Savonius para ser utilizada en una farola innovadora. El generador eólico estudiado es la parte principal de un sistema de alumbrado público (una farola) alimentado por fuentes de energía eólica y solar renovable. Este estudio tiene como objetivo analizar los efectos de las diferentes soluciones de construcción en el rendimiento del rotor.

En el 2017 se realizó el cuarto congreso internacional de ingeniería de energía y sistemas energéticos en donde los ingenieros marroquíes M. Zemamou, M. Aggour, a. Toumi, describen los conceptos básicos y parámetros que afectan la eficiencia de un rotor para su óptimo diseño y

comparan su diseño que tiene un coeficiente de potencia de 27.3% superior al coeficiente de potencia de un rotor promedio. En este mismo congreso los ingenieros de Argelia, H. Belmili y sus colegas realizaron el estudio, diseño y fabricación de un sistema pequeño de energía renovable residencial basado principalmente en una turbina Savonius, equipado con panel fotovoltaico y un sistema de almacenamiento (Batería).

En el 2018 los ingenieros del departamento de ingeniería civil y ambiental de la universidad de Hong Kong realizan una optimización de la forma geométrica de los álabes de un rotor Savonius basados en un algoritmo genético para mejorar aún más su coeficiente de potencia. Un algoritmo genético basado en la evolución (GA) se incorpora en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), lo que acopla la definición de geometría de la hoja con la generación de malla y la evaluación de la función de aptitud en un proceso iterativo.

Ingenieros de la universidad de ingeniería mecánica e industrial de Toronto por su parte, realizan una reseña del uso de las turbinas eólicas para uso residencial, Rakesh Kumar, Kaamran Raahemifar y Alan S. Fung, se encargan de hacer una revisión de algunos de los principales acontecimientos de las turbinas eólicas dentro de la zona urbana. Como su información es nueva es bastante relevante a la hora de enfocarse en futuros estudios sobre este tema.

Ingenieros de la Universidad Menoufia en Egipto, realizaron una investigación que tiene como objetivo estudiar experimental y numéricamente el rendimiento de un rotor Savonius modificado retorcido en varios ángulos de torsión. Los experimentos se llevan a cabo frente a un chorro de aire libre. Los cálculos realizados por El-Askary y otros colegas ingenieros mecánicos se realizan utilizando las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Reynolds Average Navier Stokes (RANS) junto con el modelo de turbulencia RNG k- ϵ .

En este último año, las investigaciones no han disminuido, investigadores de India y Singapur se han centrado en la recolección de energía eólica a partir de ráfagas producidas por los trenes, que se mueven dentro de túneles mediante la colocación de rotores Savonius junto a los trenes. La simulación numérica muestra que el rotor Savonius en forma de S no cosecha energía en tales condiciones y, por lo tanto, se propone un nuevo diseño para generar energía útil sin comprometer la eficiencia de los trenes en movimiento.

Joe Jacob, Dhiman Chatterjee, ingenieros del Instituto Tecnológico Madras, India, han propuesto una metodología de diseño para un sistema híbrido que busca la mejora en la captación de energía, en este trabajo se llevan a cabo estudios sistemáticos de turbinas independientes

Savonius y Darrieus utilizando técnicas experimentales y numéricas para estudiar sus funciones en la configuración híbrida. Se deriva una expresión para una relación de radio óptima y se propone una metodología para diseñar turbinas híbridas.

Alqurashi Faris y Mohamed M. H, realizan un análisis sobre las fuerzas que actúan en las partes principales del rotor Darrieus durante la rotación y en condición estático a partir de simulaciones CFD. Se evaluaron 3 formas de pala diferentes (perfiles no simétricos y simétricos) utilizando los perfiles NACA 0021, LS413 y S1046. Los resultados indicaron que la cuchilla simétrica S1046 tiene mayores fuerzas durante la rotación y condiciones estáticas. Además, se concluyó que la capacidad de auto arranque del perfil NACA 0021 es mejor que la S1046 debido a la baja torsión aerodinámica en las cuchillas S1046.

A. Pallotta, D. Pietrogiacomini y G.P. Romano, ingenieros de la Universidad La Sapienza, Italia, patentan un diseño de un rotor híbrido que combina las geometrías Savonius y Darrieus, cuyo nombre es Hybri. El rotor tiene como objetivo optimizar el rendimiento en regímenes de viento medio-bajo, mediante el uso de un diseño cuidadoso de la forma, el tamaño y las posiciones relativas de las palas Savonius y Darrieus. Con este fin, el rotor es puesto a prueba en un túnel utilizando un modelo escalado, donde se obtienen buenos rendimientos (coeficiente de potencia igual o muy cercano a 0.2), en un rango extendido de condiciones operacionales, presentando auto arranque a una velocidad de 3m/s.

Para finalizar, investigadores de la Universidad de Maryland, Estados Unidos, diseñan una turbina eólica híbrida Darrieus-Savonius modificada que es probada numéricamente utilizando el modelo de interacción fluido-estructura basado en un software CFD de alta fidelidad. Se lleva a cabo un estudio sistemático para analizar los efectos del momento de inercia, la estructura de la turbina y la carga externa en la capacidad de arranque automático y la eficiencia energética. Se encuentra que en comparación con el rotor Darrieus normal, el diseño híbrido tiene una mejor capacidad de autoarranque debido al par proporcionado por el rotor MS en pequeñas relaciones de velocidad de punta (TSR).

7.3. Marco legal o normativo

7.3.1 Norma técnica colombiana: NTC 5725

Icontec fue creada en 1963 con la necesidad de responder a cada uno de los sectores económicos eficientemente por medio de los servicios de calidad, los cuales contribuyen al desarrollo de cada organización en el país; se fundamentó como una organización privada sin ánimo de lucro, la cual hoy en día tiene cobertura nacional e internacional, prestando servicios de normalización, educación, servicios de evaluación de la conformidad como certificación sistemas de gestión y producto e inspección, servicios de evaluación para el cambio climático, acreditación en salud, metrología y finalmente consulta y venta de normas y publicaciones. Siempre basados bajo los principios de la ética y la integridad, junto a los valores del servicio, eficiencia, confiabilidad, respeto, flexibilidad, compromiso y comunicación.

Su conformación se realiza bajo la vinculación voluntaria de representantes del Gobierno Nacional, representantes de los sectores privados de la producción, distribución y consumo, representantes del sector tecnológico en sus diferentes ramas y por todas aquellas personas jurídicas y naturales que tengan interés en pertenecer a él.

Al ser el Organismo Nacional de Normalización (ONN) representa a Colombia ante organismos de normalización tanto regionales como internacionales, entre los cuales se encuentran la Organización Internacional de Normalización (ISO), la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).

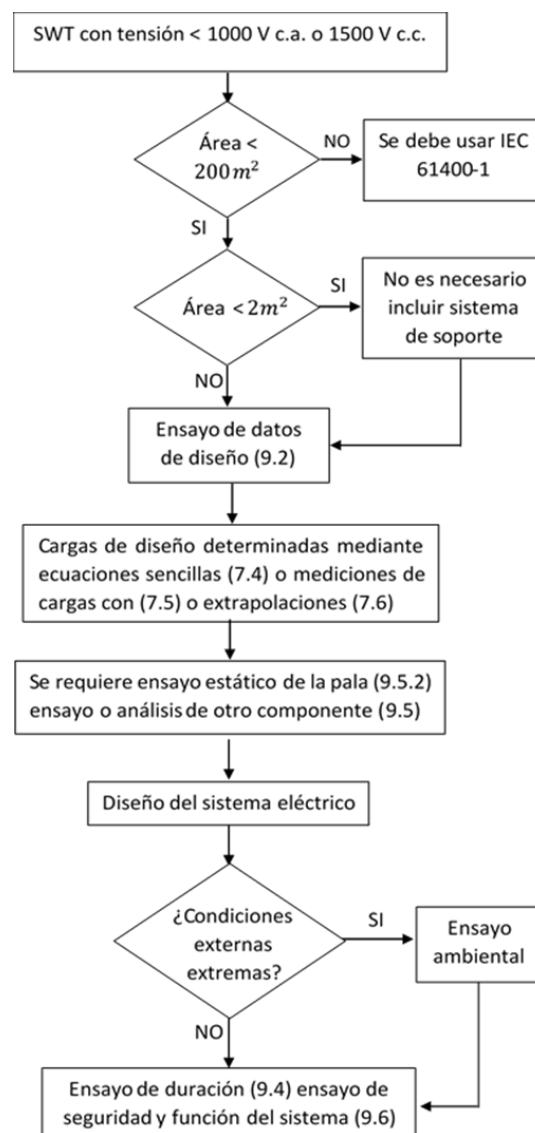
Además, es soporte del Gobierno Nacional en los grupos de negociación para la Comunidad Andina como lo son, el Área de Libre Comercio de las Américas (ALCA) y el Tratado de Libre Comercio (TLC) con Estados Unidos, por lo que, al contar con una participación, están siempre en la renovación constante de las definiciones y el desarrollo de normas internacionales y regionales, por lo que siempre están a la vanguardia en información y tecnología.

La norma NTC 5725 define los requisitos para el diseño de turbinas eólicas o aerogeneradores pequeños con un área de barrido del rotor inferior a 200 m² (8 metros de radio) y que generan una tensión inferior a 1 000 V C.A o a 1 500 V C.C.; dicha norma se basa a mantener la filosofía de la seguridad, desde su fase inicial hasta la final, empezando por el diseño, la instalación, el mantenimiento y su operación en condiciones extremas; cada una sin dejar de un

lado la calidad y la integridad de la ingeniería. Siempre con el propósito principal de brindar un grado óptimo de protección contra los daños por los posibles peligros que produzca durante su vida útil planifica, dándonos finalmente la seguridad de calidad en dicho sistema.

En el método de diseño de la norma NTC 5725 se encuentra la ruta de decisión según IEC 61400-2, la cual se muestra en la Figura 6.

Figura 10. Ruta de Decisión para Diseño de una Turbina Eólica. Fuente: Adaptación de NTC572. IEC 61400-2



Además, se deben verificar las condiciones ambientales del sistema, ya que dichos aspectos pueden afectar la integridad y seguridad de la turbina. El viento, temperatura; humedad; densidad de aire; radiación solar; sustancias químicamente activas; partículas mecánicamente activas; descargas atmosféricas; ambiente marino (corrosión) y lluvia, granizo, nieve o hielo pueden producir daños mediante una acción térmica, fotoquímica, corrosiva, mecánica, eléctrica u otras acciones físicas. Todo esto entendiendo que las condiciones ambientales normales que debemos tener en cuenta están en un rango de temperatura ambiente de funcionamiento normal del sistema de -10°C a $+40^{\circ}\text{C}$; humedad relativa hasta un 95 %; intensidad de la radiación solar de $1\,000\text{ W/m}^2$ y densidad de aire de $1,225\text{ kg/m}^3$.

Las cargas sobre el aerogenerador son otro aspecto a considerar, causadas por el transporte, el montaje, la instalación, el mantenimiento y la reparación del mismo, entre los cuales, cargas de la gravedad sobre la turbina durante el transporte en posición diferente a la vertical; cargas producidas por herramientas especiales de instalación; cargas del viento durante la instalación; cargas introducidas por el izamiento de la turbina en la cimentación; cargas en la inclinación de la torre durante el izamiento y carga en una estructura de soporte debido a su escalada. También están las cargas aerodinámicas que se subdividen en cargas estáticas y dinámicas que son causadas por el flujo de aire y su interacción con las partes estáticas y móviles de la turbina.

En consecuencia, se encuentra el punto a tratar tomando como base los esfuerzos del sistema, los cuales se deben calcular en cada uno de los componentes que soportan las cargas importantes y en el caso de carga de diseño se deben combinar para obtener esfuerzos equivalentes, calculándolas a partir de fuerzas y momentos individuales, por lo que los esfuerzos equivalentes resultantes se deben comparar con los valores de diseño para los esfuerzos del material; teniendo en cuenta aspectos como variaciones de esfuerzo; concentraciones de esfuerzo; magnitud y dirección de las cargas resultantes; dimensiones del componente y variaciones en el espesor del material; rugosidad de la superficie del componente, tratamiento de la superficie; tipo de carga (flexión, tracción, torsión, etc.) y soldadura, fundición, maquinado, acabado final de la construcción, etc.

8. Metodología

8.1. Simulación y Medida

En esta investigación, se simuló la turbina tipo savonius en el área rural de Villavicencio, y esta simulación se realizó mediante el programa SolidWork, con el fin de conocer el tipo de aerogenerador adecuado, la atención se centró en las velocidades del viento de 2,5 y 3,5 m/s porque son las velocidades constantes del viento durante el año.

9. Resultados

En la figura 6 se muestra los detalles de las palas Savonius utilizadas en este estudio, ya que se utilizaron dos palas con las siguientes especificaciones: altura de la pala 1400 mm, pala superpuesta 50 mm, diámetro del rotor 1100 mm, diámetro de la pala 600 mm, altura de la torre 2500 mm, el material utilizado fibra de vidrio. Las dos turbinas anteriores se simulan y descubren qué tipo es el más adecuado para Zonas veredales de Villavicencio, según las condiciones de la ciudad de Hebrón en Zonas veredales de Villavicencio. Por lo tanto, saber qué turbinas son más eficientes a las velocidades del viento disponibles y calcular cuánta energía pueden producir estas turbinas.

Figura 11. Detalles modelo Savonius

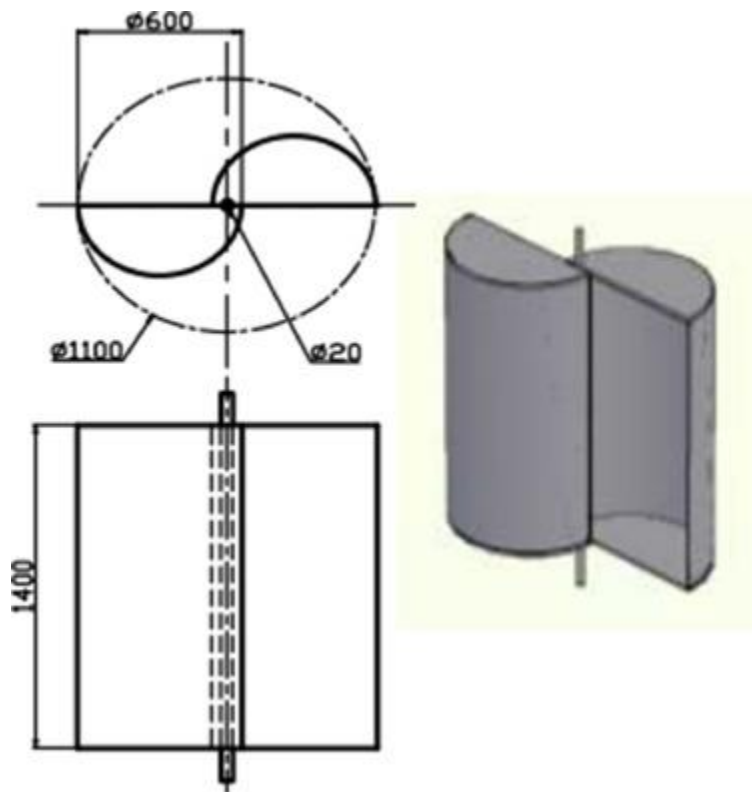


Tabla 1 Medidas para turbina Savonius (Pamungkas et al., 2018)

Parámetros de diseño	Valor
Altura de la torre	2500mm
Número de cuchillas	2
Generador (tipo PMG)	200 vatios
Diámetro del eje principal	20mm
Diámetro del rotor	1100mm
Diámetro de la hoja	600mm
Hoja alta / hoja	1400mm
Hoja superpuesta	50mm
Material de las cuchillas	Fibra de vidrio, 0,3 mm

Es el tipo de turbina eólica más simple en términos de diseño y estructura, y este tipo es VAWT. La forma está cerca de la letra S, el rotor Savonius tiene una construcción simple y fuertes propiedades de arranque automático, sin embargo, la eficiencia de conversión de energía de un rotor Savonius típico es menor que la de una turbina de eje horizontal y menor que la de una turbina de eje vertical impulsada por elevación.

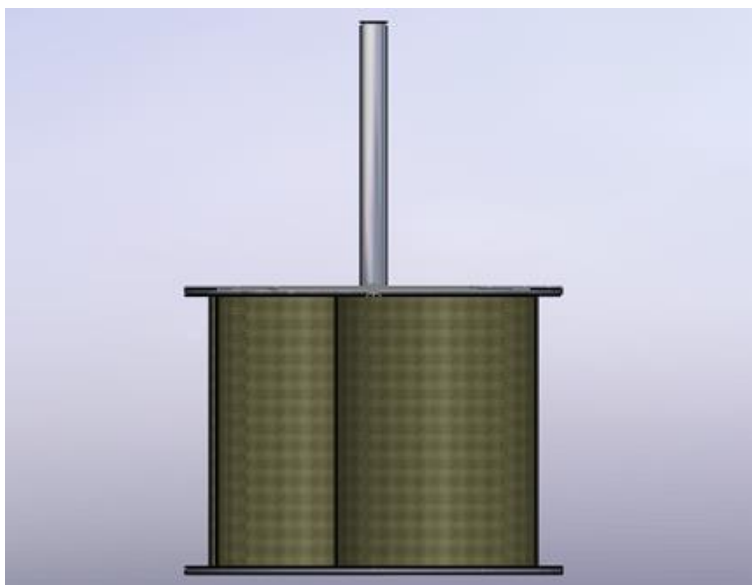
Figura 12. Simulación en SolidWorks de la turbina eólica tipo savonius

Figura 13. Vista de la simulación

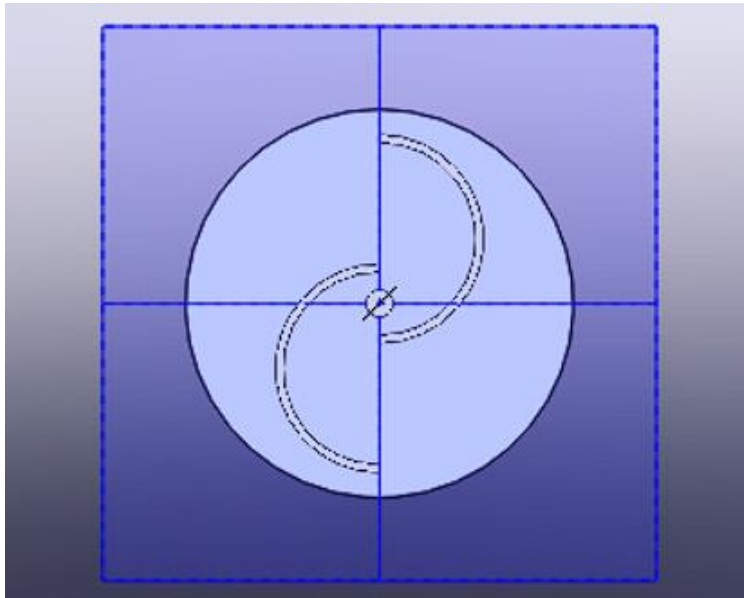


Figura 14. Visualización simulación

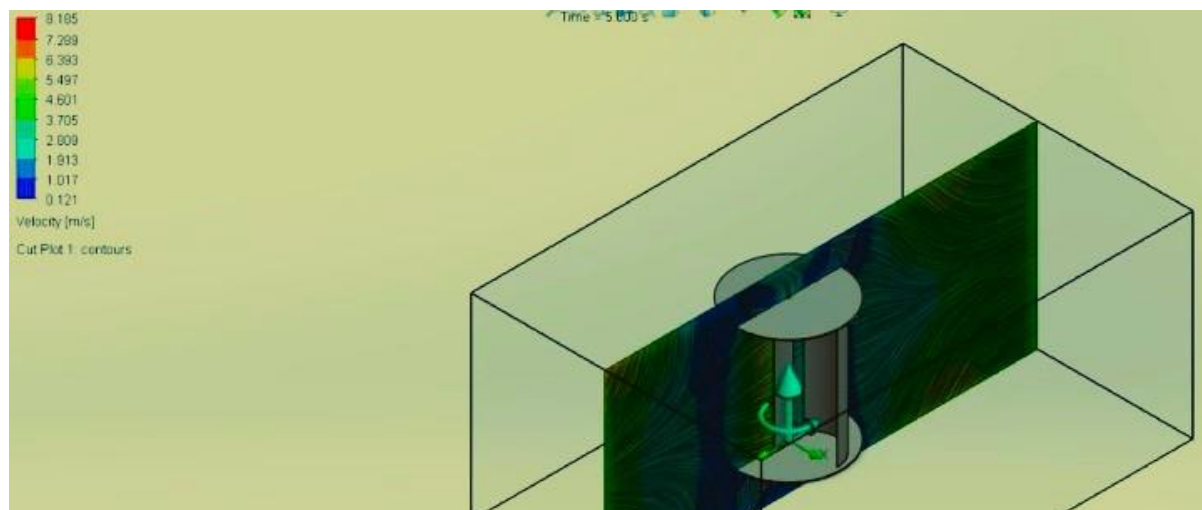


Tabla 2 Resultados de la simulación utilizando Savonius a una velocidad del viento 2,5 m/s

Energía (Whr/m²)	Potencia (w/m²)	Par (NM)	Velocidad de rotación (rpm)	velocidad angular (rad/s)	Velocidad del viento (m/s)	Duración (horas)
0	0	0	0.000	0	0	1002
955.908	0.954	0.954	9,554	1	2.5	1002
2889.768	2,884	1,442	19.108	2	2.5	1002
6396.768	6,384	2.128	28,662	3	2.5	1002
11555.064	11,532	2,883	38.217	4	2.5	1002
17514.96	17.48	3,496	47,771	5	2.5	1002
28220.328	28,164	4,694	57,325	6	2.5	1002
35988.834	35,917	5.131	66,879	7	2.5	1002
48047.904	47,952	5,994	76,433	8	2.5	1002
56100.978	55,989	6.221	85,987	9	2.5	1002
73657.02	73.51	7,351	95,541	10	2.5	1002

Tabla 3 Resultados de la simulación utilizando Savonius a una velocidad del viento de 3,5 m/s

Energía (Whr/m²)	Potencia (w/m²)	Par (NM)	Velocidad de rotación (rpm)	velocidad angular (rad/s)	Velocidad del viento (m/s)	Duración (horas)
0	0	0	0	0	0	120
138.96	1.158	1.158	9.554140127	1	3.5	120
558.24	4,652	2,326	19.10828025	2	3.5	120
1148.4	9.57	3.19	28.66242038	3	3.5	120
1806.72	15.056	3,764	38.21656051	4	3.5	120
2617.8	21,815	4,363	47.77070064	5	3.5	120
4121.28	34,344	5,724	57.32484076	6	3.5	120
5347.44	44,562	6,366	66.87898089	7	3.5	120
7637.76	63,648	7,956	76.43312102	8	3.5	120
9010.44	75.087	8,343	85.98726115	9	3.5	120
11034	91.95	9.195	95.54140127	10	3.5	120

De las anteriores tablas se puede apreciar que la potencia obtenida de la simulación del aerogenerador para las dos velocidades planteadas y propias de la región (2,5 y 3,5 m/s) oscila entre

73,51 y 91,95 w/m², el área de cobertura es un poco más de un metro cuadrado, pero la eficiencia de los generadores eléctricos pequeños es del 90% lo que nos deja un margen de potencia obtenida desde 70 hasta 100 w a la salida.

La potencia máxima en vatios que se puede generar con un rotor Savounius puede calcularse mediante la siguiente fórmula: $P_{max} = 0,18 \cdot H \cdot D \cdot v^3$ [en W], donde H es la altura y D el diámetro del rotor, ambos expresados en metros [m] y v^3 es el cubo de la velocidad del viento expresada en metros por segundo [m/s]. El diseño realizado posee una altura de 1,4 m y un diámetro de 1,2 m, se probó con las velocidades que para la región son entre 2,5 y 3,5 m/s. según los cálculos sería esta potencia máxima de 72,03 W. Resultado confirmado con los resultados de las simulaciones mostrados en las tablas 2 y 3 en donde las máximas potencias son entre 70 y 100 watios para el área dada.

En cuanto a la energía obtenida a 3,5 m/s en la tabla 3 en la última fila para 120 horas (5 días) nos muestra 11034 W-hr/m² para el diseño el área de captura es de 1,4 m x 1,2 m = 1,68 m², es decir 18.537 W-hr energía suficiente para mantener encendidos 19 bombillas LED de 8 W cada una durante ese periodo.

El costo de la fibra de vidrio necesaria para la elaboración de los perfiles sería de \$ 144.000, el generador y el controlador de carga sumarian \$ 653.000, es decir un total de \$ 797.000, que es más bajo que algunos generadores comerciales en donde los precios están por encima de \$1.500.000.

Dados los datos de la energía obtenida por la simulación, esta no sería una solución única para el consumo de una residencia rural, en donde para 6 lámparas (8W), un tv (100 W), pequeños electrodomésticos (100w) y una nevera pequeña (80 w) para un total de 330 w cuando todo este encendido, es decir tres aerogeneradores conectados directamente a la carga, sin embargo el dato importante es la energía consumida realmente en el periodo; tomando un promedio de 8 horas encendidas las lámparas y el televisor, 4 horas los otros electrodomésticos y 24 la nevera y para el periodo analizado (5 días), el total de energía consumida sería 9680 W-hr, que es muy por debajo de lo generado en ese periodo, sin embargo se necesitarían más de dos generadores como los diseñados (por la potencia instantánea, o un sistema de almacenamiento (baterías de Ciclo Profundo 12v 20ah \$235.000, se harían necesarias dos dividiendo la energía entre 120vac y un ciclo de descarga diario) . Dado que se plantea esta última solución también podría pensarse en un sistema

hibrido junto a lo fotovoltaico que cubriera lo del segundo aerogenerador (un panel de 500 W) que tiene un costo de \$1.180.00 pero haría necesario que el controlador de carga funcionara para lo eólico y lo fotovoltaico, además de un inversor que soporte la potencia instantánea planteada (300 W) .

Esta última opción incrementaría los costos pero le daría confiabilidad al sistema para los días en los cuales la cantidad de potencial eólico en la región sea muy bajo, o aquellos días en los que la radiación sea baja se supliría la demanda con lo eólico.

10. Conclusiones

La ausencia del suministro eléctrico de energía en forma tradicional en algunos casos y el alto costo de la electricidad en otros limitan el bienestar y algunas veces el mismo crecimiento de la pequeña industria rural. Esto despierta el interés en las energías renovables en Zonas veredales de Villavicencio. La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable que puede utilizarse para complementar el suministro de electricidad de Zonas veredales de Villavicencio. Sin embargo las velocidades propias de la región no permiten considerar las turbinas eólicas de eje horizontal tradicionales. En este estudio, se realizaron simulaciones de aerogeneradores de eje vertical utilizando el software SolidWorks que permiten confirmar que estas son las adecuadas para la región.

Sin embargo la sola utilización de estos aerogeneradores no permite cubrir la demanda de un hogar rural tradicional, se debe garantizar la utilización de dispositivos consumidores con niveles de eficiencia energética adecuados, por ejemplo el remplazo de la iluminación por tecnología LED, el consumo de un bombillo incandescente tradicional de 100 w es suficiente para cubrir la demanda de 12 bombillas LED de 8 w.

Esta investigación examina la cantidad de energía creada por las turbinas para determinar qué turbinas producen la mayor cantidad de energía. Esto se logró mediante el modelado del aerogenerador con velocidades del viento que oscilan entre 2,5 y 3,5 m/s ya que son los valores medidos dentro de la zona rural de Villavicencio y así mismo este debe ser el perfil alar para la zona. Después de evaluar los resultados de la simulación, primero se concluye que el perfil simulado es adecuado a las velocidades de la región, segundo, como era de esperarse, las tasas de viento de 3,5 m/s proporcionan el mayor rendimiento energético, pero los cálculos de la demanda energética se realizaron con 2,5 m/s y fueron suficientes, esto hace el aerogenerador compatible con la naturaleza de las velocidades del viento en Zonas veredales de Villavicencio, entregando una potencia a esta velocidad cercana a los 100 w.

El costo de la elaboración e implementación del aerogenerador propuesto es menor a ofertas comerciales disponibles en el mercado.

Se realizaron cálculos de la demanda de energía en un periodo de 5 días, el total de energía consumida sería 9680 W-hr, que es muy por debajo de lo generado en ese periodo 73.657 W-hr, si se mantuviera la velocidad constante de 2,5 m/s; sin embargo se aprecia la necesidad de

implementar tres generadores como los diseñados (porque la potencia instantánea del consumo es mayor que la suministrada).

La solución necesitaría entonces un sistema de almacenamiento de esa energía (baterías de Ciclo Profundo, se harían necesarias dos dividiendo la energía entre 120vac y un ciclo de descarga diario), el ejercicio se hizo a 5 días pensando en una autonomía de esta duración, pero el número de baterías se incrementaría demasiado, y lógicamente los costos, por eso se calculó con ciclo de descarga por día.

Se propone entonces la utilización de un sistema híbrido con el aerogenerador y un sistema fotovoltaico, ya que se hizo patente la necesidad de baterías en el sistema eólico, entonces se utilizarían para los dos sistemas; se realizaron los cálculos, de las baterías, del panel, el controlador de carga y el inversor necesarios; además se haría necesario que el controlador de carga funcionara para lo eólico y lo fotovoltaico.

Esta última propuesta híbrida le brinda además confiabilidad al sistema pues en el momento que se reduzca la velocidad del viento, el sistema fotovoltaico supliría la demanda de la carga de las baterías.

Finalmente, el uso de recursos energéticos renovables, incluida la energía eólica, en Zonas veredales de Villavicencio mejora la seguridad interconectada entre el agua, la energía y los alimentos (WEF) y trabaja para lograr el desarrollo sostenible de los recursos hídricos, la seguridad alimentaria y la seguridad energética, y también es una forma eficaz de reducir las emisiones de carbono .

Se recomienda experimentar con varios tipos de turbinas VAWT, como H-rotor y Darrieus. Se pueden probar y comparar diferentes diseños de palas HAWT, así como la posibilidad de instalar turbinas en Zonas veredales de Villavicencio. Se sugiere que se lleve a cabo un experimento real con una turbina eólica y que se comparen los resultados con los obtenidos en este estudio. Se pueden utilizar Ansys y otros simuladores.

11. Referencias bibliográficas

- Albisher, H., & Alsamamra, H. (2019). An overview of wind energy potentials in Palestine. *Journal of Energy and Natural Resources*, 8(3), 98–108. <http://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=167&doi=10.11648/j.jenr.20190803.11>
- Alqurashi, F. y Mohamed, M. (2020). Aerodynamic forces affecting the H-rotor darrieus wind turbine». *Model. Simul. Eng.*, vol. 2020. <https://www.hindawi.com/journals/mse/2020/1368369/>
- Andrés, C., Andrade, D., & Hernández, J. C. (2011). Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=411534385004>
- Asamblea departamental del Meta. (2020). Plan de Desarrollo Departamental: Meta 2020-2023. <https://www.obsgestioneducativa.com/download/plan-de-desarrollo-departamental-meta-2020-2023/>
- Ayman, E., Darhmaoui, H., & Sheikh, N. (2017). Savonius Vertical Wind Turbine: Design, Simulation, and Physical Testing. *School of Sci. & Eng. Univ. Program*. <http://www.aui.ma/sse-capstone-repository/pdf/spring-2017/Savonius%20Vertical%20Wind%20Turbine%20-%20Design%20Simulation%20and%20Physical%20Testing.pdf>
- Barbero Herranz, A. (2009). Estudio y diseño de un aerogenerador basado en el efecto Magnus. <https://www.kimerius.com/app/download/5784776984/Estudio+y+dise%C3%B1o+de+un+aerogenerador+basado+en+el+efecto+Magnus.pdf>
- Belmili, H., Cheikh, R., Smail, T., Seddaoui, N. y Biara, R. (2017). Study, design and manufacturing of hybrid vertical axis Savonius wind turbine for urban architecture. *Energy Procedia*, vol. 136, pp. 330-335. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217353821>
- Bethi, R., Laws, P., Kumar, P. y Mitra, S. (2019). Modified Savonius wind turbine for harvesting wind energy from trains moving in tunnels. *Renew. Energy*, vol. 135, pp. 1056-1063.
- Breeze, P. (2014). *Wind Turbine Technology* - Knoval, 2nd editio. Elsevier.
- Budka, K., Deshpande, J. and Thottan, M. (2014). *Communication Networks for Smart Grids: Making Smart Grid Real*. In Springer-Verlag. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4471-6302-2>

- Burton,T, Jenkins,N, Sharpe,D y Bossanyi,E. (2011). The Nature of the Wind. Wind Energy Handbook, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2011, pp. 9-10.
https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_Energy_Handbook.pdf
- Cajal, A. (2017). Escudo de Villavicencio: Historia y Significado. Lifeder.
<https://www.lifeder.com/escudo-de-villavicencio/>
- Chan,C, Bai,H y He,D. (2028). Blade shape optimization of the Savonius wind turbine using a genetic algorithm. Appl. Energy, vol. 213, pp. 148-157.
- Cnhom,G. (2022). Controlador De Carga De Generador De Turbina Eólica De 600 W. Obtenido de: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-1054829435-controlador-de-carga-de-generador-de-turbina-eolica-de-600-w-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=f9b4d0ec-1c35-4116-a7f3-7089a4385617
- David,J. (2021). 1000w Controlador Solar Hibrido Eólico 40a 24v Turbina Eo. Obtenido de: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-583708823-1000w-controlador-solar-hibrido-eolico-40a-24v-turbina-eo-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=f9b4d0ec-1c35-4116-a7f3-7089a4385617
- Departamento nacional de planeación. (2018). Plan nacional de desarrollo.
<https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Resumen-PND2018-2022-final.pdf>
- Dieres Monplaisir, M. (1998). Lo que nos contó el abuelito: El Centenario de Villavicencio, 1842-1942 (Imprenta D).
https://books.google.com.co/books/about/Lo_que_nos_contó_el_abuelito.html?id=zITuSAAACAAJ&redir_esc=y
- El-Askary,W, Nasef,M, AbdEL-hamid,A y Gad,H. (2015). Harvesting wind energy for improving performance of savonius rotor. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 139, pp. 8-15.
https://www.researchgate.net/publication/270566788_Harvesting_Wind_Energy_for_Improving_Performance_of_Savonius_Rotor
- El-Askary,W, Saad, A, AbdelSalam,A y Sakr,I. (2018). Investigating the performance of a twisted modified Savonius rotor. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., vol. 182, n.o April, pp. 344-355.
https://www.researchgate.net/publication/328315578_Investigating_the_performance_of_a_twisted_modified_Savonius_rotor

- Escobar Díaz, A y Barrero Paez, L. (2009). Modelo matemático de un aerogenerador. pp. 48-60.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4168649.pdf>
- Escudero López, J. (2011). ¿Qué es el viento?, en Manual de energía eólica: Investigación, diseño, promoción, construcción y explotación de distinto tipo de instalaciones. 2nd ed. Mundi-Prensa.
- Fernanda, M., Saavedra, C., Perfetti Del Corral, M., Castro Valderrama, H., Helena, C., Quintero, A., Alonso, M., Gina, R., Calderón, G., Alexánder, L., María, C., Sol, D., Jaimes, E., Hernández, O., Édgar, S., Martínez, M., Emilce, M., Rojas, P., Técnico, E., ... Reyes, H. (2010). Manual de implementación escuela nueva Generalidades y Orientaciones Pedagógicas para Transición y Primer Grado. Tomo I.
https://www.guao.org/biblioteca/manual_de_implementacion_escuela_nueva_generalidades_y_orientaciones_para_transicion_y_primer_grado
- Giguere, P., & Selig, M. S. (1997). Low Reynolds number airfoils for small horizontal axis wind turbines. Wind Engineering, 367-380
- Heroyoi. (2019). Resina Poliéster Pre-acelerada X 1kilo Para Fibra De Vidrio. Obtenido de:
https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-468154374-resina-poliester-pre-acelerada-x-1kilo-para-fibra-de-vidrio-_JM#position=2&search_layout=stack&type=item&tracking_id=9f127af6-6cc6-47b4-bf04-9b456f28d634
- Instituto colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2009). Aerogeneradores. Requisitos de diseño para aerogeneradores pequeños. n.o 571.
<https://tienda.icontec.org/gp-aerogeneradores-requisitos-de-diseno-para-aerogeneradores-pequenos-ntc5725-2009.html>
- Instituto de Turismo de Villavicencio. (2016). Información General.
https://www.turismovillavicencio.gov.co/site/index.php?option=com_content&view=article&id=150&Itemid=722
- Jacob, J y Chatterjee, D (2019). Design methodology of hybrid turbine towards better extraction of wind energy. Renew. Energy, vol. 131, pp. 625-643.
<https://ideas.repec.org/a/eee/renene/v131y2019icp625-643.html>

- Kaldellis, J y Zafirakis, D. (2011). The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. Renewable Energy. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148111000085>
- Kerlin, T. (2013). Future Energy - Opportunities and Challenges. ISA. <https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1000&context=openbooks>
- Kumar, R, Raahemifar, K y Fung, A. (2018). A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v89y2018icp281-291.html>
- Liu, K, Yu, M y Zhu, W. (2019). Enhancing wind energy harvesting performance of vertical axis wind turbines with a new hybrid design: A fluid-structure interaction study, Renew. Energy, vol. 140, pp. 912-927, 2019. «Acceso a la electricidad (% de población) | Data», Banco Mundial. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS>.
- Mahmood, M. (2012). Vertical axis wind turbine – A review of various configurations and design techniques. Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 16, n.o 4, pp. 1926-1939.
- Maldonado, R. (2014). Design, simulation and construction of a Savonius wind rotor for subsidized houses in Mexico. Energy Procedia, vol. 57, pp. 691-697. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2518-44312022000100161&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- Meteoblue. (2022). Datos climáticos y meteorológicos históricos simulados para Villavicencio. https://www.meteoblue.com/es/tiempo/historyclimate/climatemodelled/villavicencio_colombia_3665900
- Ministerio de Educación Nacional de Colombia. (2021). Sedes educativas Villavicencio, Meta. https://www.mineducacion.gov.co/1759/articles-364338_recurso_92.xlsx
- Montalvo, V. (2016). Suministro de Energía para las Zonas Rurales de Colombia. Obtenido de: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15744/u729099.pdf?sequence=1>
- Morimitsu, D. (2015). Diseño de un generador eólico de eje vertical de baja potencia. <https://core.ac.uk/download/pdf/71398398.pdf>
- Pallotta, A, D, Pietrogiaconi, y G, Romano. (2020). hybrid– a combined savonius-darrieus wind turbine: performances and flow fields. Energy, vol. 191, pp. 1-15. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219321280>

- Pamungkas, S. F., Wijayanto, D. S., Saputro, H., & Widiastuti, I. (2018). Performance “S” Type Savonius Wind Turbine with Variation of Fin Addition on Blade. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 288(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/288/1/012132>
- Petchers, N. (2012). Combined Heating, Cooling & Power Handbook - Technologies & Applications (2nd Edition) - Knovel, 2nd ed. Fairmont Press, Inc. <https://www.scribd.com/document/167836337/Combined-Heating-Cooling-Power-Handbook-41>
- Rashid, M. (2018). Wind Turbine Charge Controller. Power Electronics Handbook, 4th ed., Elsevier, p. 811. https://www.academia.edu/7714205/POWER_ELECTRONICS_HANDBOOK
- Ricci, R., Romagnoli, R., Montelpare, S. y Vitali, D. (2016). Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems. Appl. Energy, vol. 161, pp. 143-152. <https://ideas.repec.org/a/eee/appene/v161y2016icp143-152.html>
- Richmond-Navarro, G. (2015). Horizontal axis Magnus wind turbine performance according to their geometric and kinematic variables. Tecnol. en Marcha, vol. 29, pp. 38-50. Obtenido de: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/tem/v29n1/0379-3982-tem-29-01-00038.pdf>.
- Robles, F. (2017). Bandera de Villavicencio: Historia y Significado. Lifeder. <https://www.lifeder.com/bandera-villavicencio/>
- S. de I. E. Colombiano. (2019). Informes de cobertura. <http://www.siel.gov.co/Inicio/CoberturaDelSistemaInterconectadoNacional/ConsultasEstadisticas/tabid/81/Default.aspx>.
- SENNET Colombia. (2022). Bateria Ciclo Profundo 12v 20ah Sistema Solar. Obtenido de: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-805269956-bateria-ciclo-profundo-12v-20ah-sistema-solar-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=6a96b21f-0108-48aa-a5d9-d966cf63578b
- Shepherd, W. y Zhang, L. (2011). Past and Present Wind-Energy Turbines. Electricity Generation Using Wind Power, 2011, pp. 41-64.
- Solartex. (2022). Generador Eólico eje vertical 400 watts. Obtenido de: <https://www.solartex.co/tienda/producto/generador-eolico-eje-vertical/>

- Tahboub, R., Ibrik, I., & Tamimi, M. (2011). The potential and feasibility of solar and wind energy applications in Al-Ahli Hospital. A Paper Presented at the 4th International Energy Conference in Palestine. https://www.researchgate.net/publication/266617598_The_Potential_and_Feasibility_of_Solar_and_Wind_Energy_Applications_in_Al-Ahli_Hospital
- U.S. Department Of Energy. (2012a). What is Distribution Intelligence. https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/distribution_intelligence.html
- U.S. Department Of Energy. (2012b). What is Renewable Energy. https://www.smartgrid.gov/the_smart_grid/renewable_energy.html
- Unidad de Planeación Minero-Energética. (2011). Ley 697 de 2001, Evolución de variables de generación. <https://www1.upme.gov.co/siel>
- Universidad de los Llanos. (2019) . Ministerio de Minas y Energía, Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las Zonas No Interconectadas (IPSE), Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME). PERS Orinoquia. http://observatorio.unillanos.edu.co/pers/#s5_scrolltotop.
- Wenhenubun,F, Saputra,A y Sutanto,H. (2015). An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. Energy Procedia. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215005652>
- Wikimedia. (2012). File:Colombia - Meta - Villavicencio.svg - Wikimedia Commons. Obtenido de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Colombia_-_Meta_-_Villavicencio.svg
- WO Services. (2022, mayo 3). Weather online pronostico vanguardia aeropuerto. Obtenido de: <https://www.woespana.es/weather/maps/city?FMM=1&FYY=2007&LYY=2022&WMO=80234&CONT=samk®ION=0021&LAND=CO&ART=WST&R=0&NOREGION=0&LEVEL=162&LANG=es&MOD=MOA>
- Xiao, Y. (2013). Security and Privacy in Smart Grids. In Security and Privacy in Smart Grids. <https://doi.org/10.1201/b15240-8>
- Zemamou, M, Aggour,M y Toumi, A. (2017). Review of savonius wind turbine design and performance. Energy Procedia, vol. 141, pp. 383-388. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021735453>