



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y

AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES

PLAN DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

**“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA AUTÓNOMO
EÓLICO-SOLAR PARA ILUMINACIÓN PÚBLICA EN EL TRAMO DE LA
PANAMERICANA KILÓMETRO 153 DE LA CIUDADELA IMBAYA DEL
CANTÓN OTAVALO”**

MODALIDAD PRESENCIAL

PRODUCCIÓN INDUSTRIAL Y TECNOLÓGICA SOSTENIBLE

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES**

AUTOR:

LUIS RONALDO FARINANGO SANDOVAL

DIRECTOR:

LUIS HERNÁN ÁLVAREZ JÁTIVA, MSc

Octubre – 2024



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO		
CÉDULA DE IDENTIDAD	1004231914	
APELLIDOS Y NOMBRES	Farinango Sandoval Luis Ronaldo	
DIRECCIÓN:	Otavalo	
EMAIL:	ronaldo.farinango17@gmail.com	
TELÉFONO FIJO:	TELÉFONO MÓVIL:	0982696623
DATOS DE LA OBRA		
TÍTULO:	CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA AUTÓNOMO EÓLICO-SOLAR PARA ILUMINACIÓN PÚBLICA EN EL TRAMO DE LA PANAMERICANA KILOMETRO 153 DE LA CIUDADELA IMBAYA DEL CANTÓN OTAVALO	
AUTOR:	Farinango Sandoval Luis Ronaldo	
FECHA:	05-08-2024	
PROGRAMA:	GRADO	
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Energías Renovables	
DIRECTOR:	Luis Hernán Álvarez Játiva, MSc	

2. CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de octubre de 2024

EL AUTOR:



Farinango Sandoval Luis Ronaldo

CERTIFICACIÓN DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTERGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 28 de octubre de 2024

MSc. Luis Hernán Álvarez Játiva

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)

MSc. Luis Hernán Álvarez Játiva

C.C.: 100227367-8

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del Trabajo de Integración Curricular “CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA AUTÓNOMO EÓLICO-SOLAR PARA ILUMINACIÓN PÚBLICA EN EL TRAMO DE LA PANAMERICANA KILÓMETRO 153 DE LA CIUDADELA IMBAYA DEL CANTÓN OTAVALO” elaborado por LUIS RONALDO FARINANGO SANDOVAL previo a la obtención del título de INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f):.....

MSc. Luis Álvarez
C.C.: 100227367-8

(f):.....

MSc. Juan Guamán
C.C.: 100299224-4

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi padre el Sr. Luis Farinango, viejo querido te agradezco por seguir conmigo alentándome cada día para poder cumplir y que te sientas orgulloso de un logro más. Espero sigas a mi lado y que me sigas viendo triunfar.

A mi madre Sra. Amparito Sandoval quien siempre estuvo a mi lado, usted junto a mi padre son los grandes protagonistas para llegar a cumplir este gran logro. Gracias por sus bendiciones y oraciones que han servido de mucho en toda mi vida estudiantil.

A mis hermanos Karla y Darío agradecerles por ser ese ejemplo de crecimiento personal y profesional. Mis queridos hermanos este logro lo comparto con ustedes.

A Joselyn P. quien ha estado conmigo en cada éxito y fracaso de esta etapa universitaria.

Finalmente, a mi hijo Cedrick Matias, quien ha sido el motivo por el cual ha valido la pena cada desvelada para poder cumplir este logro profesional. Te amo campeón y todo esto es por ti y para ti.

Luis Ronaldo Farinango Sandoval

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, le doy gracias a Dios por haberme permitido cumplir cada faceta de mi vida estudiantil hasta el día de hoy y espero que siga guiándome para seguir cumpliendo nuevos logros.

Gracias a mis padres quienes han hecho todo lo posible por verme triunfar. Agradezco sus enseñanzas y valores inculcados que han sido un pilar importante para no desfallecer en las adversidades que se han presentado en el transcurso de mi vida universitaria.

Gracias a mi familia por aportar de una u otra manera en mi formación profesional, han sido un gran apoyo físico, psicológico y emocional para poder culminar mi carrera de ingeniería.

Un agradecimiento fraterno a mi director de tesis MSc. Luis Álvarez y a mis asesores MSc. Juan Guamán y MSc. Jorge Granja, quienes me han impartido sus conocimientos para poder formarme como un profesional de razonable y de amplio criterio.

En general quiero agradecer a mis compañeros y amigos quienes han sido parte fundamental en el transcurso universitario, por fortalecer un lazo de compañerismo y amistad con la que siempre podré contar.

RESUMEN

La construcción de un sistema piloto eólico-solar en el tramo de la panamericana kilómetro 153 de la ciudadela Imbaya será el eje transcendental de un sistema innovador de alumbrado público (farola) avivado por tecnologías en energía renovable tanto eólica como solar. La investigación se lleva a cabo en el cantón Otavalo provincia de Imbabura, con la finalidad de abastecer energía eléctrica al alumbrado público mediante un sistema autónomo eólico-solar. En la primera fase de la investigación se realiza la toma de datos del recurso eólico-solar para, posteriormente, realizar un análisis multicriterio que evalúe todas las características con el objetivo de determinar la zona óptima de implementación del sistema. La segunda fase consiste en la construcción de la turbina eólica de eje vertical (tipo Savonius). Se realiza el modelado de cada una de sus partes mediante la utilización del software AUTOCAD e INVENTOR. Por otro lado, se plantea la adquisición del panel fotovoltaico. En la tercera etapa se implementa el sistema eólico-solar en la zona más apropiada según los resultados del primer objetivo, continuando con la evaluación tanto del voltaje de salida como la velocidad de revolución.

Palabras Clave:

- Energía
- Renovables
- Fotovoltaico/a
- Eólico/a
- Prototipo
- Construcción

ABSTRACT

The construction of a pilot wind-solar system on the section of the Pan-American Highway at kilometer 153 in the Imbaya citadel will be the main part of a public lighting system (streetlight) powered by renewable energy sources, both wind and solar. The research is being carried out in the Otavalo canton, province of Imbabura, with the aim of supplying electricity to public lighting through an autonomous wind-solar system. In the first phase of the research, data is collected from the wind-solar resource to subsequently perform a multi-criteria analysis that evaluates all the characteristics with the aim of determining the optimal area for the implementation of the system. The second phase consists of the construction of the vertical axis wind turbine (Savonius type). Each of its parts is modeled using AUTOCAD and INVENTOR software. On the other hand, the acquisition of the photovoltaic panel is proposed. In the third stage, the wind-solar system is implemented in the most appropriate area according to the results of the first objective, continuing with the evaluation of both the output voltage and the revolution speed.

Keywords

- Energy
- Renewable
- Photovoltaic
- Wind
- Prototype
- Construction

LISTA DE SIGLAS

COA. Código Orgánico ambiental

MAE. Ministerio del Ambiente del Ecuador.

MAG. Ministerio de Agricultura y Ganadería

FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

ISTA. Reglas Internacionales para el Análisis de las Semillas.

INAMHI. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología – Ecuador.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Capítulo I Introducción	1
1.1.	Problema de Investigación	1
1.2.	Antecedentes	2
1.3.	Justificación.....	4
1.4.	Objetivos	4
1.4.1.	Objetivo General.....	4
1.4.2.	Objetivos Específicos.....	4
1.5.	Hipótesis.....	5
1.6.	Pregunta Directriz	5
2.	Capítulo II Marco Teórico	6
2.1.	Revisión de Literatura	6
2.1.1.	Energía	6
2.1.2.	Fuentes de Energía no Renovable.....	6
2.1.3.	Fuentes de Energía Renovable.....	7
2.1.4.	Radiación Solar.....	9
2.1.5.	Medición del Recurso Solar.....	9
2.1.6.	Satélites para medición de radiación solar.....	10
2.1.7.	Modelos de Radiación Basados en Satélites.....	10
2.1.8.	Módulo o Panel Solar.....	12

2.1.9.	Efecto Fotovoltaico.....	12
2.1.10.	Energía Eólica a Pequeña Escala	13
2.1.11.	Aerogeneradores.....	17
2.1.12.	Generador Eléctrico.....	23
3.	Capítulo III Metodología	29
3.1.	Área de Estudio	29
3.2.	Métodos.....	31
3.2.1.	Evaluación del potencial energético del punto de estudio (desvío a Selva Alegre y redondel del colegio Otavalo).....	31
3.2.2.	Construir el sistema piloto eólico-solar para el alumbrado público	32
3.2.3.	Evaluación del sistema piloto eólico-solar	58
4.	Capitulo IV Resultados.....	61
4.1.	Evaluación del Potencial Energético del Punto de Estudio (Desvío a Selva Alegre y Redondel del Colegio Otavalo).....	61
4.1.1.	Estudio Solar de la Zona.....	61
4.1.2.	Heliofanía del Punto de Investigación	62
4.1.3.	Estudio Eólico de la Zona.....	63
4.1.4.	Análisis Eólico.....	63
4.2.	Construcción del Sistema Eólico-Solar.....	66
4.2.1.	Potencia Nominal del Viento	66
4.2.2.	Cálculo de la Potencia Total Extraída.....	66

4.2.3.	Dimensionamiento del Rotor	67
4.2.4.	Área de Barrido.....	67
4.2.5.	Velocidad de punta del álabe	68
4.2.6.	Cálculo de la velocidad angular	68
4.2.7.	Torque.....	68
4.2.8.	Cálculo de las Dimensiones de las Tapas	68
4.2.9.	Construcción Turbina Savonius.....	69
4.2.10.	Construcción del Generador de Flujo Axial.....	72
4.2.11.	Dimensionado Sistema Fotovoltaico.....	76
4.3.	Evaluación del Sistema Piloto Eólico-Solar para el Alumbrado Público.	77
4.3.1.	Instalación del Prototipo Eólico-Solar	77
4.3.2.	Determinación de la producción energética.....	82
5.	Capítulo V Conclusiones	86
6.	Recomendaciones	88
7.	Referencias.....	89
8.	Anexos	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Potencial eólico a pequeña escala	14
Tabla 2 <i>Datos del cantón Otavalo</i>	30
Tabla 3 <i>Condiciones Ambientales</i>	32
Tabla 4 Especificaciones bobinas en el estator	51
Tabla 5 <i>Características imán Neodimio</i>	52
Tabla 6 <i>Elementos circuito electrónico</i>	59
Tabla 7 <i>Velocidades del punto de estudio</i>	64
Tabla 8 <i>Medidas turbina Savonius</i>	69
Tabla 9 Materiales utilizados en la turbina Savonius	70
Tabla 10 Principales características del panel solar.....	75

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Estructura de un módulo fotovoltaico	12
Figura 2 Efecto fotovoltaico	13
Figura 3 Límite de Betz	17
Figura 4 a) Aerogenerador de eje horizontal b) Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus	18
Figura 5 Perfil aerodinámico de un rotor Savonius	19
Figura 6 Secuencia de giro de un rotor Savonius	20
Figura 7 Pasaje de álabe cerrado.....	20
Figura 8 Pasaje de álabe abierto	21
Figura 9 Rotor Savonius	23
Figura 10 Generador de imanes permanentes.....	24
Figura 11 Generador de flujo radial.....	25
Figura 12 Generador axial	26
Figura 13 Zona de implementación del proyecto	29
Figura 14 Rotor Savonius	34
Figura 15 Coeficiente de potencia C_p según límite de Betz.....	35
Figura 16 Curvas coeficiente de potencia.....	36
Figura 17 Curva coeficiente de potencia	37
Figura 18 Turbina Savonius de dos módulos.....	38
Figura 19 Efecto de las tapas sobre el rendimiento	46
Figura 20 Esquema general de tapas del rotor	47
Figura 21 Ubicación de las tapas en el aerogenerador Savonius.....	48
Figura 22 Generación del generador de flujo axial.....	49

Figura 23 Configuración de imanes en el rotor	50
Figura 24 Radiación Global noviembre 2020 - noviembre 2021	61
Figura 25 Heliofanía en el emplazamiento noviembre 2020 - noviembre 2021	62
Figura 26 Tendencia de la velocidad del viento	64
Figura 27 Rosa del viento del punto de investigación	65
Figura 28 Diseño Turbina Savonius	70
Figura 29 Construcción de la turbina Savonius	71
Figura 30 Conjunto de imanes (rotor) y bobinas (estator).....	72
Figura 31 Generador de flujo axial	74
Figura 32 Módulo fotovoltaico	76
Figura 33 Instalación de la turbina Savonius.....	78
Figura 34 Posicionamiento del panel solar	79
Figura 35 Acoplamiento y conexionado del generador de flujo axial	80
Figura 36 Conexión regulador de carga eólico.....	80
Figura 37 Conexión bancada de baterías	81
Figura 38 Conexión del regulador de carga solar	82
Figura 39 Diagrama electrónico de toma de datos de determinación energética	83
Figura 40 Tabulación de producción energética durante los días de evaluación del prototipo eólico-solar	84
Figura 41 Promedio general de producción de energía del prototipo eólico-solar	84

Capítulo I

Introducción

“CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN SISTEMA AUTÓNOMO EÓLICO-SOLAR PARA ILUMINACIÓN PÚBLICA EN EL TRAMO DE LA PANAMERICANA KILÓMETRO 153 DE LA CIUDADELA IMBAYA DEL CANTÓN OTAVALO”

1.1. Problema de Investigación

Las áreas públicas destinadas al tránsito de peatones y vehículos son lugares adecuados para implementar las directrices de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables 006/20. Estas directrices establecen parámetros fotométricos, como la iluminancia, la uniformidad de la iluminación y el incremento del umbral, con el objetivo de asegurar un espacio con iluminación adecuada para la seguridad y el desenvolvimiento cotidiano de la ciudadanía.

En Otavalo existe un desconocimiento de la tecnología adecuada para el uso adecuado de las energías renovables eólica y solar en las zonas urbanas. En varias zonas del cantón Otavalo se encuentra un ambiente sombrío por las noches debido a la ausencia de alumbrado público, en la mayoría de tiempo, suele estar averiado provocando inseguridad en zonas urbanas con elevado tránsito del cantón; por otro lado existen extensiones de la panamericana que atraviesa por el cantón, con un nulo porcentaje de alumbrado público, lo que podría provocar un accidente en cualquier momento, cabe mencionar la existencia de alumbrado público excesivo en varias zonas del cantón Otavalo, dando una perspectiva ineficiente en el distributivo energético con respecto al alumbrado público.

1.2. Antecedentes

El uso de recursos provenientes de energía renovable inició desde el siglo XX a.C., en forma de energía hidráulica, solar y eólica para el desarrollo de actividades vinculadas con el ser humano, para mejorar el estilo de vida (Sociedad et al., 2016). Las cuestiones relacionadas con el medio ambiente y la energía han acaparado cada vez más atención en las últimas décadas. En un esfuerzo por reducir sus efectos negativos sobre el medio ambiente y aumentar la eficiencia energética, un gran número de investigadores se ha concentrado en explorar sistemas inteligentes de producción de energía y fuentes de energía renovables (Ricci et al., 2016). Debido al agotamiento de los recursos naturales, actualmente hay más demanda de energía que oferta (Sachin et al., 2018). El agotamiento global de las reservas de combustibles fósiles ha hecho de las energías renovables una preocupación pertinente en el mundo moderno. Además, el uso de combustibles fósiles para producir energía tiene efectos medioambientales adversos como la lluvia ácida, el calentamiento global y las emisiones de gases de efecto invernadero. Las fuentes de energía renovables son importantes en esta situación (Helonde, 2019). Durante el siglo XX, se presentaron problemas relacionados con el almacenamiento y el suministro insuficiente de electricidad, lo que impulsó el desarrollo de alternativas para generar electricidad a través de energías renovables de bajo costo (Patil et al., 2017).

La tendencia en el uso de fuentes energéticas renovables en diversas aplicaciones en el mundo es un tema contemporáneo focalizado a la búsqueda de la imagen "verde" articulada a la eficiencia; con un "plus" de alto nivel de desarrollo económico ambiental (Nel et al., n.d.). En décadas recientes se ha caracterizado un considerable interés en los temas ambientales y energéticos; mediante estudios sobre fuentes alternativas de energía y

sistemas innovadores de producción, para contribuir a la reducción del impacto ambiental y eficiencia energética (Ricci et al., 2016).

Un componente fundamental de la vida humana es la electricidad. El consumo de energía en Ecuador produce diversos efectos, como calor, luz, movimiento y reacciones químicas. Estos efectos son producidos por los electrodomésticos, el transporte, la iluminación y la industria, entre otros aspectos de la vida cotidiana (Agencia de Regularización y Control Eléctrico, 2019).

La búsqueda de alternativas para ahorrar energía en diversas actividades cotidianas, desde la iluminación pública hasta la industria en general, puede conducir a soluciones que resulten en un ahorro significativo de recursos económicos. Este ahorro es crucial para el desarrollo del sector eléctrico y la eficiencia energética, un factor clave en tiempos de crisis (Rosero, 1996).

El alumbrado público es una forma de progreso de las grandes metrópolis a nivel mundial, con una estructura y abastecimiento complejo, grandes inversiones situación que conlleva a la optimización de los recursos. Por otra parte, el aprovechamiento de las energías renovables actualmente ha resuelto problemas de energía eléctrica en lugares aislados a las metrópolis, tecnología con tendencia a ser aplicable en los centros urbanos.

Para un país y su economía, el alumbrado público es un factor clave y un elemento importante para su desarrollo productivo y social, del cual no se puede prescindir. Es necesario implementar medidas adecuadas para contar con sistemas eficientes que permitan ahorrar energía (Anchatipan Aldaz & Claudio Calvopiña, 2016).

1.3. Justificación

Optimizando el consumo energético del alumbrado público, se puede implantar un sistema eólico-solar que aproveche tanto la energía solar como la eólica. Integrar la iluminación con fuentes de energía solar y eólica es una forma eficaz de reducir los costes energéticos y aumentar la eficacia del sistema de alumbrado público, que actualmente supone una gran carga para las administraciones públicas (Nel et al., n.d.). El objetivo principal del proyecto es crear una turbina eólica de eje vertical que capte eficazmente la energía eólica producida por los coches en movimiento. En comparación con las turbinas de eje horizontal, este tipo de aerogenerador, de eje vertical, puede captar más energía del viento (Sachin et al., 2018). La disposición de las placas solares es de tal manera que desvíen el aire del vehículo hacia la turbina para el uso eficaz del aire del vehículo (Awan, 2013). El sistema solar genera energía eléctrica mediante la radiación solar en modo diurno; de este modo se tiene un sistema mixto para una mayor captación de energía (Belmili et al., 2017).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Construcción de un sistema autónomo eólico-solar para alumbrado público en la ciudad de Otavalo.

1.4.2. Objetivos Específicos

Evaluar el potencial energético del punto de estudio (desvío a Selva Alegre y redondel del colegio Otavalo).

Construcción del sistema piloto eólico-solar para el alumbrado público.

Evaluación del sistema piloto eólico-solar para el alumbrado público.

1.5. Hipótesis

El prototipo autónomo eólico-solar permite generar energía suficiente para iluminación pública bajo el reglamento RTE INEN 069 “Alumbrado Público”.

1.6. Pregunta Directriz

¿Es apropiado el recurso eólico y solar en el cantón Otavalo para ser aprovechado mediante un sistema mixto autónomo?

Capítulo II

Marco Teórico

Los datos utilizados para elaborar la investigación se presentan en este capítulo, junto con referencias a investigaciones anteriores, publicaciones académicas y análisis centrados en la evaluación del recurso eólico-solar para instalaciones autónomas mixtas.

2.1. Revisión de Literatura

2.1.1. Energía

Según Cengel y Boles (2011), la energía es la «capacidad de realizar trabajo» y puede adoptar diferentes formas, como la mecánica, la física, la química y la eléctrica. La energía, como señalan Kuyper y Morales (2014), es una idea intangible y fundamental en el cosmos. Aunque a menudo no resulte obvio, la energía es esencial para la mayoría de las facetas de la existencia cotidiana. Por ejemplo, la sostenibilidad de la vida y su calidad dependen del suministro de energía. En consecuencia, es fundamental comprender las fuentes de energía, los procesos por los que se transforma y los efectos de estas transformaciones (Cengel y Boles, 2011).

2.1.2. Fuentes de Energía no Renovable

Son quienes se encuentran en pequeñas cantidades en la naturaleza, lo que significa que se agotan y luego se reponen a lo largo del tiempo (Schallenberg et al., n.d.). A partir de ellos se desarrolló el actual modelo energético inestable, y proporcionan alrededor del 80% de la energía mundial (Kuyper & Morales, n.d.).

Los combustibles fósiles se crean cuando los restos de organismos vivos se comprimen y permanecen en la corteza terrestre durante millones de años. Como los combustibles fósiles han tardado tanto en desarrollarse, tienen una alta densidad energética.

Como consecuencia, los recursos fósiles en la Tierra son finitos y acabarán agotándose (Eales, 2012).

Las tres fuentes de recursos fósiles más importantes son:

Petróleo. Tiene una mezcla increíblemente compleja de moléculas de hidrocarburos y varía en viscosidad. Además de los hidrocarburos, contiene menores cantidades de compuestos que incluyen nitrógeno, azufre y oxígeno (como ácidos nafténicos y derivados fenólicos), así como trazas de elementos metálicos (Speight, 2019).

Carbón. Con distintas cantidades de hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Es una roca de combustión directa que suele aparecer en los estratos geológicos en forma de filones o capas denominadas capas de carbón (Speight, 2019)

Gas Natural. Los combustibles fósiles gaseosos como el gas natural pueden encontrarse en pozos de petróleo y gas. Aunque suele encontrarse en combinación con otros de su tipo fósil, se diferencia de ellos en algunos aspectos concretos (Speight, 2019).

2.1.3. Fuentes de Energía Renovable

Los recursos renovables son fuentes de energía que tienen un alto índice de regeneración. Entre las fuentes de energía renovables figuran el sol, el viento, undimotriz, mareomotriz, la biomasa y el calor geotérmico (Gorjian, 2017).

Energía Eólica. Las grandes masas de aire que se desplazan por la superficie del globo constituyen el viento, que no es más que su energía cinética. Dependiendo del uso previsto de la turbina eólica, las aspas de la máquina convierten la energía en mecánica o eléctrica (Mathew, 2006).

Energía Solar PV. Se describe como el proceso por el cual un sistema sólido o líquido expuesto a la luz produce una tensión eléctrica entre dos electrodos unidos al sistema (Lotsch et al., 2005).

Energía Solar Térmica. Los sistemas solares térmicos utilizan el calor del sol para generar aire acondicionado o agua caliente. Este procedimiento diferencia la tecnología térmica de la fotovoltaica, que aprovecha directamente la luz solar para producir energía (Holl y DeMeo, 1990).

Hidroenergía. Una central hidroeléctrica produce electricidad extrayendo energía del agua. Cuando el agua cae ladera abajo, se libera la energía potencial que la altura del agua ha almacenado. Una turbina hidráulica es el principal dispositivo utilizado para captarla y utilizarla para generar electricidad (Breeze, 2019).

Energía Geotérmica. La energía térmica producida y almacenada en la Tierra como resultado del gradiente geotérmico provocado por el desnivel de temperatura entre el núcleo y la superficie se conoce como energía geotérmica, cuando el flujo térmico es lo suficientemente elevado, puede extraerse y utilizarse directamente para la producción de electricidad o para otros fines como la calefacción urbana y la agricultura (Archer, 2020).

Bioenergía. Proveniente de residuos de origen animal, incluidos los residuos de la agricultura y la silvicultura, los residuos madereros, los cultivos energéticos y los restos forestales. Las plantas se consideran una fuente de energía renovable de bajas emisiones, ya que almacenan CO₂ atmosférico en materia orgánica mediante el proceso de fotosíntesis. Cuando este material se quema años después, el CO₂ se libera de nuevo al medio ambiente (Röder y Welfle, 2019).

2.1.4. Radiación Solar

Es la difusión de energía electromagnética por medio del espacio, conforme el diccionario de terminología de Almanza (2006) no debería confundirse la irradiancia solar (W/m^2) con la irradiación (Wh/m^2), aun cuando varios autores no diferencian a la radiación y la irradiación. En este trabajo se va a tener en cuenta dicha diferencia en casos específicos que lo requieran, no obstante, el concepto radiación va a ser considerado para generalizar estos términos (Bonhomme, 1993).

La constante solar, que tiene un valor aproximado de $1370 W/m^2$, es la cantidad de energía que la Tierra recibe del Sol en el límite más alto de la atmósfera. Esta energía está constituida por ondas electromagnéticas de diferentes tamaños de onda. La cantidad de radiación solar que llega a la atmósfera es parcialmente absorbida y dispersada, lo que provoca fluctuaciones en la intensidad de la radiación solar en la superficie terrestre en función de las condiciones atmosféricas (Bonhomme, 1993).

La radiación que alcanza la superficie terrestre se divide en 2 maneras; la irradiancia directa que no es modificada por la acción de los elementos atmosféricos y la irradiancia difusa que se dispersa hacia otras zonas del mundo, antes de salir de la atmósfera, o previamente que llegue a la superficie de la tierra. La suma de la irradiancia directa (DNI) y la irradiancia difusa (DHI) se llama irradiancia global (GHI), cuyas longitudes de onda son menores a 3000 nanómetros (nm) (Jaramillo-Robledo, 2005).

2.1.5. Medición del Recurso Solar

Según Badescu (2008), existen dos métodos para obtener datos sobre la radiación solar a nivel del suelo: la medición y la modelización. Para estimar la energía solar, se han desarrollado modelos estadísticos y físicos en respuesta a la falta de conocimientos. Estos

modelos incorporan variables climáticas cambiantes, como la nubosidad, las horas de insolación, la precipitación, la temperatura y otros parámetros (Meizoso-López, 2012). Las fotografías del satélite GOES se utilizan para medir la radiación solar durante toda la fase de modelización. El radiómetro del satélite proporciona los datos utilizados para crear estas imágenes, y calcula la cantidad de radiación solar en cada píxel (Alvarez et al., 2014).

2.1.6. Satélites para medición de radiación solar

Para la generación de información de radiación, actualmente se aplican sistemas bastante avanzados para la toma de datos, principalmente tomados de satélites que permanecen en órbita generando datos de forma continua, esto provee información en tiempo real de las condiciones meteorológicas del planeta (SolarGis, 2021).

La NOAA (2018) emplea los satélites GOES W y GOES E para recopilar datos meteorológicos en toda América. Alaska, Hawái, el Pacífico nororiental, el Pacífico central y oriental, el oeste de Estados Unidos y Alaska están incluidos en la zona de cobertura del GOES W. La región oriental de América del Norte, que incluye el Pacífico nororiental, las Rocosas septentrionales, el valle del Misisipi, los Grandes Lagos, el noroeste, el suroeste del Pacífico, las llanuras meridionales, el valle meridional del Misisipi y el sureste, está bajo la jurisdicción del GOES E. Cabe destacar que Ecuador está incluido en la zona de cobertura del satélite GOES E.

2.1.7. Modelos de Radiación Basados en Satélites

Se han desarrollado modelos con propósito de analizar la radiación solar utilizando datos de satélites. Estos modelos, que se eligen según la disponibilidad de información y recursos, incluyen modelos físicos y semiempíricos.

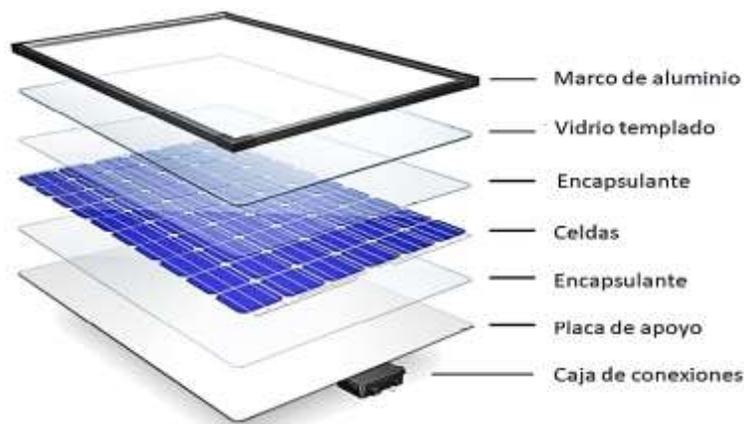
2.1.7.1. **Modelos Físicos.** Poseen el potencial de ser aplicables globalmente, aun cuando necesitan un ajuste cuidadoso en las mediciones de área y cálculos exactos de transferencia radiactiva (Rao et al., 1989). Este modelo explica las radiancias de la Tierra, por medio del brillo visto por el satélite, resolviendo las ecuaciones de transferencia de radiación. Los modelos físicos necesitan información estricta sobre la estructura de la atmósfera y además están sujetas a la calibración rigurosa de los sensores satelitales (Perez et al., 2013).

2.1.7.2. **Modelos Semiempíricos.** Los modelos semiempíricos están diseñados típicamente para detonar los datos registrados por el canal visible de un satélite. El principio subyacente que preside estos modelos es la primordial observación de que el resplandor visible en la Tierra visto por el satélite es aproximadamente proporcional a la opacidad de la nube y al coseno del ángulo cenital solar; por lo tanto, para un ángulo cenital solar dado, el resplandor visible es inversamente proporcional a la GHI en la superficie (Schmetz, 1989). En términos sencillos, cuanto más brillante se observe la Tierra desde la posición ventajosa del satélite en un lugar determinado y para una elevación solar dada, menor es la irradiancia global en la superficie de la Tierra (Perez et al., 2013).

2.1.8. Módulo o Panel Solar

El elemento primordial para cualquier sistema fotovoltaico es el generador (Molina-García et al., 2016). Un panel o módulo solar fotovoltaico (FV) está formado de un grupo de células o celdas, esta se caracteriza por cambiar de manera directa en energía eléctrica los fotones provenientes de la luz solar, a esto se le nombra impacto fotovoltaico. Cabe recalcar que para conectar dos o más módulos fotovoltaicos estos deben ser iguales o similares en sus características eléctricas y mecánicas para un óptimo funcionamiento ya que en un caso contrario y no se pudiera cumplir con este punto, se provocaría el efecto mismatch provocando pérdidas energéticas y futuros accidentes eléctricos.

Figura 1
Estructura de un módulo fotovoltaico



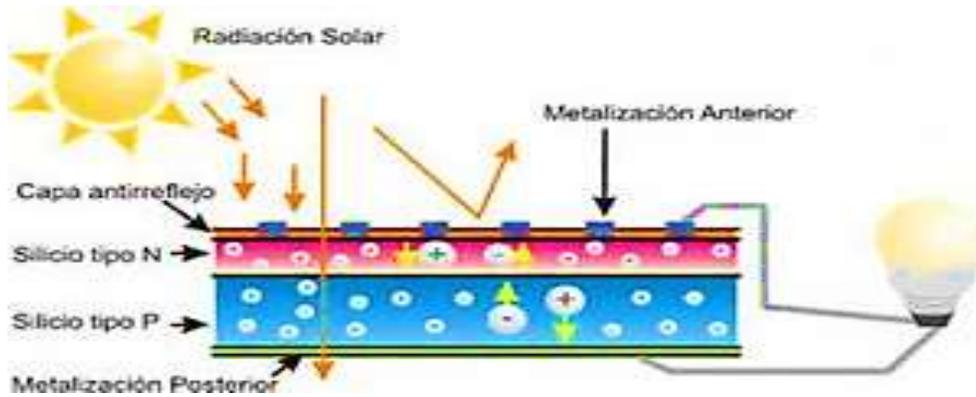
Nota. La imagen representa la construcción de un módulo o panel fotovoltaico. Tomado de NewsSolclima (<https://news.solclima.com/noticias/energia-solar/cuales-son-los-problemas-comunes-en-la-reparacion-de-paneles-solares>)

2.1.9. Efecto Fotovoltaico

Las células fotovoltaicas (FV) basadas en semiconductores, utilizan la radiación solar para producir electricidad. En presencia de calor o a la luz, estos materiales funcionan

como conductores eléctricos; a bajas temperaturas, sin embargo, funcionan como aislantes (Díaz, n.d.). Ciertos electrones de valencia absorben suficiente energía de cualquier aporte energético, ya sea un aumento de la temperatura o la exposición a la luz, para separarse de sus enlaces covalentes y finalmente convertirse en electrones libres (Adler et al., n.d.).

Figura 2
Efecto fotovoltaico



Nota. Explicación básica y concisa del efecto fotovoltaico. Adaptado de Eliseo Sebastián (<https://eliseosebastian.com/efecto-fotovoltaico-en-un-panel-solar/>).

Se utiliza una unión semiconductor de tipo positivo (P) y negativo (N) para separar los electrones y los huecos (Adler et al., n.d.). La figura 2 ilustra cómo se produce la unión PN con dos zonas diferenciadas, una de tipo N y otra de tipo P, al dopar un material semiconductor con impurezas de tipo P en un lado e impurezas de tipo N en el otro (Adler et al., n.d.).

2.1.10. Energía Eólica a Pequeña Escala

La micro generación es el proceso de producción de electricidad a pequeña escala. Estos sistemas no producen más de 100 kW, y sus niveles de potencia son inferiores a los de los sistemas de mayor capacidad conectados a la red (Cárdenas, 2019). En la Tabla 1 se puede encontrar una imagen más clara de las escalas de potencia.

Tabla 1

Potencial eólico a pequeña escala

Tipo	Área de barrido [m²]	Potencia [kW]
Pico	4,9	P<1
Micro	40	1<P<7
Mini	300	P<100

Nota. La tabla muestra los niveles de potencia de energía eólica a pequeña escala.

En la tabla se observa los niveles de potencia de energía eólica en base al área de barrido que se pueda obtener en las diferentes escalas de producción de energía eólica a pequeña escala.

2.1.10.1. **Ley de Betz.** Las leyes de la mecánica de fluidos establecen que el viento es proporcional a los cambios de presión y transporta energía cinética. Los aerogeneradores pueden aprovechar la energía cinética contenida en las corrientes de viento para generar energía (Vidal, 2019). Cualquier masa, ya sea sólida, líquida o gaseosa, tiene energía cinética, que es la energía implicada en el movimiento:

$$E_c = \frac{m * v^2}{2} \quad (1)$$

donde v es la velocidad del movimiento y m es la masa del objeto. Como en este caso la masa es un fluido, concretamente aire, el flujo de esa masa puede representarse mediante la fórmula siguiente:

$$\mathbf{m} = \boldsymbol{\rho} * \mathbf{A} * \mathbf{v} \quad (2)$$

Donde:

$$\rho = \text{densidad del aire } [kg/m^3].$$

$$A = \text{área } [m^2].$$

$$v = \text{velocidad del viento } [m/s].$$

Suponiendo una velocidad constante del viento v y utilizando la derivada temporal de la energía (o trabajo) para representar la potencia, la potencia que se puede obtener del viento se expresa com:

$$P_{viento} = E_C = \frac{m * v^2}{2} = \frac{\rho * A * v^3}{2} \quad (3)$$

Según esta ecuación, la potencia que se puede extraer aumenta tanto con la velocidad del viento como con la superficie por la que éste circula. La potencia aumenta proporcionalmente con el área A , pero la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que hace que la velocidad del viento sea el aspecto más importante para la producción de energía. Por consiguiente, para instalaciones eólicas de cualquier tamaño, es esencial seleccionar emplazamientos donde la velocidad del viento sea alta y constante (Vidal, 2019).

Sin embargo, un rotor eólico no es capaz de recoger totalmente la energía cinética del viento. Si así fuera, no sería posible un flujo continuo, ya que el viento cesaría a su paso por el aerogenerador. En consecuencia, la correlación entre la velocidad del viento que entra y sale del aerogenerador es ideal. En concreto, la velocidad del viento de entrada (v_1) en el rotor debe ser tres veces superior a la de salida (v_2) para optimizar la potencia absorbida (Vidal, 2019).

Teniendo:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3} \quad (4)$$

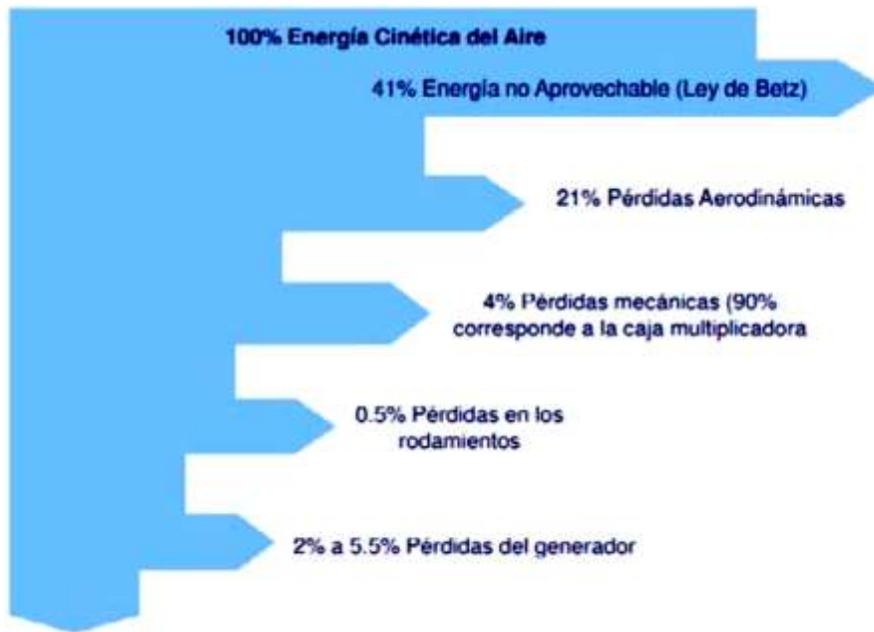
De este modo, la máxima potencia extraíble del viento es:

$$P_{max} = \frac{16}{27} * \frac{\rho * A * v^3}{2} \approx 0.593 * \frac{\rho * A * v^3}{2} = 0.593 * P_{viento} \quad (5)$$

Este término tiene su origen en los cálculos realizados en 1919 por el físico alemán Albert Betz, que condujeron al establecimiento de la Ley de Betz. Esta ley establece que la eficiencia máxima de una turbina eólica, independientemente de su diseño, está limitada al 59,3% óptimo (Vidal, 2019).

Como resultado, las turbinas reales no generarán tanta energía como indica la ley de Betz. El C_p , es un coeficiente que expresa la correlación entre la potencia extraída y la potencia total del fluido, es siempre inferior a 0,59, como ilustra la figura 3 (Lara & Hernández, 2009).

Figura 3
Límite de Betz



Nota. Pérdidas aerodinámicas según el límite de Betz. Adaptado de Lara María y Hernández Manuel (Lara & Hernández, 2009).

2.1.11. Aerogeneradores

Los aerogeneradores son dispositivos que transforman la energía eólica de forma cinética a eléctrica.

2.1.11.1. Tipos de Aerogeneradores.

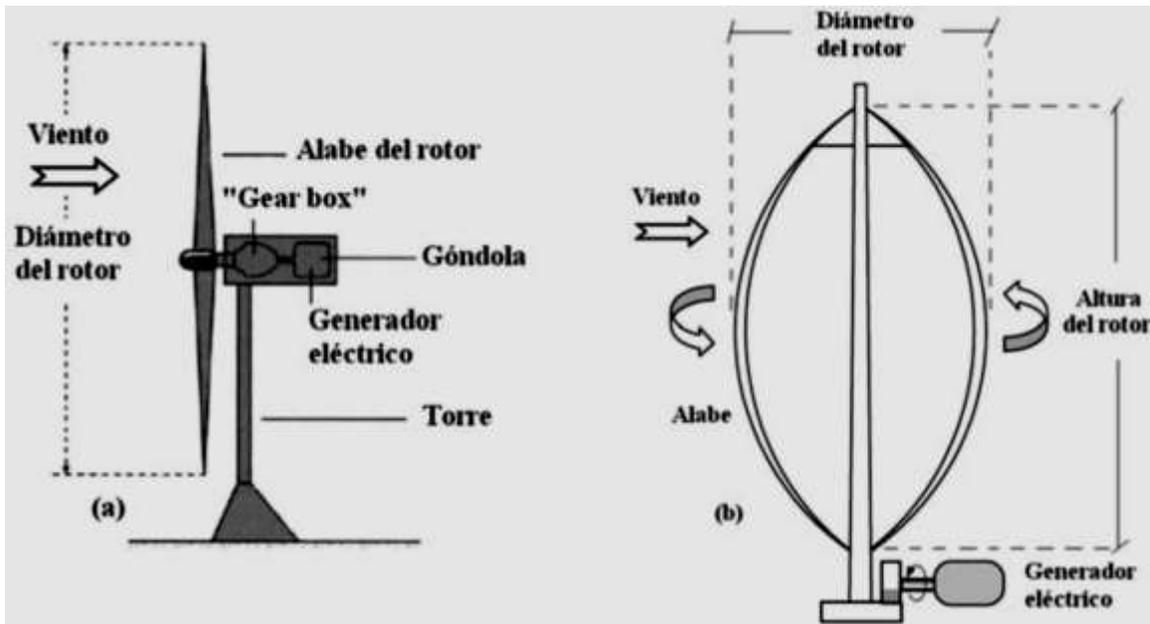
Hay diferentes tipos de aerogeneradores:

- Aerogenerador de eje horizontal: Son las técnicas de captación de viento más sofisticadas y utilizadas para producir energía (Mejia, n.d.). los aerogeneradores con eje de rotor horizontal se conocen como aerogeneradores de eje horizontal. (Salas et al., n.d.).
- Aerogenerador de eje vertical: Carecen de capacidad de autoarranque o de sistemas de orientación del viento (Salas et al., n.d.). Como se muestra en la Figura 4, las

turbinas de eje vertical no requieren un dispositivo de orientación, lo que les permite aprovechar vientos de cualquier dirección y facilita su instalación cerca del suelo (Mejia, n.d.).

Figura 4

- a) Aerogenerador de eje horizontal
- b) Aerogenerador de eje vertical tipo Darrieus

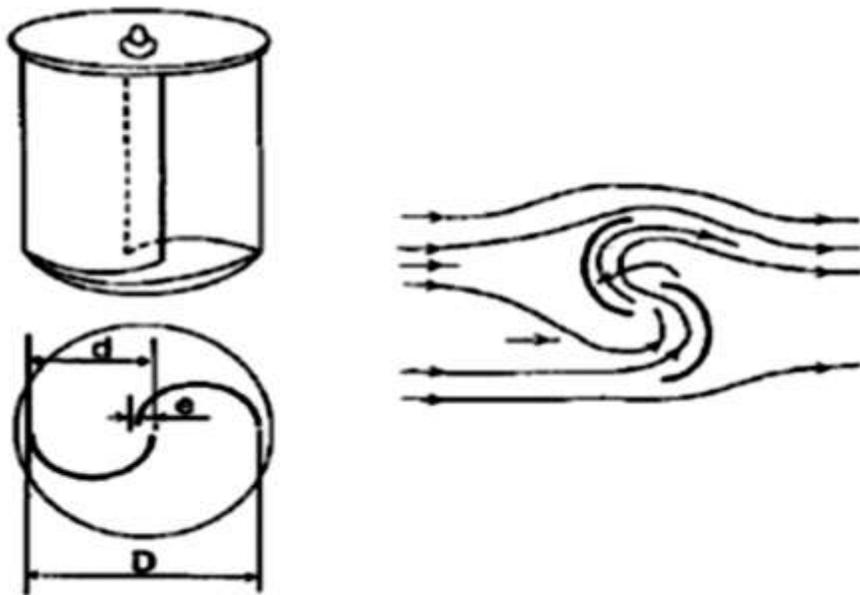


Nota. Ilustración representativa de los tipos de aerogeneradores. Adaptado de Miguel Villarrubia López (Villarrubia, 2013).

En la ilustración se observa a detalle los principales elementos que pueden o no incluir en la construcción tanto de un aerogenerador de eje horizontal como de un aerogenerador de eje vertical. Estos bocetos son un punto de partida para el inicio de un estudio en la construcción, innovación e implementación de tecnologías que puedan aprovechar la energía cinética proveniente del viento.

2.1.11.2. **Eólica de Rotor de Arrastre Diferencial: Rotor Savonius.** Dos semiesferas o semicilindros con ejes separados entre sí constituyen el rotor Savonius. Además de las fuerzas aerodinámicas, el espacio entre los ejes permite la fluctuación del movimiento del fluido que puede aprovecharse facilitando el cambio de dirección del flujo (Villarrubia, 2013).

Figura 5
Perfil aerodinámico de un rotor Savonius



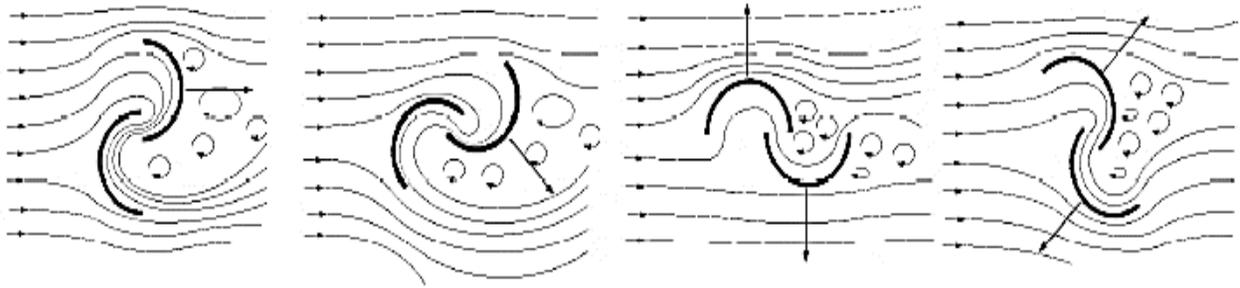
Nota. Representación de la composición, vista superior y funcionalidad de un rotor Savonius. Adaptado de Miguel Villarrubia (Villarrubia, 2013)

2.1.11.3. **Principio de Funcionamiento de un Rotor de Eje Vertical (Savonius).**

La Figura 5 ilustra la secuencia de un giro completo de 360° de un rotor Savonius. En algunos modelos, para facilitar el par de arranque, se montan dos rotores idénticos uno encima del otro, formando dos niveles desplazados entre sí con un ángulo de 90° . Además, hay investigaciones que han probado configuraciones de cuatro rotores dispuestos en cuatro niveles, con desfases de 45° entre ellos (Villarrubia, 2013).

Figura 6

Secuencia de giro de un rotor Savonius



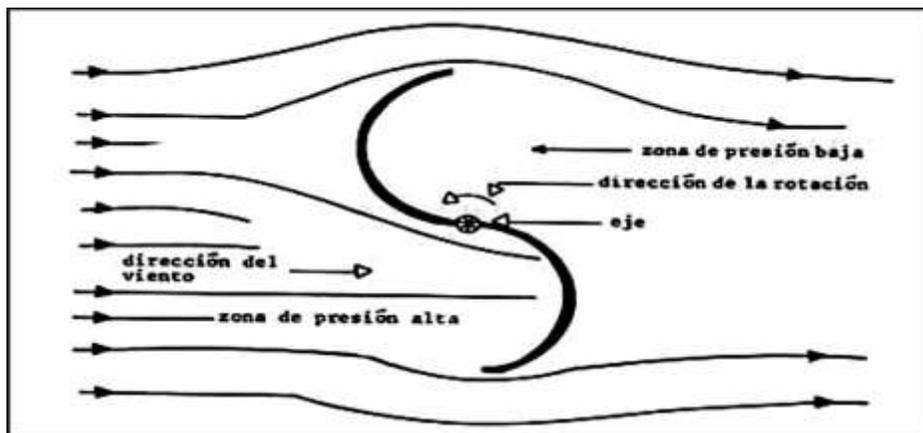
Nota. Fases de giro de un rotor Savonius puesto en marcha. Adaptado de Pedro Fernández (Fernández, 2008).

Para el diseño del aerogenerador de eje vertical tipo savonius, existen las dos categorías de disposiciones siguientes:

- Pasaje del álabe cerrado. Debido a la forma en que las palas están fijadas al eje en la figura 7, se impide la circulación del flujo de aire, lo que da lugar a un vacío debajo de la pala (OLADE, 1981).

Figura 7

Pasaje de álabe cerrado

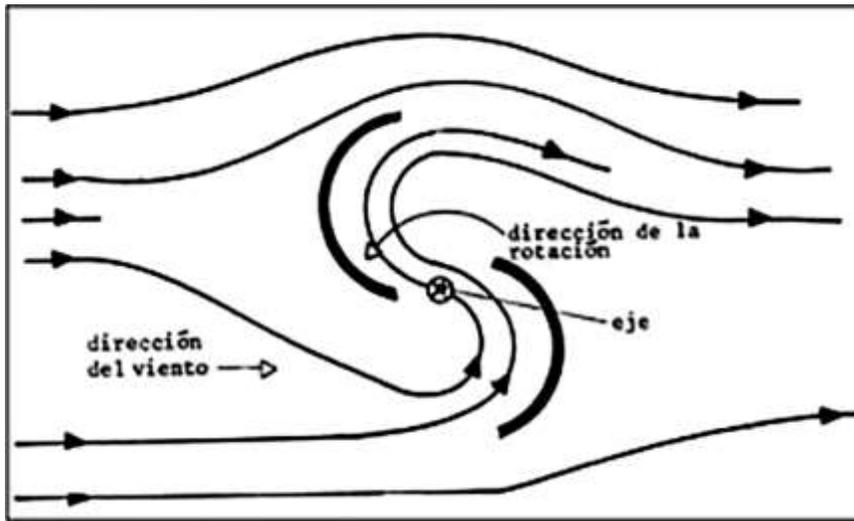


Nota. Dirección del viento de un álabe cerrado. Adaptado de OLADE (OLADE, 1981).

- Pasaje del álabe abierto. Como su separación se representa en la figura 8. Una zona de presión compensa la región de vacío, aumentando el par. Tanto el par aplicado

al eje como la velocidad de rotación pueden controlarse ajustando la abertura de la pala (OLADE, 1981).

Figura 8
Pasaje de álabes abiertos

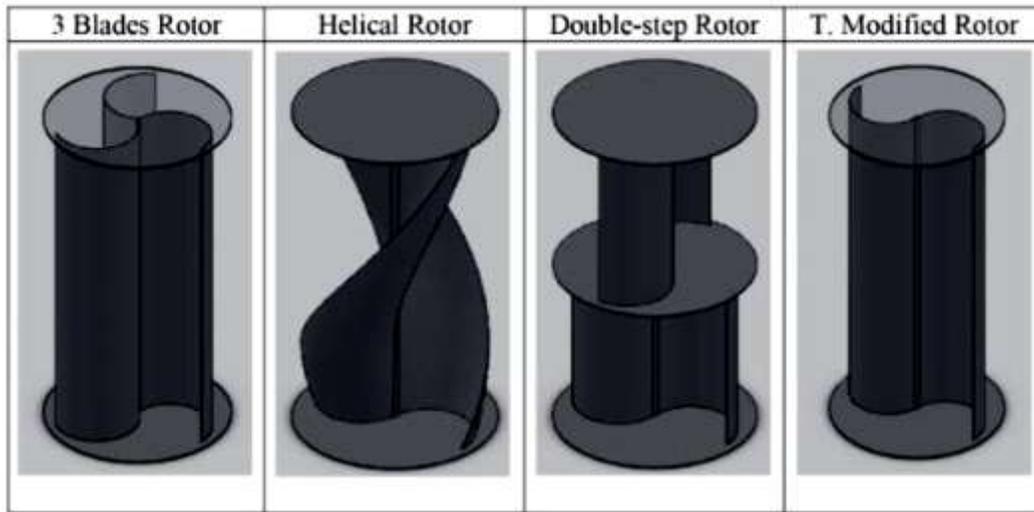


Nota. Dirección del viento en un álabes abiertos. Adaptado de OLADE (OLADE, 1981).

Como se observa en la figura 8, al tener una apertura entre los ejes permitiría una mejor rotura de torque, pero no se aprovecharía todo el recurso eólico debido a la dispersión de las masas de aire. Por otro lado, el realizar una turbina con ejes unidos se aprovecharía todo el recurso eólico aportado por las masas de aire, realizando una mejor rotura de torque en el giro de la turbina.

2.1.11.4. **Diseño de Rotores Savonius.** Para satisfacer ciertos requisitos, la configuración del rotor es esencial, y hay que tener en cuenta variables como el diámetro, la superficie barrida, la cantidad de palas y la velocidad nominal de rotación. Aunque los rotores más ligeros producen mejores resultados, añadir inercia al sistema ayudará a que el rotor siga girando cuando baje la velocidad del viento (Fernández, 2008). Los rotores Savonius son conocidos por su menor eficiencia en comparación con otros tipos de rotores. Estos rotores tienen un rendimiento que oscila entre el 10% y el 30% y se alcanza a determinadas velocidades entre 0,5 y 1. Como no hay un acuerdo claro sobre los valores, estos rangos son amplios y cambiantes. Los rotores Savonius presentan diversas formas, como helicoidales, multipalas, tradicionales de 2 palas, de 3 palas y multipalas con dos o más departamentos de orientación angular variable. Además, el diámetro D , la altura H , la proporción entre ambos y la distancia entre palas e afectan al coeficiente de potencia de estos rotores (Vidal, 2019). A continuación, se indica los diferentes tipos de rotores savonius:

Figura 9
Rotor Savonius



Nota. Diferentes configuraciones de un rotor Savonius. Adaptado de Carlos Vidal (Vidal, 2019).

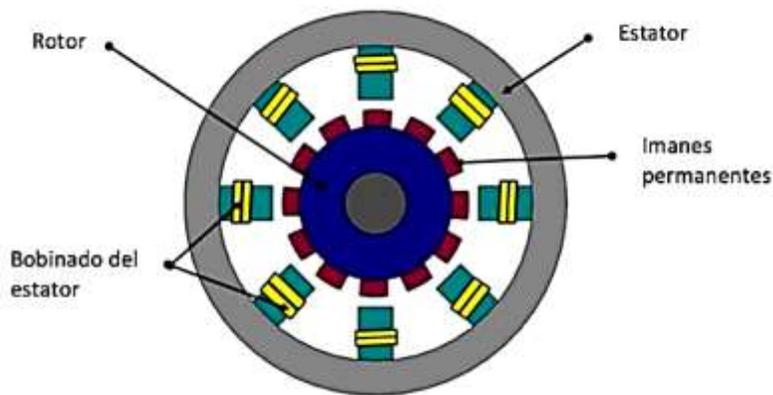
Al diseñar un aerogenerador Savonius se considera la concordancia entre la velocidad del viento y el coeficiente de potencia, incluido el número de etapas y de palas. La configuración que mejor se adapte a las condiciones actuales debe identificarse mediante pruebas. Para obtener un diseño óptimo, en el capítulo 3 se elegirán las configuraciones adecuadas del rotor y las palas (Fernández, 2008).

2.1.12. Generador Eléctrico

El generador eléctrico de corriente alterna y de corriente continua son los dos tipos empleados en los sistemas de aerogeneración. En general, los generadores de corriente alterna son mejores que los de corriente continua porque pueden producir tensiones más altas, requieren menos mantenimiento y tienen mayor disponibilidad. Los generadores se conectan a la red directamente o a través de convertidores de frecuencia, verificando el tipo de turbina y del sistema de control (Yero, 2016).

2.1.12.1. **Generador de Imanes Permanentes.** Se produce un campo de excitación constante utilizando un sistema de imanes permanentes, también conocido como generador de imanes permanentes (PMG), que desempeña el papel de un devanado de excitación del rotor convencional (ver Fig. 10). Este tipo de generador es más compacto que los modelos tradicionales y puede iniciar con bajas velocidades de viento, reduciendo así las pérdidas por conversión (Vesperinas, 2020). El número y el tipo de imanes, las bobinas y las revoluciones afectan a la tensión que produce un generador de imanes permanentes. Su señal de onda, que es similar a una senoide, varía según el estator, la disposición de los imanes y el diseño del rotor (Lastra, 2019).

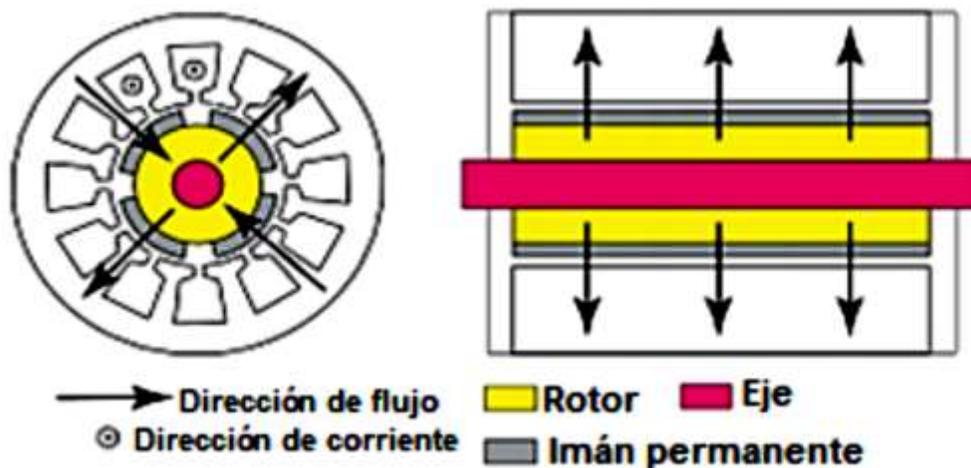
Figura 10
Generador de imanes permanentes



Nota. Demostración simple y concisa de los componentes de un generador de imanes permanentes. Adaptado de Víctor Vesperinas (Vesperinas, 2020).

2.1.12.2. **Generador de Flujo Radial.** Este tipo de generador tiene imanes en los lados o caras de un cilindro que gira sobre su eje propio (Fig. 11). El campo magnético ocasionado por los imanes del rotor es ortogonal al eje de rotación. A la hora de construir este tipo de generadores es fundamental tener en cuenta la construcción del estator, especialmente sus ranuras, el diseño del rotor y la disposición de los imanes (Rodríguez & León, 2016). Este tipo de generadores se los puede implementar en turbinas eólicas de pequeña y mediana escala debido a que para romper el torque se necesitan velocidades de viento superiores a los 8 y 10 m/s respectivamente; de esta manera desarrollando un debido funcionamiento en la generación de energía eléctrica.

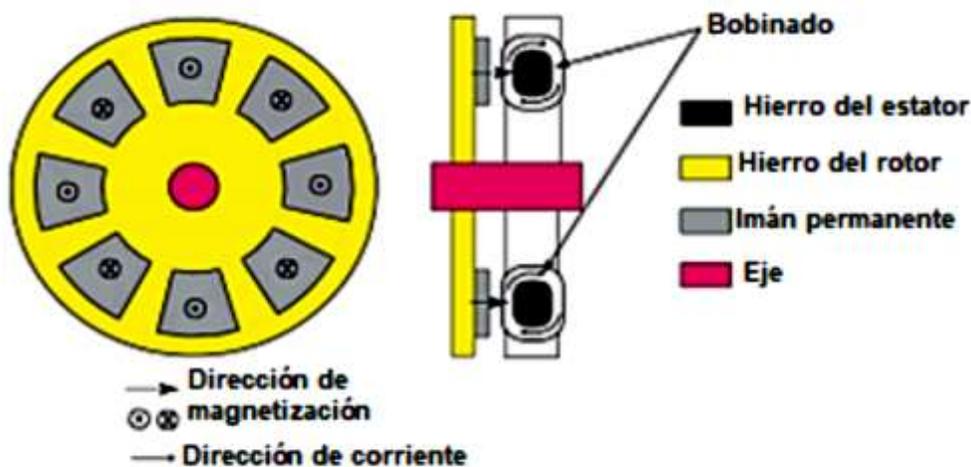
Figura 11
Generador de flujo radial



Nota. Vista frontal y transversal de un generador de flujo radial. Adaptado de Manuel Yanza (Yanza, 2019).

2.1.12.3. **Generador de Flujo Axial.** Según Rodríguez & León (2016), en estos generadores, el eje de rotación es perpendicular a la superficie de un disco de hierro sobre el que se colocan los imanes (véase la Fig. 12). El eje de rotación y el campo magnético producido por los imanes son paralelos. El pequeño tamaño de este generador en comparación con el par que puede producir es una de sus ventajas. Las bobinas del rotor deben ajustarse a la superficie de los polos porque éstos se colocan de forma alterna (N-S) (Lastra, 2019). Este tipo de generadores son ampliamente utilizados en micro turbinas ya sea para uso doméstico o alumbrado público debido a su estructura de construcción y principio de funcionamiento idóneo para funcionar con vientos de entre 2 a 7 m/s.

Figura 12
Generador axial



Nota. Vista frontal y lateral de un generador eléctrico de flujo axial. Adaptado de Manuel Yanza (Yanza, 2019).

Un rotor debe colocarse entre dos estatores o el estator entre dos rotores para obtener la máxima eficiencia. La densidad de flujo magnético aumenta en ambos casos (Yanza, 2019).

2.1.12.3.1. Componentes Principales de un Generador de Flujo Axial.

- Estator

Los devanados del inducido se encuentran en el estator, que es el componente permanente del generador. Se coloca un estator al interior sin ranuras ni núcleo para mejorar la viabilidad económica y la comodidad de manejo. Esto permite reducir el peso y el volumen, además de aumentar la densidad magnética del bobinado (Carrillo-Rosero et al., 2018).

- Rotor

La parte móvil del generador se conoce como rotor, y está montada sobre un eje que atraviesa el centro del estator. Su movimiento genera el campo magnético. Generalmente, el rotor consta de imanes colocados en uno o dos discos de hierro. Para aumentar el flujo magnético, se utilizan dos discos enfrentados, ya que esta configuración puede incrementar la densidad magnética aproximadamente cuatro veces en comparación con un solo disco (Rodríguez & León, 2016).

- Imanes

Los imanes implementados son los imanes de neodimio hechos en base de aleaciones de hierro y boro. Estos imanes son únicos por su fuerte magnetismo, su resistencia a la oxidación y su funcionamiento a altas temperaturas (Lastra, 2019).

- Bobinas

Existen variables y fijas. Las bobinas de aire y las de núcleo sólido (hierro) son ejemplos de bobinas fijas. Las bobinas variables, en cambio, permiten que el desplazamiento del núcleo modifique la inductancia. Cada variedad tiene una composición diferente en función del uso concreto para el que está diseñada (Carrillo-Rosero et al., 2018).

Capítulo III

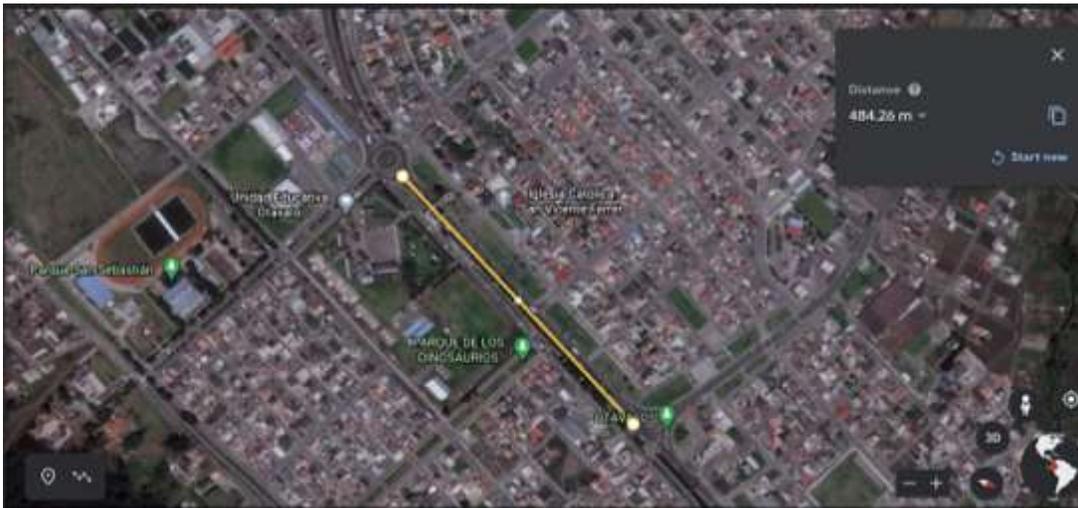
Metodología

En este capítulo, se describen los procedimientos seguidos para alcanzar los objetivos propuestos, junto con información sobre los materiales e instrumentos utilizados en la investigación.

3.1. Área de Estudio

Figura 13

Zona de implementación del proyecto



Nota: Segmentación del sitio de emplazamiento para implementación del prototipo eólico-solar. Elaboración propia.

Se demarca la zona de investigación para la implementación del prototipo eólico-solar con el propósito de entablar puntos estratégicos y posteriormente el punto más idóneo para la instalación del prototipo.

A continuación, se da a conocer las reseñas de información del cantón Otavalo:

Tabla 2*Datos del cantón Otavalo*

Provincia:	Imbabura
Cantón:	Otavalo
Región:	Sierra Norte
Cabecera cantonal:	San Luis de Otavalo
Superficie (Km²):	579 Km ²
Perímetro urbano:	800 hectáreas
Población urbana:	44 536 habitantes
Población rural:	65 925 habitantes
Población total:	110 461 habitantes

Al sureste de la provincia de Imbabura se encuentra el cantón de Otavalo, en el norte de Ecuador. Según los límites revisados establecidos por el Gobierno Municipal de Otavalo, su superficie total asciende a 579 kilómetros cuadrados (GAD OTAVALO, 2020).

Situada a 20 kilómetros de Ibarra y a 110 kilómetros de Quito, Otavalo es una ciudad situada al norte del callejón interandino. Con coordenadas geográficas de 78° 15' 49' de longitud oeste y 0° 13' 43' de latitud norte, se sitúa a 2.565 metros sobre el nivel del mar. En la zona de Selva Alegre, la altitud varía de 1.100 metros a 4.700 metros en el cerro Imbabura. La zona experimenta 14 grados centígrados de media (GAD OTAVALO, 2020).

Los cantones de Cotacachi, Antonio Ante e Ibarra limitan al norte con el cantón de Otavalo; al sur con el cantón de Quito (Pichincha); al este con los cantones de Ibarra y Cayambe (Pichincha); y al oeste con los cantones de Quito y Cotacachi (GAD OTAVALO, 2020).

3.2. Métodos

3.2.1. Evaluación del potencial energético del punto de estudio (desvío a Selva Alegre y redondel del colegio Otavalo)

Mediante lineamientos para la identificación y caracterización de las zonas aptas para la implementación del sistema híbrido eólico-solar. Se plantea un proceso selectivo para identificar las áreas, primero, no aptas por restricciones atmosféricas, socioculturales y ambientales y luego las aptas sin restricciones para la implementación de dicho sistema (Letcher, 2017).

3.2.1.1. Uso del software Google Earth y Meteoblue. Mediante el uso del software Google Earth se determina aspectos importantes como: mayor concurrencia de vehículos, isoyetas e isotermas del trayecto de la panamericana con énfasis de realizar una base de datos, y a continuación, realizar un análisis multicriterio que evalué todas las características antes mencionadas con el objetivo de determinar la zona óptima de implementación del sistema. A esto, se debe tomar en cuenta los entes gubernamentales a las que pertenece o están concienciadas dichas zonas como pueden ser GAD's Parroquiales, GAD's Municipales, Prefecturas o Ministerios con el fin de obtener los permisos necesarios y efectuar la instalación del proyecto.

3.2.1.2. **Corroboración de datos.** Al adquirir los datos proporcionados por METEOBLUE, se procede a realizar una corroboración de datos mediante bases de datos históricas proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INHAMI), específicamente, la estación M0105 con el objetivo de corroborar la base de datos proporcionada por la institución antes mencionada ya que es de vital importancia para la implementación del prototipo eólico solar.

Tabla 3
Condiciones Ambientales

Altitud sobre el nivel del mar	2 532 msnm
Velocidad promedio del viento	2.19 m/s
Temperatura ambiente	14.4 °C
Presión atmosférica	101 690 Pa
densidad del aire	0.909 kg/m ³

Nota. Datos meteorológicos del punto de emplazamiento del TIC.

En la tabla se resumen los datos meteorológicos más importantes para llevar a cabo los cálculos y desarrollo de la investigación, dichos datos son indicadores fundamentales para la elección y construcción de la turbina de eje vertical.

3.2.2. Construir el sistema piloto eólico-solar para el alumbrado público

Para la construcción del sistema piloto eólico-solar, se establece que la turbina eólica sea de eje vertical (tipo Savonius), se realiza el proceso de ingeniería inversa (reverse engineering, por su libre traducción en inglés), el cual, según (Borja, 1997) define como

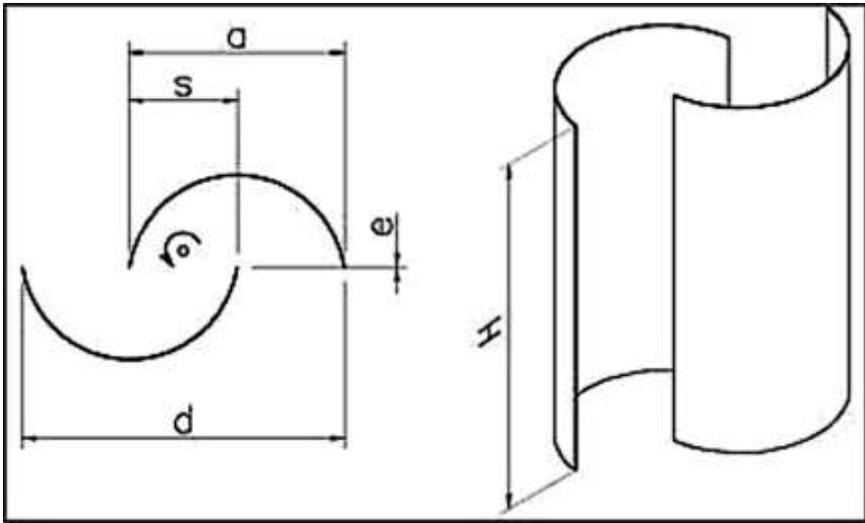
“La ingeniería inversa es el proceso de crear un sustituto que reemplace de manera aceptable un producto o componente existente. Este enfoque se basa en el análisis detallado del producto original, especialmente cuando el diseño o la documentación del mismo no están disponibles. La ingeniería inversa se considera un tipo específico de rediseño”. De esta manera se acata disposiciones impuestas previamente estudiadas, analizadas y discutidas por el autor, director y asesor de tesis con el propósito de construir un prototipo viable en costo-beneficio el mismo que es evaluado al final de su construcción.

Una vez construida la parte eólica, el modelado de cada una de sus partes se las realiza de manera representativa en el software INVENTOR y ADOBE ILLUSTRATOR. Por otro lado, se dimensiona el sistema fotovoltaico y demás componentes como regulador eólico, regulador solar, generador eléctrico, bobinas, banco de baterías y luminaria (Ricci et al., 2016).

3.2.2.1. Condiciones internas. El sistema de accionamiento, la estructura de soporte, el diseño del rotor, el eje del rotor y los componentes normalizados son factores importantes que hay que tener en cuenta. También es crucial garantizar que el mantenimiento y el reemplazo de componentes sean fáciles, utilizando materiales que sean livianos, duraderos y económicos.

3.2.2.2. **Parámetros geométricos de las aspas.** En los parámetros geométricos del rotor Savonius para el diseño visto en la figura 14 se incluyen varios factores de dimensionamiento. Estas variables son esenciales para el cálculo y el dimensionamiento ideal a la hora de crear un aerogenerador tipo Savonius.

Figura 14
Rotor Savonius



Nota: Parámetros geométricos para el diseño de un rotor savonius. Adaptado de (Defaz & Pallasco, 2017).

Comprendiendo que:

s= Traslape.

d= La separación, o diámetro, entre los extremos de una pala.

a= La anchura de cada pala.

e= La separación en longitud de la pala.

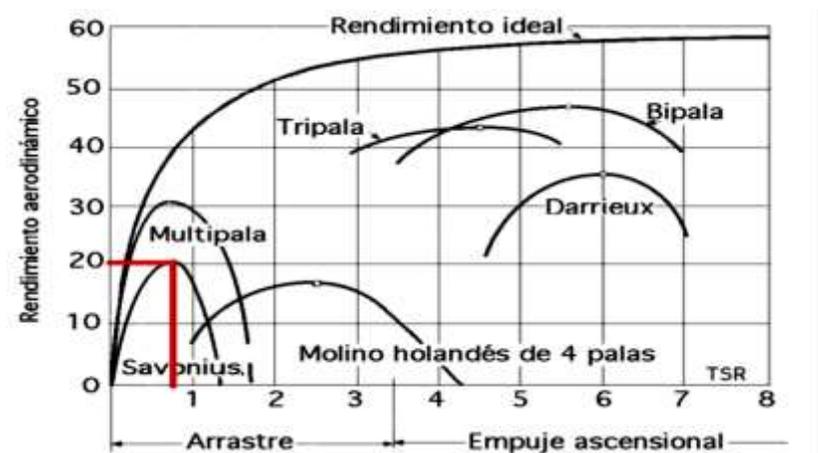
H= Longitud o altura de la pala.

Para calcular los parámetros geométricos del rotor eólico hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- El intervalo de la relación s/d es de 0,15 a 0,1.
- Relación $(s/a) = 1/6$
- Relación $(H/d) = 2$
- “e” debe ser igual a 0.
- En la mayoría de los casos, los extremos del rotor deben ser cubiertos.
- Las palas y su curvatura deben ser iguales (Rodríguez, 1985).

3.2.2.3. Coeficiente de potencia. El coeficiente de potencia (C_p), en el que influye sobre todo la forma de las palas del rotor, determina la potencia total extraída por el aerogenerador. El valor de C_p está limitado por la ley de Betz. Para un rotor Savonius, el C_p aproximado es de 0,20 y la relación de velocidad de la punta (TSR) es de alrededor de 0,8, según las curvas mostradas en la figura 15 (Fernández, 2008).

Figura 15
Coeficiente de potencia C_p según límite de Betz

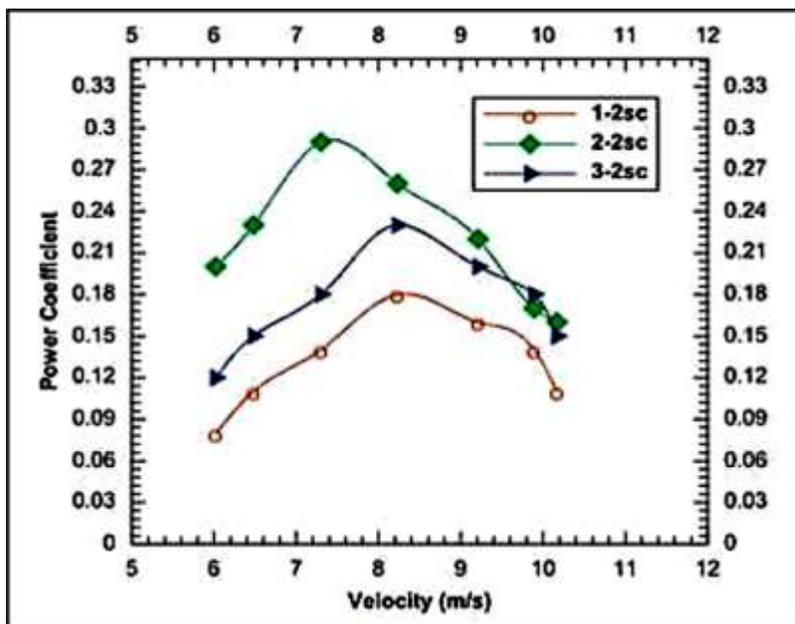


Nota: Curva característica del C_p vs TSR. Adaptado de (Fernández, 2008).

Teóricamente, no existe bibliografía que relacione directamente las propiedades únicas del rotor Savonius con el coeficiente de potencia. Sin embargo, se han creado curvas experimentales que ilustran la relación entre el coeficiente de potencia y la velocidad de las puntas de las palas. Se ha observado que el coeficiente de potencia de un rotor Savonius puede tener un valor máximo de $C_p = 0,33$ (Defaz & Pallasco, 2017).

3.2.2.4. **Número de álabes y módulos.** Diversos estudios y experimentos sobre los rotores Savonius han demostrado que un aumento en el número de álabes tiende a reducir el coeficiente de potencia (C_p).

Figura 16
Curvas coeficiente de potencia

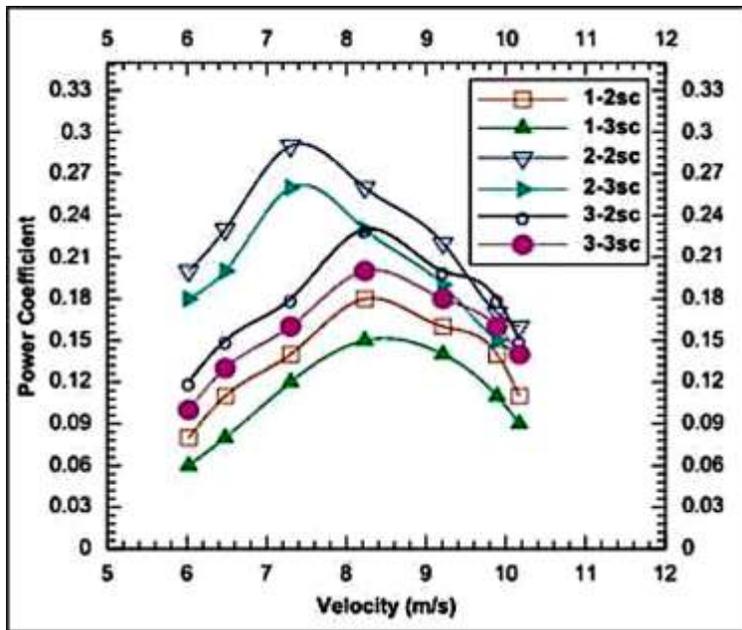


Nota: Curvas de C_p según número de álabes. Adaptado de (Ujjwal & Damodar, 2008).

Las investigaciones indican que un rotor con dos palas tiene un coeficiente de potencia máxima (C_p) entre un 30% y un 50% superior al de un rotor con tres palas, como ilustra la figura 16. Para maximizar C_p , se prefiere el diseño de dos álabes. No obstante,

este diseño presenta una mayor variabilidad en el par. Para mitigar esta desventaja, se recomienda utilizar dos pisos, cada uno con dos palas desfasados 90° uno de otro, como se ilustra en la Figura 17 (Ujjwal & Damodar, 2008).

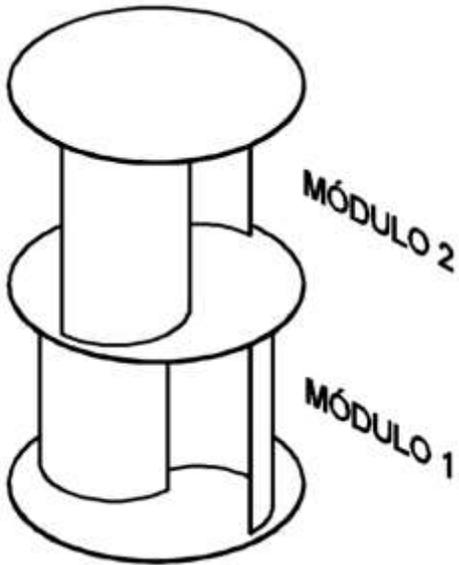
Figura 17
Curva coeficiente de potencia



Nota: Curvas de Cp según el número de módulos o pisos. Adaptado de (Ujjwal & Damodar, 2008).

La figura 18 ilustra la configuración del prototipo de aerogenerador que se proyectará y construirá. Consta de dos módulos, cada uno con dos palas. Este prototipo es el resultado del análisis de distintas formas de construcción de una turbina savonius en los cuales se priorizó el modelo con un mejor coeficiente de potencia y aprovechamiento del recurso eólico del lugar de emplazamiento.

Figura 18
Turbina Savonius de dos módulos



Nota: Rotor Savonius de dos módulos y dos álabes. Adaptado de (Defaz & Pallasco, 2017).

3.2.2.5. Parámetros de diseño turbina Savonius. Para la elección del modelo y diseño ideal de rotor eólico, los rasgos primarios se apoyan en las dimensiones de su conducta aerodinámicas y geométricas para su elaboración y construcción. Esto es seleccionado de bibliografía e investigaciones anteriormente realizadas y desarrolladas para este tipo de aerogenerador.

3.2.2.6. Potencia nominal del viento. La mayor potencia que un aerogenerador es capaz de producir, teniendo en cuenta todas las pérdidas de energía del sistema, incluidas las del rotor, el generador y la transmisión, se conoce como potencia nominal. Esta potencia se expresa mediante la ecuación 6 (Carta, 2012).

$$P_n = \frac{1}{2} * \rho * A * (V_n)^3 \quad (6)$$

Donde:

P_n = Potencia nominal [W].

A = Área barrida por el rotor [m^2].

V_n = Velocidad nominal del viento [m/s].

ρ = Densidad del aire [Kg/m^3].

La ecuación 7 se utiliza para calcular la potencia máxima extraída por un aerogenerador teniendo en cuenta el coeficiente de potencia (Carta, 2012).

$$P_{max} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * (V_n)^3 \quad (7)$$

Donde:

P_{max} = Potencia máxima extraída [W].

A = Área barrida por el rotor [m^2].

V_n = Velocidad nominal del viento [m/s].

ρ = Densidad del aire [Kg/m^3].

C_p = Coeficiente de potencia.

3.2.2.6.1. Potencia total extraída. La potencia que un aerogenerador puede obtener al convertir la energía cinética en electricidad dependerá de la velocidad del viento en el emplazamiento. La ecuación 8 determina así la potencia total extraída (Carta, 2012).

$$P_e = \eta_m * \eta_e * C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * (V_n)^3 \quad (8)$$

Donde:

$\eta_m =$ Eficiencia mecánica [adimensional]

$\eta_e =$ Eficiencia eléctrica [adimensional]

$A =$ Área barrida por el rotor [m^2].

$V_n =$ Velocidad nominal del viento [m/s].

$\rho =$ Densidad del aire [Kg/m^3].

$C_p =$ Coeficiente de potencia [adimensional].

3.2.2.7. Cálculo de la potencia total extraída. Para alimentar una batería de 12 V, primero tenemos en cuenta toda la energía eólica que el aerogenerador podrá cosechar para este estudio. En el anexo 1 se describen detalladamente las características de la batería. Con la capacidad de 4,5 Amperios-hora de la batería elegida a 20 horas, se obtiene una corriente calculada de 0,23 Amperios. La ecuación 9 se utiliza para determinar cuánta potencia debe producir el aerogenerador.

$$P = V * I \quad (9)$$

Donde:

P = Potencia que debe suministrar el aerogenerador [W].

V = Tensión bancada de baterías [V].

I = Intensidad de corriente [A].

3.2.2.8. Dimensionamiento del rotor. La velocidad nominal y la potencia total que producirá el aerogenerador se utilizan para determinar el tamaño del rotor. La ecuación 6 se utiliza para empezar la formulación, teniendo en cuenta los parámetros de entrada. La ecuación 10 se aplica utilizando la Ley de Betz, que afirma que una máquina no puede extraer toda su potencia del viento (Carta, 2012).

$$P_{aerogenerador} = C_p * P_v \quad (10)$$

Donde:

C_p = Coeficiente de potencia [adimensional].

P_v = Potencia del viento [kW].

La ecuación 11 se obtiene sustituyendo la ecuación 6 en la ecuación 10:

$$P_{aerogenerador} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * (V_n)^3 \quad (11)$$

Donde:

A = Área barrida por el rotor [m^2].

V_n = Velocidad nominal del viento [m/s].

ρ = Densidad del aire [Kg/m^3].

C_p = Coeficiente de potencia [adimensional].

La potencia final del aerogenerador está condicionada por el rendimiento mecánico y eléctrico del sistema. La fórmula para calcular la potencia eléctrica se expresa mediante la ecuación 12.

$$P_{el\acute{e}ctrica} = P_{aerogenerador} * \eta_m * \eta_e \quad (12)$$

Donde:

$P_{aerogenerador}$ = Potencia eléctrica [W].

η_m = Eficiencia mecánica[adimensional].

η_e = Eficiencia eléctrica[adimensional].

La ecuación 13 se obtiene sustituyendo la ecuación 11 en la ecuación 12.

$$P_{el\acute{e}ctrica} = C_p * \frac{1}{2} * \rho * A * (V_n)^3 * \eta_m * \eta_e \quad (13)$$

Donde:

A = Área barrida por el rotor [m^2].

V_n = Velocidad nominal del viento[m/s].

ρ = Densidad del aire [Kg/m^3].

C_p = Coeficiente de potencia.

η_m = Eficiencia mecánica[adimensional]

η_e = Eficiencia eléctrica[adimensional]

La ecuación 14 determina el área aproximada para obtener la potencia dada después de deducir A de la ecuación 13.

$$A = \frac{2 * P_{el\acute{e}ctrica}}{\eta_m * \eta_e * C_p * \rho * V^3} \quad (14)$$

Donde:

$A = \text{Área barrida por el rotor [m}^2\text{]}.$

$V_n = \text{Velocidad nominal del viento [m/s]}.$

$\rho = \text{Densidad del aire [Kg/m}^3\text{]}.$

$C_p = \text{Coeficiente de potencia}.$

$\eta_m = \text{Eficiencia mecánica [adimensional]}.$

$\eta_e = \text{Eficiencia eléctrica [adimensional]}.$

$P_e = \text{Potencia eléctrica [W]}.$

3.2.2.9. Cálculo de las dimensiones del rotor. A la hora de determinar las dimensiones del rotor hay que tener en cuenta, la eficiencia eléctrica y mecánica y el coeficiente de potencia del aerogenerador, entre otros factores. A continuación, se utiliza la ecuación 15 para obtener el rendimiento mecánico.

$$\eta_m = \eta_{rod} * \eta_t \quad (15)$$

Donde:

$\eta_m = \text{Eficiencia mecánica [adimensional]}.$

$\eta_{rod} = \text{Eficiencia mecánica de los rodamientos [adimensional]}.$

$\eta_t = \text{Eficiencia de transmisión del generador [adimensional]}.$

Mediante la ecuación 16 se calcula la eficiencia eléctrica.

$$\eta_e = \eta_{gen} * \eta_{con} \quad (16)$$

Donde:

$\eta_e = \text{Eficiencia eléctrica [adimensional]}.$

η_{gen} = eficiencia eléctrica del generador [adimensional].

η_{con} = eficiencia del controlador [adimensional].

3.2.2.10. **Área de barrido.** El tamaño del rotor, la longitud de las palas y el diámetro total influyen. Para un rotor de eje vertical, esta área es rectangular, y la ecuación 17 puede utilizarse para calcularla (Adhikary et al., 2014).

$$A = d * H \quad (17)$$

Donde:

A = Área de barrido [m^2].

d = diámetro rotor [m].

H = Altura del álabe [m].

3.2.2.11. **Velocidad de punta del álabe.** La velocidad específica es otro nombre para la Relación de Velocidad de Punta (TSR), que conecta la velocidad del viento y la velocidad tangencial de la pala. Para calcularla se utiliza la ecuación 18 (Carta, 2012).

$$TSR = \frac{w * r}{v} \quad (18)$$

Donde:

TSR = Relación de velocidad en la punta [adimensional].

r = Radio del rotor [m].

3.2.2.12. **Cálculo de la velocidad angular.** Despejando w , se obtiene:

$$w = \frac{TSR * v}{r}$$

La ecuación 19 se utiliza para calcular la velocidad del rotor (Carta, 2012).

$$n = \frac{60 * w}{2 * \pi} \quad (19)$$

Donde:

n = Número de revoluciones.

w = Velocidad angula [rad/s].

3.2.2.13. **Torque.** La ecuación 20 describe el par que se produce en el eje del rotor como resultado de que el viento obliga a las palas del rotor a girar, convirtiendo la energía mecánica en eléctrica.

$$T = \frac{P}{w} \quad (20)$$

Donde:

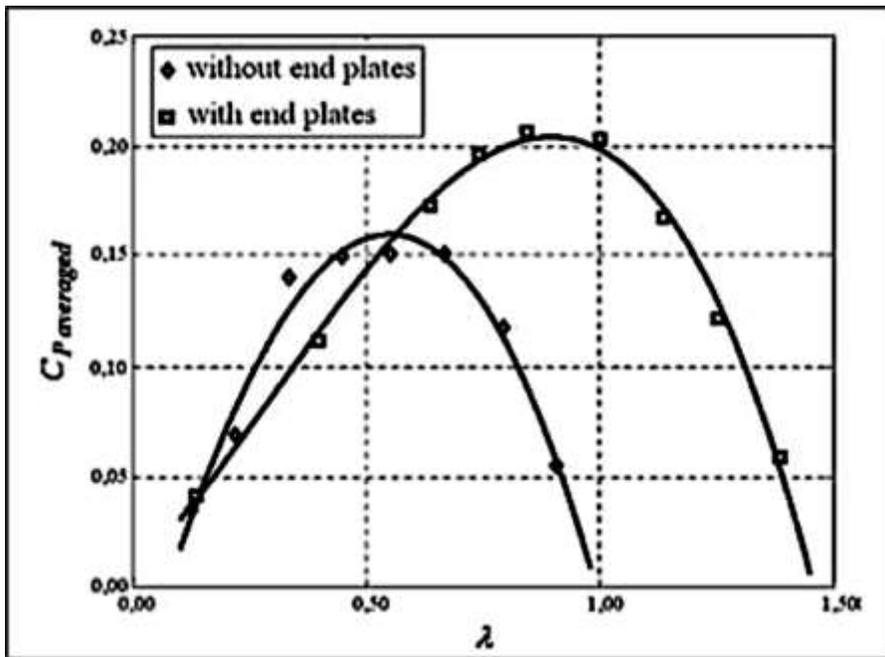
T = Torque [Nm]

P = Potencia [W].

w = Velocidad angula [rad/s].

3.2.2.14. **Diseño de tapas.** La adición de tapas en los extremos del rotor, como se muestra en la figura 19, aumenta el valor medio del coeficiente de potencia y mejora la eficiencia operativa del aerogenerador, medida por el TSR. La presión entre los lados convexo y cóncavo de las palas se mantiene gracias a estas tapas de los extremos, que impiden que el aire escape del lado cóncavo hacia el exterior (Akwa et al., 2012). Es crucial poner atención a los criterios geométricos indicados en la figura 20 al diseñar las cubiertas. La inercia del rotor puede aumentar si las tapas tienen un diámetro excesivo. Por tanto, se aconseja que el grosor de las tapas sea mínimo en relación con la longitud del aerogenerador. (Akwa et al., 2012).

Figura 19
Efecto de las tapas sobre el rendimiento

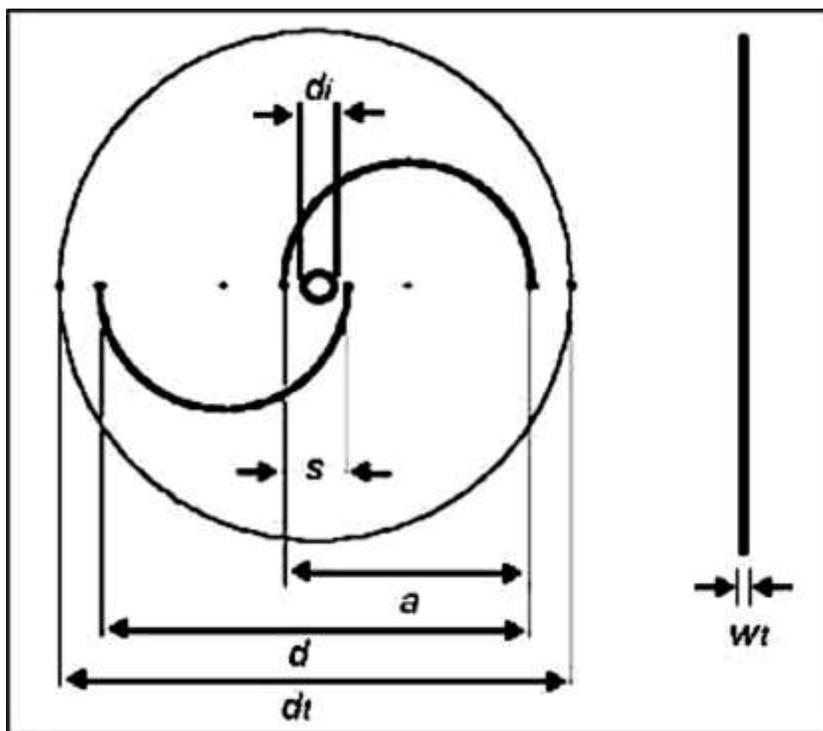


Nota. Rendimiento rotor Savonius con tapas y sin tapas. Adaptado de (Ushiyama et al., 1986).

Como se ilustra en la figura 19, al incluir tapas a los extremos de la turbina eólica savonius podemos obtener un mayor coeficiente de potencia aprovechando de mejor manera el recurso eólico, evitando en la mayoría de veces, dispersiones de las ráfagas del viento en la turbina.

Para este caso de estudio se decidió implementar 3 tapas las cuales van a estar ubicadas en el extremo superior, en intersección de los dos pisos y en el extremo inferior, de esta manera procurando una rigidez con la sujeción de los alabes y el debido funcionamiento de la turbina en general.

Figura 20
Esquema general de tapas del rotor



Nota. Parámetros geométricos de la turbina Savonius. Adaptado de (Akwa et al., 2012).

Donde:

d_t = Diámetro de la tapa [m].

W_t = Espesor de la tapa [m].

3.2.2.15. Cálculo de las dimensiones de las tapas

La correlación entre el diámetro de las tapas d_t y el diámetro del rotor d se establece en la ecuación 21. Un diámetro de las tapas aproximadamente un 10% mayor que el diámetro del rotor contribuye a obtener un valor más alto del coeficiente de potencia (Menet, 2004).

$$d_t = (1.1) * d \quad (21)$$

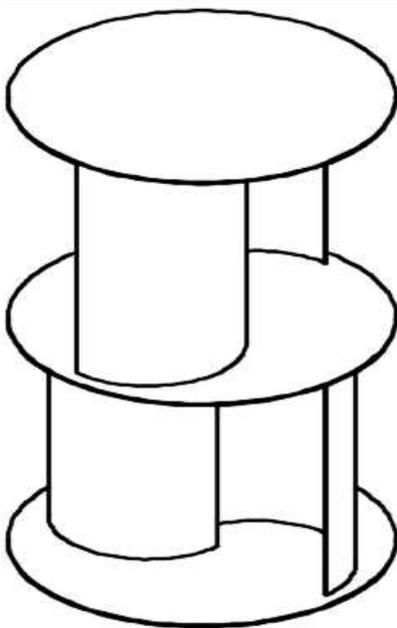
Donde:

d_t = Diámetro de las tapas [m].

d = Diámetro del rotor [m].

Figura 21

Ubicación de las tapas en el aerogenerador Savonius



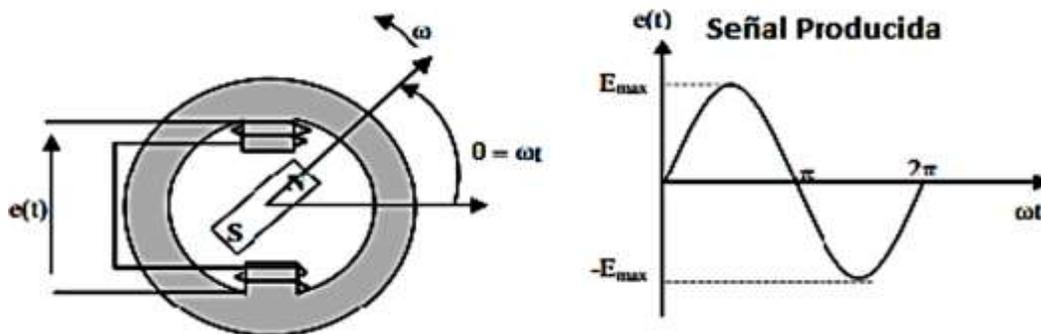
Nota: Boceto de ubicación de tapas en el rotor savonius.

Boceto de la idea y elección final de la turbina a calcular, desarrollar e implementar en la presente investigación, una turbina savonius de dos pisos con álabes desfasados 90° en cada piso.

3.2.2.16. Parámetros de diseño del generador de flujo axial. Tanto las particularidades del aerogenerador como el recurso eólico disponible se tienen en cuenta a la hora de calcular la velocidad de funcionamiento del generador y el número de polos necesarios. Los detalles importantes sobre la disposición eléctrica y las propiedades de funcionamiento del generador de flujo axial se describen utilizando las ecuaciones examinadas anteriormente.

3.2.2.17. Aspectos eléctricos del generador axial. Los imanes permanentes del rotor o estator del generador de flujo axial producen un campo magnético constante. Esta señal magnética interacciona con el devanado del generador para proporcionar un flujo magnético variable en el tiempo, como se ve en la Figura 28. (Herrera et al., 2013).

Figura 22
Generación del generador de flujo axial

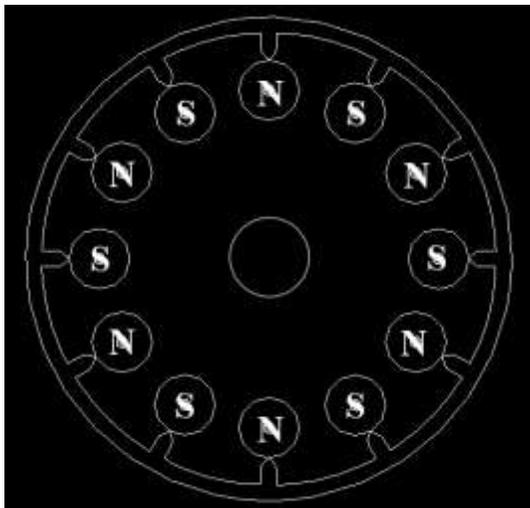


Nota. Representación de la generación y señal de generación de un generador axial. Adaptado de Luis Vargas (Vargas, 2007).

El imán gira a una determinada velocidad angular, como se ve en la figura 22. El flujo magnético fluctúa entre un valor máximo y un valor mínimo a medida que gira. La máxima tensión en los terminales del bobinado se produce cuando el imán está en la posición que genera el mayor flujo, mientras que la tensión disminuye a medida que el flujo cambia. Este fenómeno da lugar a una señal sinusoidal que varía con el tiempo (Vargas, 2007).

3.2.2.18. Configuración geométrica del generador. Para el diseño de estos generadores se ofrecen diversas variantes de configuración, como un rotor y dos estatores, un estator y un rotor, o un rotor y un estator (Lastra, 2019). Dado que es una de las disposiciones más populares y sencillas, en este caso se ha tenido en cuenta la primera configuración. La disposición de los polos del rotor se representa en la figura 23.

Figura 23
Configuración de imanes en el rotor



Nota. Distribución de imanes en el rotor.

Los imanes del generador de flujo axial tienen que ser permanentes, estar orientados perpendicularmente al eje y distribuidos simétricamente sobre los discos del rotor, con sus polaridades alternadas N-S, N-S, N-S, N-S. Cada juego de imanes está pensado para funcionar con una sola bobina o un conjunto de bobinas.

Para la presente investigación, se optó por utilizar 12 bobinas de contactores fabricadas por la marca CHINT, sus especificaciones en la tabla 4.

Tabla 4
Especificaciones bobinas en el estator

Marca	CHINT
Calibre del conductor	AWG 28
Voltaje	12, 24, 110 V
Intensidad	18 A
Frecuencia	60 Hz
Número de devanados por bobina	1 050 espiras

Nota. Principales características de las bobinas utilizadas. Fuente: CHINT

La utilización de bobinas a partir de contactores de la marca CHINT es en procura de desarrollar la ingeniería inversa en la presente investigación, de este modo la utilización de este tipo de bobinas son un indicador para futuras investigaciones en optar por el uso de este tipo de artefactos eléctricos con características similares a las seleccionadas en este apartado.

La ecuación 22 ilustra cómo la cantidad de bobinas y pares de polos de un generador monofásico son iguales. Las bobinas se conectan en serie para totalizar las tensiones. Por otro lado, en la ecuación 23, el número de bobinas y su conexión en un generador trifásico debe atenderse al principio de tres bobinas por cada cuatro pares de polos (Carrillo-Rosero et al., 2018).

$$N_B = N_P \quad (22)$$

$$N_P = \frac{3}{4} N_P \quad (23)$$

Donde:

N_B = Número de bobinas.

N_P = Número de pares de polos.

3.2.2.19. Análisis de las características de los imanes permanentes. Dado que

sin su presencia no habría una señal magnética que interactuara con el devanado del estator, se los considera el componente principal para la generación. Su proceso de producción y la sustancia de la que están hechos afectan la energía magnética que generan y, en consecuencia, el voltaje y la potencia producidos (Herrera et al., 2013). Para todo el análisis se utilizaron imanes de neodimio con un orificio avellanado. En la Tabla 5 se muestran sus especificaciones.

Tabla 5
Características imán Neodimio

CARACTERÍSTICA	VALOR
Dimensiones	25x3x5 mm
Magnetización	Axial

CARACTERÍSTICA	VALOR
Grado	Neodimio N50
Peso	40 g
Temperatura	80 °C
Fuerza coercitiva (Br)	4 500 Gauss
Remanencia Br (T)	0.45

Nota. Resumen de las principales características de los imanes utilizados. Fuente: Autor.

La utilización de este tipo de imanes es su alto grado de magnetización y los más idóneos para la elaboración de estas máquinas eléctricas, para la presente investigación de utilizan 12 imanes tipo aro de dimensiones 25x3x5 mm.

3.2.2.20. Estimación de la densidad de flujo magnético. Otras propiedades del generador se estiman calculando la densidad magnética, incluidas las características del devanado y la cantidad de energía que puede producir. Para su estimación se utiliza la ecuación 24, que es relevante para los imanes de tipo anillo magnético (Camacho & Sosa, 2013).

$$B = \frac{B_r}{2} \left[\frac{D+z}{\sqrt{R_a^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_a^2 + z^2}} - \left(\frac{D+z}{\sqrt{R_i^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_i^2 + z^2}} \right) \right] \quad (24)$$

Donde:

Br = Campo remanente, independientemente de la geometría del imán (véase datos físicos de los imanes)

z = distancia sobre el eje de simetría de una superficie polar

D = espesor (o alto) del cilindro

Ra = radio externo del aro

Ri = radio interno del aro

3.2.2.21. Análisis de la velocidad de operación del generador axial.

La velocidad de rotación del rotor es un componente esencial de un generador eléctrico de flujo axial; debe estar en línea con la velocidad del viento y la forma de las palas (Wannakarn et al., 2011). La ecuación 25, que tiene en cuenta otros parámetros relacionados con las turbinas eólicas, se utiliza para determinar esta velocidad (Pico, 2018).

$$\lambda = \frac{(w * r)}{v} \quad (25)$$

Donde:

λ = Relación de velocidad punta [TRD].

w = Velocidad angular [rad/s].

v = Velocidad del viento [m/s].

r = Radio de las palas del aerogenerador [m].

La ecuación 26, en la que N se da en rpm, se utiliza para convertir la velocidad angular de radianes por segundo (rad/s) a revoluciones por minuto (rpm). (Vargas, 2007).

$$N = \frac{30}{\pi} * w \quad (26)$$

Donde:

w = Velocidad angular medida en (rad/s).

N = Revoluciones por minuto.

Al reemplazar la ecuación 25 en la ecuación 26, se obtiene la ecuación 27, que permite determinar cómo gira el rotor en función de la velocidad del viento (Carrillo-Rosero et al., 2018). Esta relación facilita el cálculo de cuántas revoluciones realiza el rotor dado el recurso eólico disponible, y viceversa.

$$N = \frac{30 * \lambda * v}{\pi * r} \quad (27)$$

Donde:

λ = Relación de velocidad punta [TRD].

v = Velocidad del viento [m/s].

r = Radio de las palas del aerogenerador [m].

3.2.2.22. Eficiencia del generador axial. Como cualquier dispositivo eléctrico, los componentes internos y la estructura física del generador sufren pérdidas durante la conversión, por lo que no puede producir toda la energía de entrada en la salida. La ecuación 28 proporciona la eficiencia del generador expresada como porcentaje (Chapman, 2017).

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} * 100\% \quad (28)$$

Donde:

η = Eficiencia [%].

P_{sal} = Potencia de salida [W].

P_{ent} = Potencia de entrada [W].

3.2.2.23. Dimensionado sistema fotovoltaico. Previamente seleccionado el módulo fotovoltaico y seleccionada la luminaria bajo el reglamento RTE INEN 069 “Alumbrado Público” cuya potencia activa es de 150 W con un factor de potencia aproximado de 0.9, se procede al dimensionado fotovoltaico para la elección del regulador de carga.

3.2.2.24. Dimensionado y selección del regulador de carga. Para el cálculo de la intensidad máxima de entrada procedente del módulo fotovoltaico y considerando un coeficiente de seguridad de 1.25. La ecuación 29 expresa el valor de dicha intensidad, importante para la elección del regulador de carga.

$$I_{entrada} = I_{sc, MFV} * N_p * 1.25 \quad (29)$$

Donde:

$I_{entrada}$ = Intensidad máxima de entrada [A].

$I_{sc, MFV}$ = Intensidad de corto circuito módulo fotovoltaico [A].

N_p = Número de MFV en paralelo.

Se calcula la tensión máxima de entrada procedente del módulo fotovoltaico mediante la ecuación 30.

$$V_{entrada} = V_{mp, MFV} * N_s \quad (30)$$

Donde:

$V_{entrada}$ = Tensión máxima procedente del generador fotovoltaico [V].

V_{mp} = Tensión en el punto máximo de potencia del módulo fotovoltaico [V].

N_S = Número de módulos fotovoltaicos conectados en serie.

Se calcula la potencia aparente de las cargas con la ecuación 31.

$$P_{aparente} = \frac{\textit{Potencia}_{activa}}{\textit{Factor de potencia}} \quad (31)$$

Donde:

$P_{aparente}$ = Potencia aparente de las cargas [VA].

P_{activa} = Potencia activa de las cargas [W].

Se calcula la intensidad de corriente que debe suministrar el regulador de carga a su salida considerando un factor de seguridad de 1.25 mediante la ecuación 32.

$$I_{salida} = 1.25 * \frac{\textit{Sca}}{V_n} \quad (31)$$

Donde:

I_{salida} = Intensidad de corriente que debe suministrar el regulador de carga [A].

S_{ca} = Potencia aparente de las cargas [VA].

η_{inv} = Rendimiento del inversor.

V_n = Tensión nominal de la instalación [V].

3.2.2.25. Aplicación de ingeniería inversa. Se procede a construir un modelo de turbina Savonius de dos pisos, cada uno desfasado 90°, dicho modelo se lo seleccionó después de haber realizado distintos prototipos y a su vez ejecutado distintas evaluaciones y procesos de funcionamiento aplicando el principio de ingeniería inversa. El modelo de dos pisos augura buenos resultados a la hora de ponerlo en marcha y en la generación de energía acoplado a un generador axial. En el siguiente capítulo se determinará la P_{max} que pueda entregar el prototipo con las medidas, variables y materiales escogidos para su máximo rendimiento.

3.2.3. Evaluación del sistema piloto eólico-solar

El ensamblado del sistema piloto eólico-solar se lleva a cabo en un taller de mecánica industrial equipado con herramientas apropiadas para el ensamble y principalmente con personal calificado y experimentado en temas de soldadura, electricidad e ingeniería.

Una vez concluida con la parte de armado y ensamblado de cada parte que compone la turbina savonius, se procede a transportar la misma hacia el lugar de emplazamiento de la presente investigación y posterior anclaje y aseguramiento de la misma para finalmente proceder con la evaluación de la producción energética.

3.2.3.1. Implementación del sistema piloto eólico-solar para el alumbrado

público. Se implementa el sistema eólico-solar en la zona más apropiada según los resultados del primer objetivo, continuando con la evaluación tanto del voltaje de salida como la intensidad de corriente (Helonde, 2019). La instalación del prototipo se realiza en el lugar más apropiado e idóneo para poder realizar el debido monitoreo y mantenimiento de cada componente del sistema híbrido eólico-solar.

3.2.3.2. Determinación de la producción energética.

Se realiza distintas pruebas de funcionamiento del prototipo para poder establecer parámetros de tensión de salida y de intensidad de corriente, para ello se aplica un dispositivo electrónico que consta de dos fases de funcionamiento: recolección de datos y monitoreo. Dichas fases constan de elementos electrónicos específicos para un debido funcionamiento en la determinación de la producción energética del prototipo eólico-solar, dichos elementos se enlistan a continuación:

Tabla 6

Elementos circuito electrónico

Recolección de datos:	Monitoreo:
- Placa pcb diseño + revelado	- Sensor de voltaje AC zmpt
- Módulo sd card	- Sensor de corriente AC S712 10A
- Sd card de 4 Gb	
- Capacitor de 1000 μ F – 50V	

Recolección de datos:	Monitoreo:
- Resistencias 2.7-1 K a 1W	
- Controlador Arduino UNO	

Nota. Referencia a los elementos electrónico utilizados en el sistema de toma de datos.

Al establecer un correcto funcionamiento del prototipo, se continua con el análisis de rendimiento para determinar la producción energética; con el objetivo de poder abastecer a una luminaria bajo el reglamento RTE INEN 069 “Alumbrado Público”.

Capítulo IV

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados, la explicación y el análisis de estos de manera ordenada y de acuerdo con los tres objetivos propuestos, además se incluye información adicional que complementa la investigación.

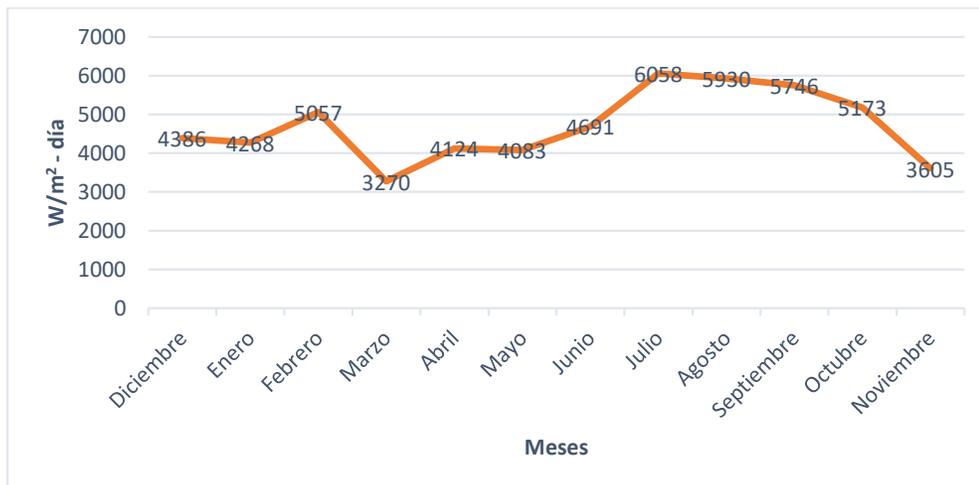
4.1. Evaluación del Potencial Energético del Punto de Estudio (Desvío a Selva Alegre y Redondel del Colegio Otavalo)

4.1.1. Estudio Solar de la Zona

La Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos, los Centros Nacionales de Predicción Medioambiental y la Universidad de Basilea (Suiza) colaboraron para crear Meteoblue, un servicio meteorológico, cuya base de datos se obtuvo para los estudios solares de la zona. Dicha base datos consta de mediciones diarias de un año (25/11/2020 a 25/11/2021). Ver anexo 2.

Figura 24

Radiación Global noviembre 2020 - noviembre 2021



Nota. Resumen de la tendencia de la radiación global en el lapso de un año.

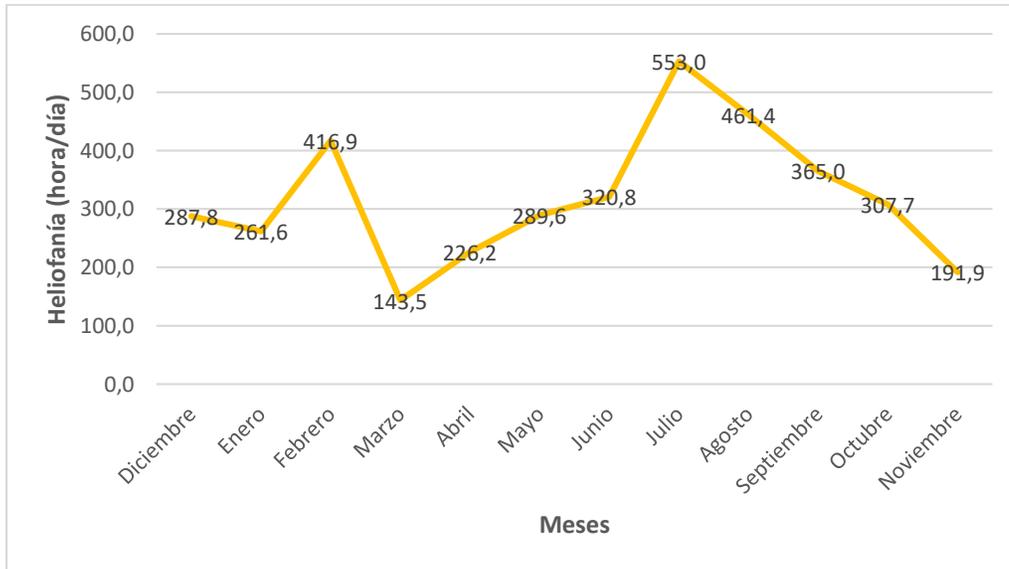
Para el siguiente análisis contamos con datos recogidos de la empresa meteorológica internacional Meteoblue:

- La radiación global promedio en el periodo noviembre 2020 – noviembre 2021 es igual a 4 699 W/m².

4.1.2. Heliofanía del Punto de Investigación

Por otro lado, los datos de heliofanía mensuales requeridos para la investigación, también han sido obtenidos de la empresa meteorológica Meteoblue.

Figura 25
Heliofanía en el emplazamiento noviembre 2020 - noviembre 2021



Nota. Resumen de la tendencia de la heliofanía en el punto de investigación en un año calendario.

Para el siguiente análisis contamos con datos recogidos de la empresa meteorológica internacional Meteoblue:

- La heliofanía promedio en el periodo noviembre 2020 – noviembre 2021 es igual a 318.8 h/mes.

Con los datos obtenidos, se deduce que el recurso solar del lugar de emplazamiento del proyecto es el idóneo para proceder con este tipo de instalaciones ya que la irradiancia mínima para la instalación de un proyecto solar es de 1 000 W/m² para lo cual en el análisis realizado de la base de datos se ha tomado el mes con el valor más bajo de irradiancia para el dimensionamiento del proyecto, dicho mes tiene una irradiancia de 3 270 W/m², el triple del mínimo requerido. Además, la heliofanía del lugar es otro factor favorable para poder instalar este tipo de proyectos, dicha ventaja se debe a nuestra ubicación en la línea ecuatorial.

4.1.3. Estudio Eólico de la Zona

Para las investigaciones sobre el viento en la zona se utilizó una base de datos suministrada por la empresa Meteoblue. Según el anexo 3, esta base de datos contiene mediciones diarias durante un año (del 25 de noviembre de 2020 al 25 de noviembre de 2021). Los mapas de viento muestran los recursos eólicos disponibles como regiones coloreadas según la velocidad promedio del viento o la densidad de potencia promedio, o como líneas de isodensidad de potencia o isoviento.

4.1.4. Análisis Eólico

Al ser el punto de investigación en la panamericana y tomando en cuenta la dirección de circunvalación vehicular de Norte a Sur y viceversa; además que la gráfica de la rosa de vientos lo rectifica, se concluye que el recurso eólico presente en el tramo de la panamericana del kilómetro 153 en la ciudadela Imbaya, predomina la dirección del viento Norte-Sur.

Tabla 7

Velocidades del punto de estudio

Velocidad máxima	4.12
Velocidad mínima	0.26
Velocidad media	2.19

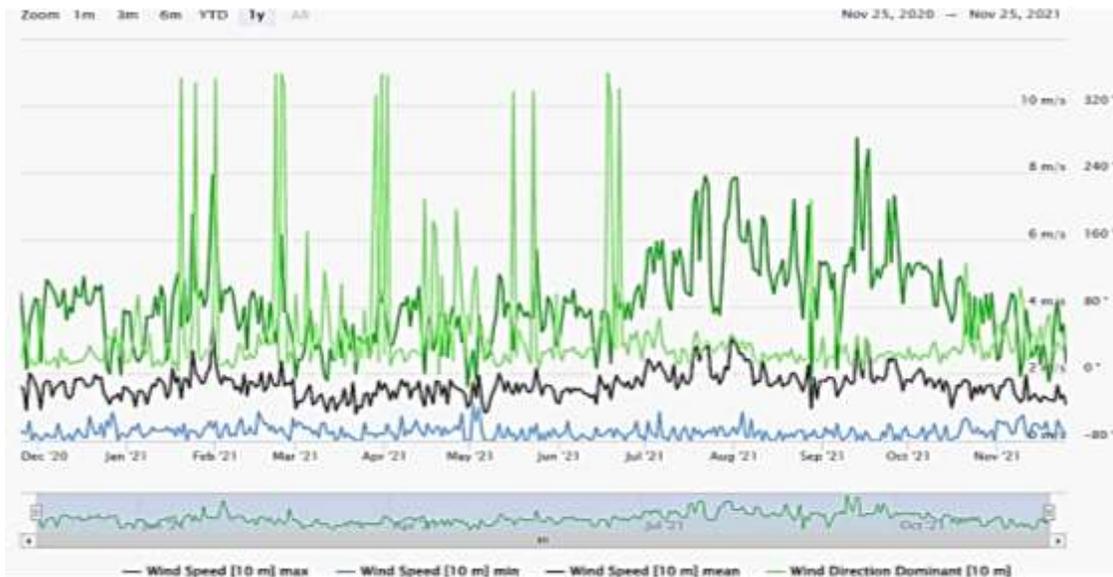
Nota. Resumen de las velocidades en rango máximo, mínimo y medio.

En la tabla 7 podemos analizar y lo siguiente:

- La velocidad máxima promedio del viento es de 4.12 m/s.
- La velocidad media promedio del viento es de 2.19 m/s.
- La velocidad mínima promedio del viento es de 0.26 m/s.

Figura 26

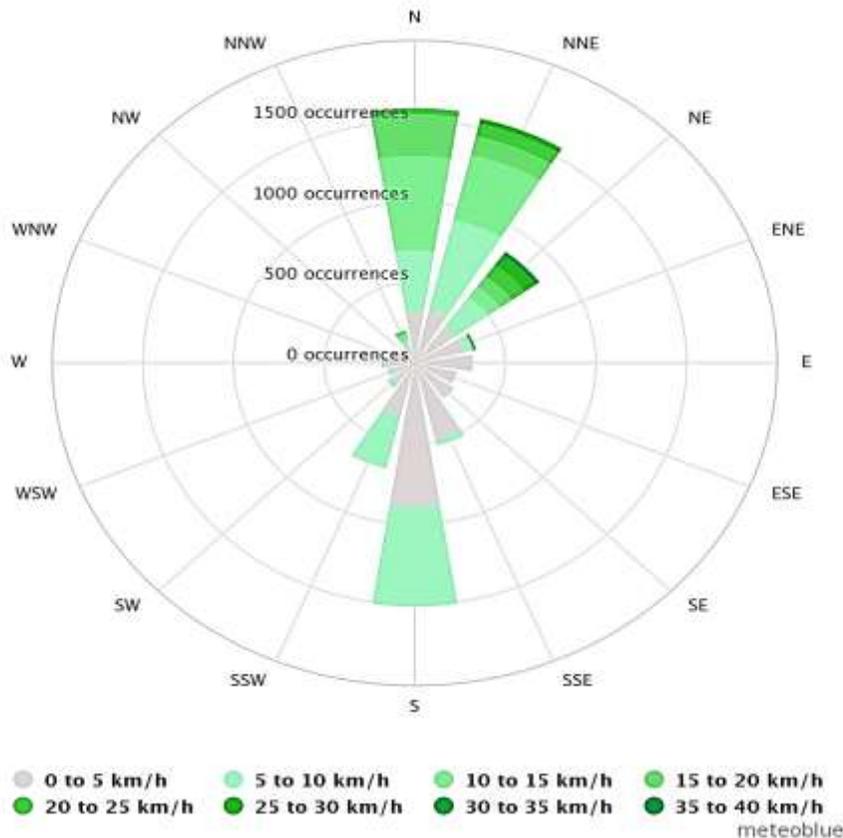
Tendencia de la velocidad del viento



Nota. Gráfica representativa de la variabilidad de la velocidad del viento, destacando la línea azul como la velocidad media del viento para determinar la Potencia máxima del recurso eólico.

Como se observa en la figura 26, la variación y escasos de picos altos de ráfagas de viento es notorio, por lo que la mayoría de veces se observan vientos de hasta 3 m/s pero con tiempos demasiados cortos para su aprovechamiento.

Figura 27
Rosa del viento del punto de investigación



Nota. Gráfica representativa de la variabilidad de la dirección del viento en el lugar de emplazamiento del proyecto.

Se establece una rosa del viento del punto de estudio proporcionada por METEOBLUE donde se observa que la tendencia de dirección del viento en su mayoría es de norte a sur y viceversa, con esto podemos ubicar idóneamente la turbina savonius para el mayor aprovechamiento del recurso eólico.

4.2. Construcción del Sistema Eólico-Solar

Se realiza los cálculos necesarios utilizando las fórmulas indicadas en el anterior capítulo de esta investigación, de este modo y utilizando el criterio de ingeniería inversa, se prioriza la construcción de un aerogenerador tipo savonius que satisfaga el costo/beneficio en materiales para su construcción y aprovechamiento del recurso eólico de la zona.

4.2.1. Potencia Nominal del Viento

Utilizando la ecuación 6 y con los datos previamente analizados se calcula la potencia nominal del viento:

$$P_n = \frac{1}{2} * 0.909 \text{ Kg}/\text{m}^3 * 0.56\text{m}^2 * (3 \text{ m/s})^3$$
$$P_n = 6.87 \text{ W}$$

La ecuación 7 se utiliza para calcular la potencia máxima que puede extraer el generador eólico considerando el coeficiente de potencia de cada elemento de la turbina eólica (Carta, 2012). Reemplazando los datos previos, obtenemos lo siguiente:

$$P_{max} = 0.2 * \frac{1}{2} * 0.909 \text{ Kg}/\text{m}^3 * 0.56\text{m}^2 * (3 \text{ m/s})^3$$
$$P_{max} = 1.37 \text{ W}$$

4.2.2. Cálculo de la Potencia Total Extraída

Utilizando la ecuación 9 y con una batería de 12V y 4.5 Ah, cuya capacidad es de 4.5 amperios durante 20 horas, se calcula una corriente de 0.23 amperios. A partir de estos datos, se obtienen los siguientes resultados:

Según los datos obtenidos en el anexo 1, Donde $V = 12$ y $I = 0.23 \text{ A}$, Se determina:

$$P = 12V * 0.23A$$

$$P = 2.76 W$$

Con una velocidad del viento de 3 m/s, el prototipo debería poder extraer 2,76 W en total. Más adelante ofreceremos una investigación más exhaustiva de este tema.

4.2.3. Dimensionamiento del Rotor

A continuación, el cálculo de la eficiencia mecánica utilizando la ecuación 15 y tomando en cuenta lo siguiente: $\eta_{rod} = 0.99$ y $\eta_t = 0.95$, se calcula la eficiencia mecánica (Ocampo, 1999).

$$\eta_m = 0.99 * 0.95 = 0.94$$

Utilizando la ecuación 16 y teniendo en cuenta $\eta_{gen} = 0.85$ y $\eta_{con} = 0.85$, se puede calcular la eficiencia eléctrica (Barreira, 2009).

$$\eta_e = 0.85 * 0.85 = 0.72$$

La ecuación 14 se utiliza para determinar el área requerida para generar la energía necesaria. Normalmente, utilizando el área de barrido A como base, la fórmula para determinar la potencia de un generador eólico es.

$$A = \frac{2 * 2.3}{0.94 * 0.72 * 0.2 * 0.909 \text{ kg/m}^3 * (3 \text{ m/s})^3}$$

$$A = 1.38 \text{ m}^2$$

4.2.4. Área de Barrido

Para el cálculo se desarrolla la ecuación 17, obteniendo:

$$A = (0.77) * (0.8)$$

$$A = 0.616 \text{ m}^2$$

4.2.5. *Velocidad de punta del álabe*

Para determinar la velocidad de punta de la pala se utiliza la ecuación 18, sin embargo, teniendo en cuenta la figura 15 y poniendo un $C_p = 0,2$, como se indica en el apartado 3.2.2.1.2, el valor estimado para la TSR es 0,8.

4.2.6. *Cálculo de la velocidad angular*

Despejando w , se obtiene:

$$w = \frac{TSR * v}{r}$$
$$w = \frac{0.8 * 3 \text{ m/s}}{0.38 \text{ m}}$$
$$w = 6.31 \text{ rad/s}$$

Reemplazando valores en la ecuación 19 obtenemos las revoluciones por minuto estimadas para la turbina savonous:

$$n = \frac{60 * 6.31 \text{ rad/s}}{2 * 3.14}$$
$$n = 60.25 \text{ rev/min}$$

4.2.7. *Torque*

Usando 5,4 W de potencia eléctrica y 6,31 rad/s de velocidad angular, obtenemos:

$$T = \frac{5.4 \text{ W}}{6.31 \text{ rad/s}}$$
$$T = 0.85 \text{ Nm}$$

4.2.8. *Cálculo de las Dimensiones de las Tapas*

Reemplazando datos se obtiene:

$$d_t = (1.1) * (0.70 \text{ m})$$

$$d_t = 0.77 \text{ m}$$

4.2.9. Construcción Turbina Savonius

El rotor eólico de eje vertical, para la presente investigación, es el principal componente para convertir la energía eólica a eléctrica mediante un generador axial. El rotor a diseñar consta de las siguientes medidas:

Tabla 8

Medidas turbina Savonius

Altura de cada piso	0.4 m
Altura de cada aspa semicirculares (4)	0.4 m
Diámetro de cada aspa semicirculares	0.4 m
Diámetro de bases circulares (3)	0.77 m
Desfase de cada piso	90°
Eje de la turbina	1.5'' x 1.20m

Nota. Detalle de las medidas de cada parte que compone la turbina savonius. Fuente: Autor.

Está compuesto por dos módulos con una longitud total de 0.80 m de altura los cuales contienen dos semicilindros de con 0.40 m de altura y 0.40 m de diámetro, las aspas de cada piso están desfasadas 90° uno de otro, la turbina contiene tres tapas de soporte circulares superior, intermedia e inferior de 0.77 m de diámetro cada, la turbina es acoplada a un eje de soporte de 1.4'' de diámetro por 1.25 m de largo como se observa en la figura 28.

Figura 28
 Diseño Turbina Savonius



Nota. Diseño de la turbina Savonius con las medidas especificadas en el software Inventor.

El desplazamiento facilita la variabilidad en la dirección del flujo. De este modo, además de aprovechar las fuerzas aerodinámicas, se maximiza la variación en la cantidad de movimiento del viento.

Para crear un rotor liviano, se deben utilizar materiales de baja densidad para la fabricación de componentes; en la Tabla 9 se enumeran estos materiales.

Tabla 9
 Materiales utilizados en la turbina Savonius

1 planchas de tol galvanizado	4 mm de espesor
1 plancha de tol galvanizado	7 mm de espesor
1 tubo de hierro negro	1.5'' x 1.25m
6 Arandelas de acero	1.5'' de diámetro interno
2 rodamientos	1 rodamiento de bola y 1 cónico

Nota. Resumen de los distintos materiales utilizados para la construcción de la turbina Savonius.

Una vez realizado el diseño digital con las medidas especificadas en el software INVENTOR como se observó en la figura 28 y a su vez, la adquisición de los distintos componentes y materiales, se procede a la manufactura del prototipo eólico como se puede observar en la figura 29.

La elaboración de la turbina fue realizada en un taller de mecánica industrial con herramientas y maquinas netamente desarrolladas para el corte, acople, doblado, soldadura y limpieza de piezas. Cada pieza que compone la turbina se fue desarrollando en el lapso de 7 días para finalmente dar el acabado final utilizando colores que sean notorios y acordes con el prototipo que se ha desarrollado. Se procuró utilizar un tipo de pintura de larga duración para que cumpla la función de impermeabilizante ante los factores ambientales que puedan desgastar los materiales implementados.

Figura 29

Construcción de la turbina Savonius



Nota. Manufactura de la turbina Savonius con las medidas y materiales dichos anteriormente.

4.2.10. Construcción del Generador de Flujo Axial

Se realiza los cálculos necesarios utilizando las fórmulas indicadas en el anterior capítulo de esta investigación, de este modo y utilizando el criterio de ingeniería inversa, se procede a la construcción de un generador eléctrico axial que satisfaga el costo/beneficio en materiales para su construcción y el rendimiento de la turbina savonius con el recurso eólico de la zona.

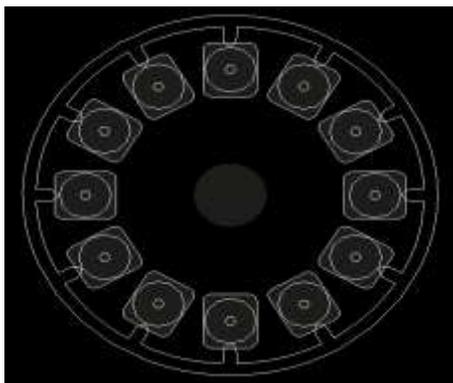
4.2.10.1. Configuración Geométrica del Generador. Se opta por diseñar un generador trifásico basándose en la evaluación y recomendación del asesor de tesis, respaldando esta decisión con el concepto de ingeniería inversa. Al mantener la misma cantidad de bobinas y pares de polos, como se detalla en la ecuación 22, se logra un mayor voltaje generado por fase. En este diseño se utilizan 12 imanes de neodimio grado N50, lo que proporciona 6 pares de polos, y 12 bobinas de contactores marca CHINT.

NP = 6 pares de polos.

NB = 12 bobinas.

Figura 30

Conjunto de imanes (rotor) y bobinas (estator)



Nota. Vista del encuadre rotor y estator del generador de flujo axial.

Al elegir o diseñar imanes, deben tenerse en cuenta el número de polos, el tipo y el grado de magnetización, junto con la forma y la densidad del flujo magnético que pueden producir.

4.2.10.2. Estimación de la Densidad de Flujo Magnético. A continuación, se calcula la densidad de flujo magnético para un aro magnético. Se desarrolla la ecuación 24.

$$B = \frac{B_r}{2} \left[\frac{D+z}{\sqrt{R_a^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_a^2 + z^2}} - \left(\frac{D+z}{\sqrt{R_i^2 + (D+z)^2}} - \frac{z}{\sqrt{R_i^2 + z^2}} \right) \right]$$

El centro de la distancia entre las bases del rotor está representado por el valor de z . Carrillo-Rosero et al. (2018) afirman que un valor promedio de 10,5 mm es ideal; sin embargo, para este estudio se selecciona una separación de 3 mm. La ecuación 24 se puede resolver para obtener la densidad de flujo magnético calculada, $B = 0,33$ T, sustituyendo los valores de la tabla 5.

4.2.10.1. Análisis de la Velocidad de Operación del Generador Axial. Se determina la velocidad de funcionamiento del generador axial mediante el desarrollo de la ecuación 27. Cabe recalcar que N es revoluciones por minuto.

$$N = \frac{30 * 0.8 * 3 \text{ m/s}}{\pi * 0.35 \text{ m}} = 65,5$$

Una vez seleccionado los materiales y componentes para la construcción del generador de flujo axial, se procedió al ensamblado de los elementos que se observan en la figura 31. Para la sujeción de las bobinas se utiliza resina epóxica en un molde de madera

y para la sujeción de los imanes a la base redondeada se utilizó silicona en tubo 1200 industrial de la marca ABRO conjuntamente con tornillos de hierro.

Figura 31
Generador de flujo axial



Nota. Ensamblado del generador de flujo axial con el disco de imanes (rotor) y la base con bobinas (estator).

En la imagen se observa el prototipo final de generador axial construido, una vez concluido se procedió a corroborar su funcionamiento mediante el accionamiento de un taladro acoplado al eje del generador. Posteriormente se verificó el voltaje de salida mediante la utilización de un multímetro.

4.2.10.2. **Selección Previa del Módulo Fotovoltaico.** El panel solar utilizado en la presente investigación fue prestado por la Asociación de carrera de Energías Renovables, con propósito de abaratar costos en el desarrollo de la presente investigación. A continuación, en la tabla 10 se describen las especificaciones del módulo fotovoltaico adquirido.

Tabla 10
Principales características del panel solar

Fabricante	Yingli Solar
Modelo	YL 250P-29b
Potencia	250 W
Voltaje de circuito abierto	38.40 V
Corriente de corto circuito	8.79 Amp
Eficiencia del módulo	15.30 %
Peso	20.5 Kg
Medidas	1.7x1.14x0.045 m

Nota. Desglose de las principales características del panel solar utilizado. Adaptado de Yingli Solar <https://apmicrotech.com.mx/producto/yingli-solar-yl-250p-29b-250w-poly-slvwht/>

Al ser un panel de peso y dimensiones considerables, se decide instalar el panel en la parte superior de la estructura de la turbina eólica mediante la utilización de correas y ángulos para lograr un acople idóneo sobre la misma; esto al considerar que es un proyecto

mixto el cual debe cogenerar tanto el parte funcional como en la estética del mismo. A continuación, se presentan el módulo adquirido en la figura 32.

El módulo fotovoltaico a pesar de haber perdido su total protección de las células fotovoltaicas por la rotura del vidrio templado, aún sigue produciendo su tensión y corriente nominal, factores necesarios y aceptables para el desarrollo de esta investigación.

Figura 32
Módulo fotovoltaico



En la figura 32 se observa el panel solar utilizado en la presente investigación, es un panel poli cristalino con medidas 1.7x1.14x0.045 m y un peso de 20.5 Kg. Es un panel de 250W de potencia otorgado por la asociación de carrera de Energías renovables.

4.2.11. Dimensionado Sistema Fotovoltaico

Se presentan los cálculos realizados para el dimensionamiento de la parte fotovoltaica del sistema autónomo eólico-solar.

4.2.11.1. Dimensionado y Selección del Regulador de Carga. Mediante la ecuación 29 se expresa el valor la intensidad de entrada, importante para la elección del regulador de carga.

$$I_{entrada} = 8.79 A * 1 * 1.25$$

$$I_{entrada} = 10.98 A$$

Desarrollando la ecuación 30, se calcula la tensión máxima de entrada procedente del módulo fotovoltaico.

$$V_{entrada} = 30.4 V * 1 = 30.4 V$$

Se determina la potencia aparente de las cargas con la aplicación de la ecuación 31.

$$P_{aparente} = \frac{150 W}{0.9}$$

$$P_{aparente} = 166.6 VA$$

Finalmente se calcula la intensidad de corriente que debe suministrar el regulador de carga a su salida considerando un factor de seguridad de 1.25 mediante la ecuación 32.

$$I_{salida} = 1.25 * \frac{\frac{166.6 VA}{0.95}}{24 V}$$

$$I_{salida} = 9.13 A$$

El regulador de carga seleccionado es un PWM genérico cuyas características eléctricas en base a los cálculos realizados son: corriente y tensión de trabajo 20 A, 12/24 V, soporta tensiones provenientes del panel fotovoltaico hasta 50 V y soporta potencias de hasta 260 W a 12V y 520 W a 24 V.

4.3. Evaluación del Sistema Piloto Eólico-Solar para el Alumbrado Público.

4.3.1. Instalación del Prototipo Eólico-Solar

Se realizó el ensamble de piezas que componen la turbina Savonius según su diagrama de conexión en el anexo 4, después se la acopló a la estructura de soporte y una vez echas una sola pieza se procedió a empotrar la estructura en la ubicación seleccionada

mediante la utilización de 6 tacos Fisher y 6 pernos a la superficie del lugar de emplazamiento, así como se observa en la figura 34.

Figura 33
Instalación de la turbina Savonius



Nota. Instalación y aseguramiento de la turbina Savonius.

Una vez asegurada la estructura de la parte eólica procurando una rigidez de sujeción confiable y segura, se procedió a la ubicación del panel solar en el lugar antes mencionado.

Para lograr un acople seguro del módulo fotovoltaico con la estructura de soporte de la turbina se realizó la soldadura de correas para lograr una base estable para el reposo idóneo del módulo fotovoltaico evitando posibles accidentes ante la presencia de ráfagas de viento que puedan ocasionar el movimiento brusco del panel y un posible desacople de la estructura ocasionando accidentes a su alrededor.

Figura 34
Posicionamiento del panel solar



Nota. Ubicación y sujeción del panel solar.

Finalmente se procede a realizar el debido conectado de los componentes electrónicos tales como: reguladores de carga, bancada de baterías, protecciones, cableado, luminaria y generador eléctrico de flujo axial como se observa en las figuras 36 a 39.

Todos los componentes antes mencionados estarán ubicados dentro de una caja metálica cuya función es la de impermeabilizar a cada componente ante los factores ambientales y de evitar el contacto directo de los componentes eléctricos con los distintos usuarios y personas no autorizados para la manipulación de dichos artefactos.

Figura 35

Acoplamiento y conexionado del generador de flujo axial



Para el acoplamiento del eje del generador axial con el eje de la turbina se mandó a realizar un acople mediante la utilización de un torno para lograr un producto idóneo evitando de esta manera el pandeo de la turbina al ser accionada por el recurso eólico del lugar de emplazamiento.

Figura 36

Conexión regulador de carga eólico



Nota. Regulador de carga eólico conectado al generador axial.

La figura 36 muestra cómo se conecta el regulador de carga eólica. Este regulador, que tiene protección IP67 y funciona a 12/24 V, puede producir hasta 600 W de electricidad. Lleva la marca MARSROCK.

A la salida del generador axial, el regulador de carga eólico se conecta directamente a las líneas trifásicas. Para mejorar el contacto entre el regulador de carga y los pines conductores del generador, se utilizaron bloques de terminales para realizar los acoplamientos.

Figura 37
Conexión bancada de baterías



Nota. Bancada de baterías con conexión en serie.

Para la bancada de baterías se utilizó dos baterías de 12V y 4.5 Ah conectadas en serie para aumentar el voltaje a 24 V y de esta manera realizar un mejor trabajo en conjunto con el módulo fotovoltaico y el generador axial.

Figura 38

Conexión del regulador de carga solar



Nota. Regulador de carga conectado al módulo fotovoltaico, bancada de baterías y luminaria.

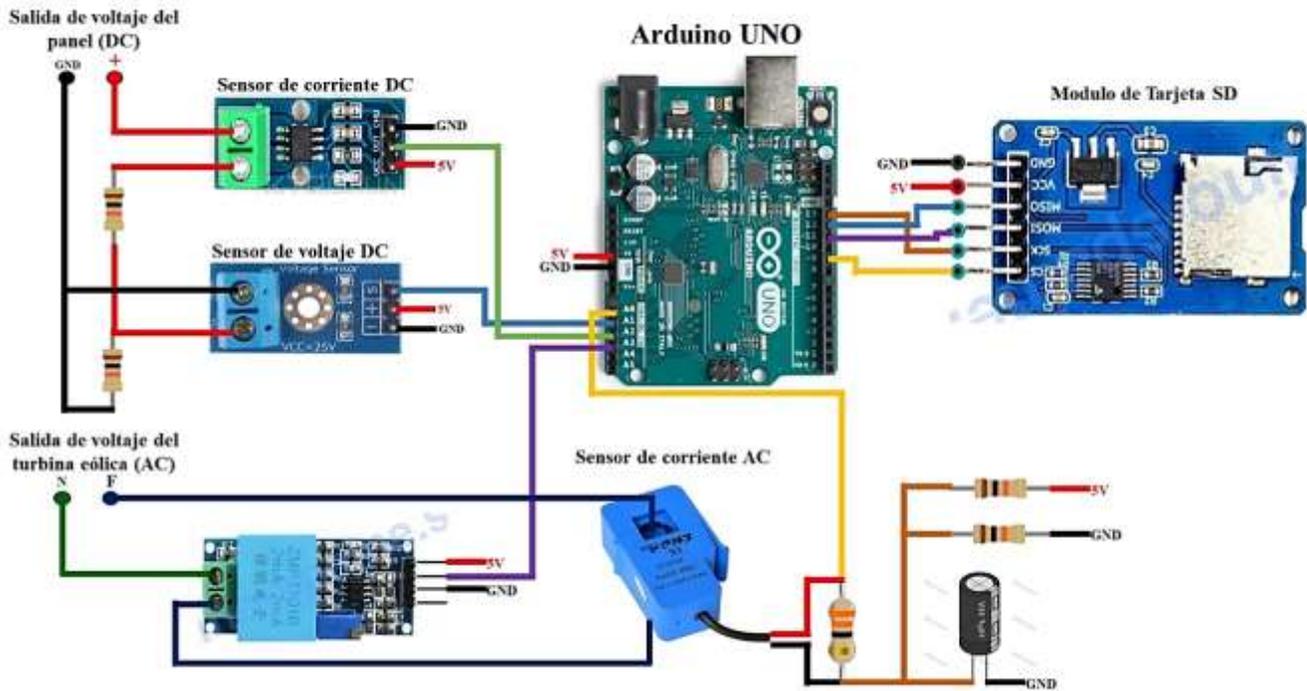
De la misma manera que el regulador de carga eólico, se realizó la instalación del regulador de carga solar, dicho regulador es un PWM de 20 A, 12/24 V y con resistencia de hasta 550 W de potencia procedente del módulo fotovoltaico.

4.3.2. Determinación de la producción energética

Se ha realizado la construcción de un sistema de adquisición de datos de producción de energía del prototipo eólico-solar en base a tensión y corriente AC Y DC. El sistema de adquisición de datos consta de sensores de tensión y corriente; AC para la parte eólica y DC para la parte solar, dichos componentes fueron especificados en el anterior capítulo. A continuación, en la figura 39 se presenta el diagrama de conexión electrónico de los elementos utilizados en este sistema.

Figura 39

Diagrama electrónico de toma de datos de determinación energética



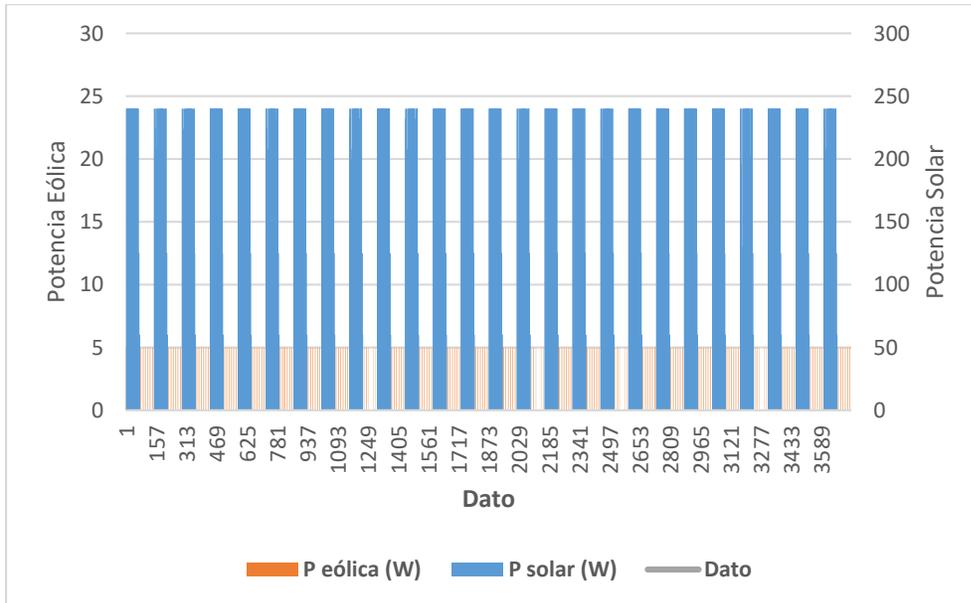
Nota: Sistema con sensores de AC y DC en voltaje y corriente para la determinación de producción energética del prototipo eólico-solar.

También se ha creado un código del sistema arduino el cual es el encargado de adquirir y alimentar la base de datos de la evaluación energética con la toma de datos cada 10 min a partir del día de instalación 14/06/2024 hasta el 09/07/2024. Ver anexo 5.

A partir de este punto, se tabuló los datos adquiridos y se concluye con un análisis de factibilidad para implementar este tipo de proyectos en lugares similares al lugar de emplazamiento del TIC. Una vez terminado el periodo estipulado para la evaluación de producción energética se realizó la tabulación de los datos en base a la potencia de producción de las partes que compone el prototipo eólico-solar obteniendo los siguientes resultados reflejados en la figura 40 y 41.

Figura 40

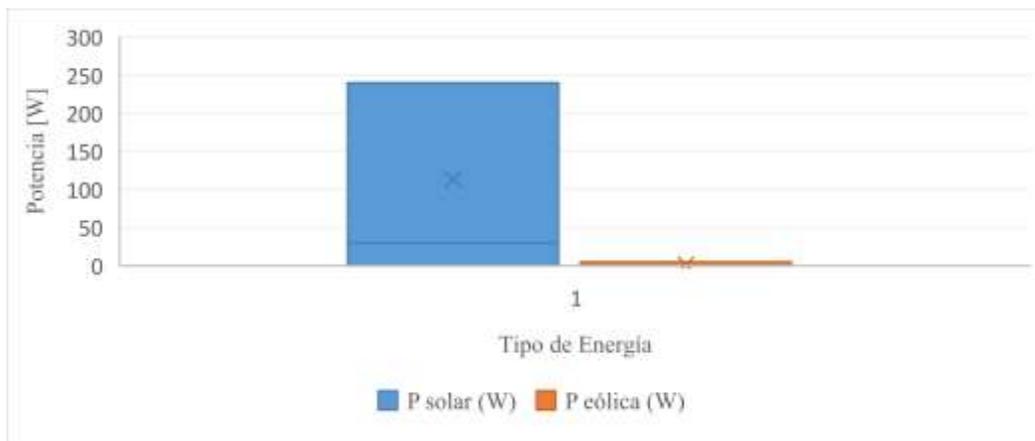
Tabulación de producción energética durante los días de evaluación del prototipo eólico-solar



Nota. Producción energética del prototipo eólico-solar durante el periodo de tiempo estipulado para su evaluación de rendimiento.

Figura 41

Promedio general de producción de energía del prototipo eólico-solar



Nota. Resultados de producción energética obtenidos a partir de la potencia generada de la parte solar y eólica.

Como se puede observar en la figura 40 y 41, el recurso que es de mejor provecho es el solar con una potencia promedio de 250W durante las 12 horas de luz solar que poseemos en el país, cabe recalcar que la potencia en la parte solar puede variar según la eficiencia y el tipo de panel solar que se pretenda utilizar. Por otra parte, el recurso que no produjo una energía considerable es el eólico con una potencia promedio de 5W pico, dicha potencia es generada durante cortos periodos de ráfagas de viento a partir de 3 m/s durante las 24 horas del día.

De este modo se analiza la rentabilidad del proyecto en lugares con características meteorológicas similares al desarrollado en esta investigación cuando la parte solar sea la que se encargue de la mayor producción de energía y la parte eólica cumpla el papel de energía auxiliar con una relación 90/10 o 95/5, es decir 90% de producción solar y 10% de producción eólica o 95% de producción solar y 5% de producción eólica.

Con estos resultados se logró suplir la demanda energética de la luminaria establecida marca SYLVANIA de 150W de potencia, ver anexo 6.

Capítulo V

Conclusiones

- El número de horas solar pico (HSP) para considerar viable la aplicación del proyecto debe ser mayor a 3 horas; el mes de marzo, en el lugar de estudio, cuenta con la menor irradiancia del año de 3270 W/m^2 , equivalente a 3,27 HSP, lo cual favorece al desarrollo del proyecto.
- Por otro lado, en el tramo de la panamericana kilómetro 153 de la ciudadela Imbaya el potencial eólico analizado, cuenta con una velocidad media de 3 m/s, la cual no es insuficiente si este sistema fuese únicamente eólico, pero al ser un proyecto mixto, la parte solar genera el 95% del total de la energía y la parte eólica cubre el restante 5% para cumplir con la demanda energética de la luminaria SYLVANIA de 150 W bajo el reglamento RTE INEN 069 “Alumbrado Público”.
- Se ha construido el prototipo con materiales metálicos de espesores delgados y livianos, la turbina está construida con Tol Galvanizado con espesores 0.4 y 0.6 mm para facilitar lo máximo posible la rotura de torque de esta y su arranque ante vientos de bajas velocidades. El producto final posee una estructura rígida y segura que prevé un funcionamiento apropiado del prototipo eólico-solar.
- Una vez analizados los datos de producción energética se concluye que la parte solar trabaja a su capacidad máxima de 250W, tensión 30V y corriente 8A durante las 8 horas del día en las que se puede aprovechar el recurso solar, mientras que la parte eólica funciona durante intervalos muy cortos ante ráfagas de viento que superan los 3 m/s proporcionando una potencia de 5W, tensión de 5V y corriente

1A. De este modo se concluye que el recurso solar es el más rentable ante la escasez de recurso eólico óptimo.

Recomendaciones

- Al no haber el recurso eólico necesario, se recomienda la implementación de turbinas eólicas de última innovación que puedan funcionar con vientos de bajas velocidades. Por otra parte, al haber un excelente recurso solar, la utilización de cualquier tipo de tecnología que aproveche dicho recurso será lo más idóneo para satisfacer necesidades energéticas de los diferentes usuarios.
- Se realizó un análisis de materiales en donde lo recomendable es utilizar el material balsa debido a su liviana densidad, idónea para los alabes de la turbina y poder realizar la rotura de torque para su puesta en marcha.
- La utilización de dos o más tecnologías que converjan en un solo, es lo más recomendable para aprovechar el distinto recurso natural que posea el lugar de emplazamiento, de esta manera se aplica constantemente la eficiencia energética en la producción de energía.

Referencias

- Adhikary, A., Islam, M. Q., & Ali, M. (2014). PERFORMANCE OF A STATIONARY SAVONIUS ROTOR WITH CIRCULAR ARC BLADE PROFILE. *Journal of Mechanical Engineering*, 43(2), 77–81. <https://doi.org/10.3329/JME.V43I2.17830>
- Adler, F., Berardi, M., García Pedrosa, M., Monticelli, F., & Morquecho, M. (n.d.). *Energía solar fotovoltaica Instalaciones Industriales*.
- Agencia de Regularización y Control Eléctrico. (2019). *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2019 (Documento preliminar)*.
- Akwa, J. V., Vielmo, H. A., & Petry, A. P. (2012). A review on the performance of Savonius wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3054–3064. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.02.056>
- Alvarez, O., Montaña, T., Maldonado, J., & Luna, L. (2014). Utilización de imágenes GOES en el cálculo de radiación solar en la Región Sur del Ecuador. *Cedemaz*, 4(1), 97–105.
- Anchatipan Aldaz, R. S., & Claudio Calvopiña, M. O. (2016). “Análisis Del Sistema De Alumbrado Público Que Da Servicio En El Barrio Zumbalica Centro, Cantón Latacunga, Provincia De Cotopaxi. Propuesta De Sistema De Alumbrado Público Más Eficiente, En El Periodo Lectivo Marzo 2 - Abril 13 Del 2016.” <http://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/3653/1/T-UTC-000085.pdf>
- Archer, R. (2020). 20 – Geothermal Energy. In *Future Energy: Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet* (Third Edit). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00020-7>
- Awan, M. R. (2013). *Estudio de viabilidad de aerogeneradores de eje vertical en las zonas*

urbanas de Suecia.

Badescu, V. (2008). *Modeling solar radiation at the earth's surface : recent advances*. 517.

Barreira, C. (2009). *Eficiencia energética en motores eléctricos*.

Belmili, H., Cheikh, R., Smail, T., Seddaoui, N., & Biara, R. W. (2017). Study, design and manufacturing of hybrid vertical axis Savonius wind turbine for urban architecture. *Energy Procedia*, 136, 330–335. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.389>

Bonhomme, R. (1993). *La radiación solar: caracterización y distribución en el dosel*. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR9402276>

Borja, V. (1997). *Redesign supported by data models with particular reference to reverse engineering*. Loughborough University.

Breeze, P. (2019). *Chapter 15 - Biomass-Based Power Generation* (P. B. T.-P. G. T. (Third E. Breeze (ed.); pp. 351–374). Newnes. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102631-1.00015-8>

Camacho, J., & Sosa, V. (2013). Método alternativo para calcular el campo magnético de imanes permanentes con simetría azimutal. *Revista Mexicana de Física*, 59, 8–17. https://www.researchgate.net/publication/262707508_Alternative_method_to_calculate_the_magnetic_field_of_permanent_magnets_with_azimuthal_symmetry

Cárdenas, M. (2019). *Estudio técnico económico de la energía solar fotovoltaica y mini eólica a pequeña escala*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/32326>

Carrillo-Rosero, M., Claudio-Medina, C., & Mayorga-Pardo, A. (2018). Caracterización de un generador de flujo axial para aplicaciones en energía eólica. *Ingenius*, 19, 19–28. <https://doi.org/10.17163/ings.n19.2018.02>

Carta, J. (2012). *Centrales de energías renovables : generación eléctrica con energías*

renovables (Vol. 2).

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). *Termodinámica*. McGRAW-HILL.

Chapman, S. (2017). Máquinas Eléctricas. In *Universitas Nusantara PGRI Kediri* (Vol. 01).

Defaz, A., & Pallasco, M. (2017). *Análisis y simulación de un prototipo de generador eólico de eje vertical tipo Savonius para velocidades entre 5 Km/h y 20 km/h*. 1–144.

Díaz, J. (n.d.). *Boletín IIE Tecnología fotovoltaica*.

Eales, A. (2012). *Non-Renewable and renewable resources*.

Fernández, P. (2008). Fundamentos aerodinámicos. *Energía Eólica*, 1–135.
<http://www.termica.webhop.info/>

GAD OTAVALO. (2020). *Situación geográfica*.
<http://www.otavalo.gob.ec/otavalo/situacion-geografica.html>

Gorjian, S. (2017). *An Introduction to the Renewable Energy Resources*. June 2017, 41.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27055.53928>

Helonde, J. B. (2019). GENERACIÓN DE ENERGÍA EN CARRETERA USANDO TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL Y ENERGÍA SOLAR. *REVISTA INTERNACIONAL DE CIENCIAS DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA*, 8(6).

Herrera, L., Alarcón, J., & Rivas, E. (2013). Axial Flux Generator Design By Using the Finite Elements Method. *Redes de Ingeniería*, 4(2).
<https://doi.org/https://doi.org/10.14483/2248762X.5920>

Holl, R. J., & DeMeo, E. A. (1990). *The Status of Solar Thermal Electric Technology BT - Advances in Solar Energy: An Annual Review of Research and Development* (K. W.

- Böer (ed.); pp. 219–394). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9948-3_2
- Jaramillo-Robledo, A. (2005). *Clima andino y café en Colombia*.
- Kuyper, J. C. V. de, & Morales, S. R. (n.d.). *Fuentes de Energía Renovables y No Renovables Aplicaciones*. Alfaomega.
- Lara, M., & Hernández, M. (2009). *Prototipo de aspa. 2008*.
- Lastra, N. (2019). (PDF) *Diseño y Construcción de un Generador de Flujo Axial con Imanes Permanentes de Bajo Costo para Aplicaciones Eólicas*. https://www.researchgate.net/publication/336071436_Disenio_y_Construccion_de_un_Generador_de_Flujo_Axial_con_Imanes_Permanentes_de_Bajo_Costo_para_Aplicaciones_Eolicas
- Lefèvre, M., Cros, S., Albuissou, M., & Wald, L. (1999). *Developing a database using METEOSAT data for the delivery of solar radiation assessments at ground level. January*, 485–489.
- Letcher, T. (2017). *Wind Energy Engineering* (Academic Press (ed.)).
- Lotsch, H. K. V, Goetzberger, A., U.Hoffmann, V., Rhodes, W. T., Asakura, T., Brenner, K.-H., Hänsch, T. W., Kamiya, T., Krausz, F., Monemar, B., Venghaus, H., Weber, H., & Weinfurter, H. (Eds.). (2005). *What Is Photovoltaics? BT - Photovoltaic Solar Energy Generation* (pp. 1–10). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-26628-3_1
- Mathew, S. (2006). *Basics of wind energy conversion BT - Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics* (S. Mathew (Ed.); pp. 11–43). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-30906-3_2
- Meizoso-López, M.-C. (2012). *Distribución de la irradiación solar global, directa y*

- difusa, en la ciudad de A Coruña*. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/12357>
- Mejia, E. A. (n.d.). *Edgar Alvarez Mejia*.
- Menet, J. (2004). A double-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study. *Renewable Energy*, 29(11), 1843–1862.
- Molina-García, Melchor-Hernández, & César. (2016). *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería Prototipo de un Sistema Fotovoltaico Autónomo*. 8. www.ecorfan.org/bolivia
- Nel, T. U. V, Unido, R., & Kaiser, W. (n.d.). *Turbinas eólicas verticales pequeñas DS300 Para soluciones conectadas y fuera de la red*.
- Ocampo, L. (1999). *Diseño de accionamientos y transmisiones de maquinas* (U. T. de Pereira (Ed.)).
- OLADE. (1981). *Aerogeneración de energía*. 121.
- Patil, S., Wagh, M., & Gavali, S. (2017). DISEÑO DE FUNCIONAMIENTO DE TURBINA EÓLICA DE EJE VERTICAL CON GENERACIÓN DE ENERGÍA VIAL. *International Journal of Advance Research in Science and Engineering*, 6, 395–403.
- Perez, R., Cebecauer, T., & Šúri, M. (2013). Semi-Empirical Satellite Models. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, 21–48. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397177-7.00002-4>
- Pico, R. (2018). TURBINAS HIDROCINÉTICAS DE EJE VERTICAL HELICOIDAL. *ROCA. Revista Científico - Educativa de La Provincia Granma*, 14(0), 1–23.
- Rao, C. R. N., Stowe, L. L., & McClain, E. P. (1989). Remote sensing of aerosols over the oceans using AVHRR data Theory, practice and applications. *International Journal*

- of Remote Sensing*, 10(4–5), 743–749. <https://doi.org/10.1080/01431168908903915>
- Ricci, R., Romagnoli, R., Montelpare, S., & Vitali, D. (2016). Experimental study on a Savonius wind rotor for street lighting systems. *Applied Energy*, 161, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.012>
- Röder, M., & Welfle, A. (2019). 12 - *Bioenergy* (T. M. B. T.-M. G. W. Letcher (Ed.)); pp. 379–398). Academic Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00012-0>
- Rodríguez, J. (1985). Coeficientes de potencia en molinos Savonius. *Ingeniería e Investigación*, 13, 62–67. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.n13.19535>
- Rodríguez, M., & León, M. (2016). Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica. *Universidad Politécnica Salesiana*, 125. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/13147>
- Rosero, G. (1996). *TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TITULO DE INGENIERO ELÉCTRICO EN LA ESPECIALIZACIÓN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA*.
- Sachin, Y., Govind, P., Pankaj, G., & Mujahid, F. (2018). Generación de energía en la carretera mediante el uso de aerogeneradores de eje vertical y Sistema solar. *Revista Intenacional de Investigación de Ingeniería y Tecnología (IRJET)*, 5, 2133–2137.
- Salas, T., Jiménez, R., Alberto, C., & Clave, P. (n.d.). *ESTADO DEL ARTE DE AEROGENERADORES DE EJE HORIZONTAL Y VERTICAL*.
- Schallenberg, J. C., Gonzalo, R., Izquierdo, P., Hernández Rodríguez, C., Unamunzaga, P., Ramón, F., Déniz, G., Díaz, M., Delia, T., Pérez, C., Martel Rodríguez, G., Pardilla, J., Vicente, F., & Ortin, S. (n.d.). *Energías renovables y eficiencia energética*.

- Schmetz, J. (1989). Towards a surface radiation climatology: Retrieval of downward irradiances from satellites. *Atmospheric Research*, 23(3–4), 287–321. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(89\)90023-9](https://doi.org/10.1016/0169-8095(89)90023-9)
- Sociedad, U. Y., Pascual, C., Correa Álvarez, F., Dargel González González, E., Grey, M. J., Alemán, P., Álvarez, C., & González, G. (2016). *Volumen 8 / Número 2 / Mayo-Agosto*. <http://rus.ucf.edu.cu/>
- SolarGis. (2021). *Metodología - Modelización de la radiación solar*. <https://solargis.com/docs/methodology/solar-radiation-modeling/>
- Speight, J. G. (2019). History and use. *Natural Gas*, 3–24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809570-6.00001-1>
- Tarpley, J. . (1979). Estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data. *American Meteorological Society*, 18, 1172–1181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)018%3C1172:EISRAT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)018%3C1172:EISRAT%3E2.0.CO;2)
- Ujjwal, S., & Damodar, M. (2008). Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial*, 96, 1359–1375.
- Ushiyama, I., Nagai, H., & Shinoda, J. (1986). Experimentally Determining the Optimum Design Configuration for Savonius Rotors. *Bulletin of JSME*, 29(258), 4130–4138. <https://doi.org/10.1299/JSME1958.29.4130>
- Vargas, L. (2007). *CONVERSIÓN ELECTROMECAÁNICA DE LA ENERGÍA*.
- Vesperinas, V. (2020). *Modelización Y Control De Un Aerogenerador De Velocidad Variable Memoria*.
- Vidal, C. (2019). *Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico*. 94.

[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago - Diseño de un aerogenerador Savonius para uso doméstico.pdf?sequence=1](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/131197/Diago%20-%20Dise%C3%B1o%20de%20un%20aerogenerador%20Savonius%20para%20uso%20dom%C3%A9stico.pdf?sequence=1)

Villarrubia, M. (2013). Ingeniería de la energía eólica. In *Nuevas energías* (Vol. 1).

[https://books.google.com.ec/books?id=GW_jEgJJSdcC&printsec=frontcover&dq=villarubia+viento&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiStY_Ko7bwAhUI26wKHX-3AxwQ6AEwAHoECAMQAg#v=onepage&q=villarubia viento&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=GW_jEgJJSdcC&printsec=frontcover&dq=villarubia+viento&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiStY_Ko7bwAhUI26wKHX-3AxwQ6AEwAHoECAMQAg#v=onepage&q=villarubia%20viento&f=false)

Wannakarn, P., Tanmaneeprasert, T., Rugthaicharoencheep, N., & Nedphograw, S. (2011).

Design and construction of axial flux permanent magnet generator for wind turbine generated DC voltage at rated power 1500 W. *DRPT 2011 - 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 763–766. <https://doi.org/10.1109/DRPT.2011.5993994>

Yanza, M. (2019). “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE FLUJO

RADIAL DE IMANES PERMANENTES DE NEODIMIO CON POLOS SALIENTES EN EL ROTOR.” *Repo.Uta.Edu.Ec*, 130.

<http://repo.uta.edu.ec/bitstream/handle/123456789/5301/Mg.DCEv.Ed.1859.pdf?sequence=3>

Yero, D. (2016). *Simulación de un generador eólico asíncrono* [Universidad Central

“Marta Abreu” de las Villas]. <http://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/6441>

Anexos

Anexo 1

Batería utilizada para el desarrollo del TIC.

forza
POWER TECHNOLOGIES

forzaups.com

FUB-1245

Utilizando las últimas innovaciones en la aplicación del plomoácido, Forza introduce la FUB-1245, una batería versátil, recargable y completamente portátil.



Anexo 2

Base de datos recurso solar otorgados de la empresa METEOBLUE

2020-11-25T00:00:00	5885,57
2020-11-26T00:00:00	3797,63
2020-11-27T00:00:00	1383,06
2020-11-28T00:00:00	4830,03
2020-11-29T00:00:00	4953,74
2020-11-30T00:00:00	4950,18
2020-12-01T00:00:00	4216,82
2020-12-02T00:00:00	1462,27
2020-12-03T00:00:00	3296,56
2020-12-04T00:00:00	6329,68
2020-12-05T00:00:00	6695,47
2020-12-06T00:00:00	5443,24
2020-12-07T00:00:00	5266,13
2020-12-08T00:00:00	3286,77
2020-12-09T00:00:00	3267,19
2020-12-10T00:00:00	4949,29
2020-12-11T00:00:00	3877,73
2020-12-12T00:00:00	3126,57
2020-12-13T00:00:00	3897,31
2020-12-14T00:00:00	5252,78
2020-12-15T00:00:00	4861,18
2020-12-16T00:00:00	6033,31
2020-12-17T00:00:00	5206,5
2020-12-18T00:00:00	3611,62
2020-12-19T00:00:00	3211,12

2020-12-20T00:00:00	4935,94
2020-12-21T00:00:00	6495,22
2020-12-22T00:00:00	5913,16
2020-12-23T00:00:00	5051,64
2020-12-24T00:00:00	3096,31
2020-12-25T00:00:00	1367,04
2020-12-26T00:00:00	1519,23
2020-12-27T00:00:00	3382
2020-12-28T00:00:00	2950,35
2020-12-29T00:00:00	1872,56
2020-12-30T00:00:00	1840,52
2020-12-31T00:00:00	5617,68
2021-01-01T00:00:00	5796,57
2021-01-02T00:00:00	4550,57
2021-01-03T00:00:00	2130,66
2021-01-04T00:00:00	1530,8
2021-01-05T00:00:00	2931,66
2021-01-06T00:00:00	3220,02
2021-01-07T00:00:00	3366,87
2021-01-08T00:00:00	2896,95
2021-01-09T00:00:00	4644,91
2021-01-10T00:00:00	6185,5
2021-01-11T00:00:00	6577,1
2021-01-12T00:00:00	6126,76
2021-01-13T00:00:00	6641,18
2021-01-14T00:00:00	6391,98

2021-01-15T00:00:00	2155,58
2021-01-16T00:00:00	3176,41
2021-01-17T00:00:00	7109,32
2021-01-18T00:00:00	6658,09
2021-01-19T00:00:00	6074,25
2021-01-20T00:00:00	2435,93
2021-01-21T00:00:00	4181,22
2021-01-22T00:00:00	3359,75
2021-01-23T00:00:00	5139,75
2021-01-24T00:00:00	5234,09
2021-01-25T00:00:00	6614,48
2021-01-26T00:00:00	5012,48
2021-01-27T00:00:00	6798,71
2021-01-28T00:00:00	5416,54
2021-01-29T00:00:00	6246,91
2021-01-30T00:00:00	4673,39
2021-01-31T00:00:00	7443,96
2021-02-01T00:00:00	5817,04
2021-02-02T00:00:00	6504,12
2021-02-03T00:00:00	4837,15
2021-02-04T00:00:00	6610,92
2021-02-05T00:00:00	4838,04
2021-02-06T00:00:00	7103,09
2021-02-07T00:00:00	6581,55
2021-02-08T00:00:00	3547,54
2021-02-09T00:00:00	3770,04
2021-02-10T00:00:00	3734,44
2021-02-11T00:00:00	4959,08

2021-02-12T00:00:00	2839,99
2021-02-13T00:00:00	6288,74
2021-02-14T00:00:00	5756,52
2021-02-15T00:00:00	5473,5
2021-02-16T00:00:00	4344,98
2021-02-17T00:00:00	4618,21
2021-02-18T00:00:00	3520,84
2021-02-19T00:00:00	3323,26
2021-02-20T00:00:00	5533,13
2021-02-21T00:00:00	3255,62
2021-02-22T00:00:00	2921,87
2021-02-23T00:00:00	5115,72
2021-02-24T00:00:00	5008,03
2021-02-25T00:00:00	4873,64
2021-02-26T00:00:00	6016,4
2021-02-27T00:00:00	5006,25
2021-02-28T00:00:00	2587,23
2021-03-01T00:00:00	1482,74
2021-03-02T00:00:00	2328,24
2021-03-03T00:00:00	2986,84
2021-03-04T00:00:00	3502,15

Anexo 3

Base de datos Eólico otorgados por la empresa METEOBLUE

2021-01-26T00:00:00	11,919064	1,2369317	194,03624
2021-01-26T01:00:00	12,659063	1,2083046	204,44395
2021-01-26T02:00:00	13,339062	0,9	180
2021-01-26T03:00:00	12,639063	1,0198039	168,69006
2021-01-26T04:00:00	12,269062	1,5	180
2021-01-26T05:00:00	11,569063	1,8027756	183,17982
2021-01-26T06:00:00	10,879063	2,0099752	185,71059
2021-01-26T07:00:00	11,679062	2,657066	199,79887
2021-01-26T08:00:00	15,349062	0,5	126,869896
2021-01-26T09:00:00	17,239063	1,8384775	44,999985
2021-01-26T10:00:00	18,439062	2,4207437	38,290146
2021-01-26T11:00:00	19,569061	3,3615475	30,37912
2021-01-26T12:00:00	20,269062	4,016217	18,886078
2021-01-26T13:00:00	18,429062	4,0199504	5,7105865
2021-01-26T14:00:00	18,279062	4,20119	358,63608
2021-01-26T15:00:00	17,799063	3,5	360
2021-01-26T16:00:00	17,059063	3,1320918	16,69925
2021-01-26T17:00:00	16,439062	2,9120438	15,945404
2021-01-26T18:00:00	14,729063	2,4515302	11,76828
2021-01-26T19:00:00	13,509062	0,92195445	12,528809
2021-01-26T20:00:00	13,489063	0,22360681	63,43495
2021-01-26T21:00:00	13,569063	0,1	180
2021-01-26T22:00:00	13,549063	0,14142136	135
2021-01-26T23:00:00	13,489063	0,1	180
2021-01-27T00:00:00	13,089062	0,86023253	234,46233

2021-01-27T01:00:00	13,199062	0,89442724	206,56505
2021-01-27T02:00:00	13,399063	0,8	180
2021-01-27T03:00:00	13,019062	0,8062258	150,25511
2021-01-27T04:00:00	12,0390625	1,2041595	175,23636
2021-01-27T05:00:00	12,149063	1,6763055	197,35403
2021-01-27T06:00:00	12,399063	1,4	180
2021-01-27T07:00:00	11,609062	2,109502	185,44034
2021-01-27T08:00:00	15,089062	0,94868326	161,56505
2021-01-27T09:00:00	16,799063	0,64031243	51,34018
2021-01-27T10:00:00	18,309063	1,8973665	18,434952
2021-01-27T11:00:00	19,339062	3,471311	11,633621
2021-01-27T12:00:00	19,919062	4,5	360
2021-01-27T13:00:00	20,399063	4,341659	352,05652
2021-01-27T14:00:00	20,569061	3,4481878	16,858398
2021-01-27T15:00:00	19,389063	3,5510561	32,347427
2021-01-27T16:00:00	17,649063	3,0675724	19,025604
2021-01-27T17:00:00	15,699062	2,2847319	23,198593
2021-01-27T18:00:00	14,389063	1,4560219	15,945404
2021-01-27T19:00:00	13,589062	0,70710677	351,8699
2021-01-27T20:00:00	13,919064	0,22360681	333,43497
2021-12-26T18:00:00	14,349062	1,2	360
2021-12-26T19:00:00	13,349062	0,5	360
2021-12-26T20:00:00	13,009062	0,4	270
2021-12-26T21:00:00	13,269062	0,5830952	239,03624
2021-12-26T22:00:00	13,349062	0,56568545	225
2021-12-26T23:00:00	12,909063	0,31622776	198,43495
2021-12-27T00:00:00	12,449062	0,4	180
2021-12-27T01:00:00	12,209063	0,5	216,8699

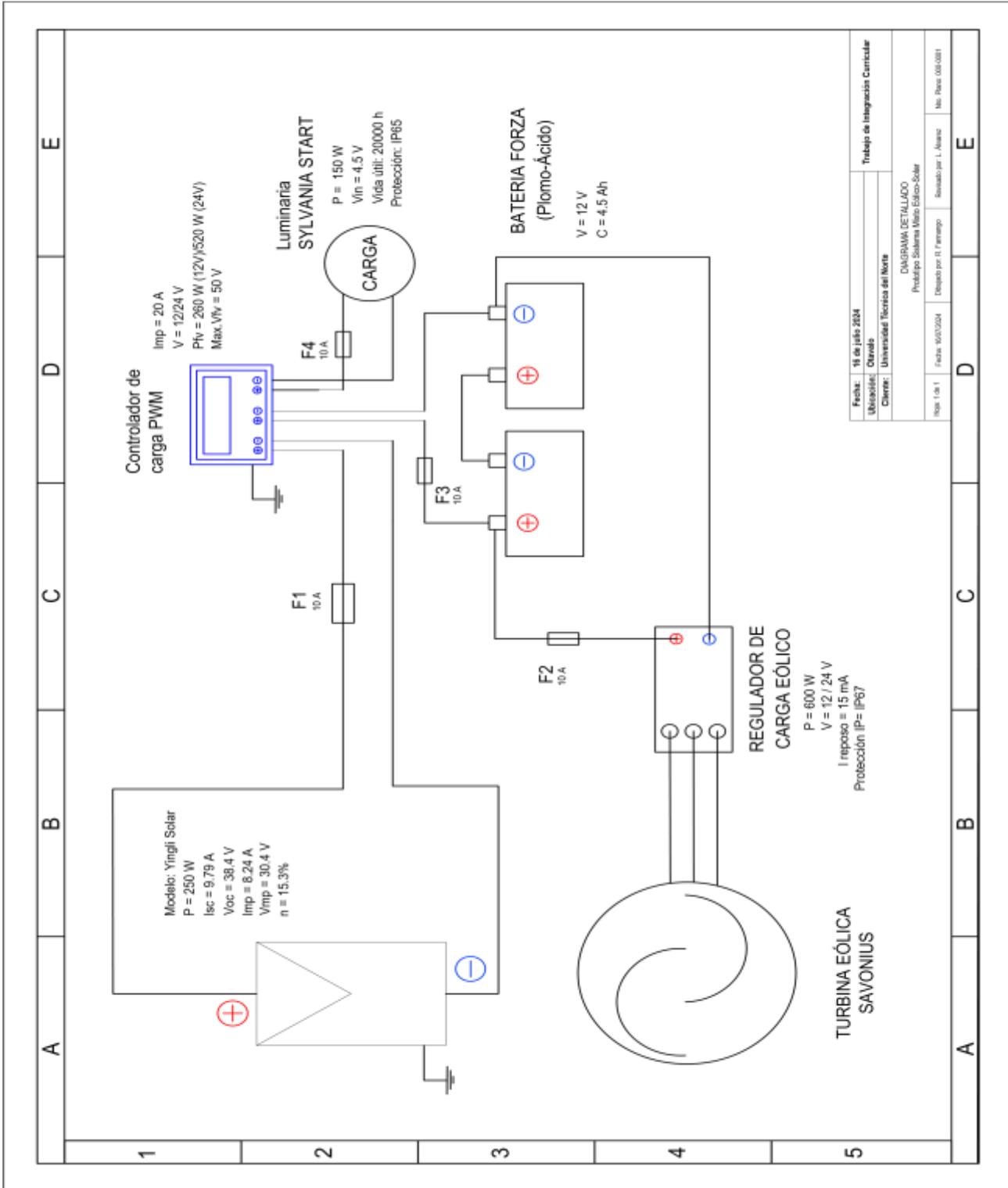
2021-12-27T02:00:00	12,109062	0,5830952	239,03624
2021-12-27T03:00:00	11,839062	0,41231057	194,03624
2021-12-27T04:00:00	11,449062	0,3	180
2021-12-27T05:00:00	11,069063	0,5	180
2021-12-27T06:00:00	10,739063	0,6	180
2021-12-27T07:00:00	13,339062	1,3416408	153,43495
2021-12-27T08:00:00	15,389063	1,2206556	145,00798
2021-12-27T09:00:00	17,009062	0,6708204	63,43495
2021-12-27T10:00:00	17,969063	1,8439089	12,528809
2021-12-27T11:00:00	19,049063	3,2015622	14,470276
2021-12-27T12:00:00	19,409061	3,8470767	8,972626
2021-12-27T13:00:00	19,519062	3,8639357	10,437485
2021-12-27T14:00:00	17,979063	3,640055	15,945404
2021-12-27T15:00:00	16,739063	3,1016126	20,772247
2021-12-27T16:00:00	16,029062	2,8160257	16,504364
2021-12-27T17:00:00	15,229063	2,2203605	7,765167
2021-12-27T18:00:00	14,379063	1,2041595	355,23636
2021-12-27T19:00:00	13,519062	0,6324555	341,56506
2021-12-27T20:00:00	13,859062	0,4	360
2021-12-27T21:00:00	13,729063	0,36055514	33,690063
2021-12-27T22:00:00	13,549063	0,28284273	44,999985
2021-12-27T23:00:00	13,349062	0,22360681	63,43495
2021-12-28T00:00:00	12,979063	0,2	89,99999
2021-12-28T01:00:00	12,669064	0	180
2021-12-28T02:00:00	12,149063	0,1	180
2021-12-28T03:00:00	11,659063	0,1	180
2021-12-28T04:00:00	11,679062	0,22360681	153,43495
2021-12-28T05:00:00	11,429062	0,36055514	146,30994

2021-12-28T06:00:00	11,149063	0,50990194	168,69006
2021-12-28T07:00:00	12,819063	0,82462114	165,96376
2021-12-28T08:00:00	14,419064	0,42426407	135
2021-12-28T09:00:00	16,469063	0,7211103	33,690063
2021-12-28T10:00:00	18,049063	2,0615528	22,833649
2021-12-28T11:00:00	18,929062	3,1622777	18,434952
2021-12-28T12:00:00	17,999062	3,535534	8,130096
2021-12-28T13:00:00	18,459063	3,5057096	3,2704926
2021-12-28T14:00:00	18,009062	3,306055	3,468216
2021-12-28T15:00:00	17,519062	3,4014704	1,6846771
2021-12-28T16:00:00	16,849062	2,8071337	4,085617
2021-12-28T17:00:00	16,329063	2,3345234	9,865799
2021-12-28T18:00:00	14,889063	1,6	360
2021-12-28T19:00:00	14,399063	1,2	360
2021-12-28T20:00:00	14,159063	1,0770329	21,801407
2021-12-28T21:00:00	13,809063	0,92195445	12,528809
2021-12-28T22:00:00	13,799063	0,70710677	351,8699
2021-12-28T23:00:00	13,989063	0,8	360
2021-12-29T00:00:00	13,779062	0,82462114	14,03624
2021-12-29T01:00:00	13,509062	0,82462114	14,03624
2021-12-29T02:00:00	13,389063	0,82462114	14,03624
2021-12-29T03:00:00	13,309063	0,7615773	23,198593
2021-12-29T04:00:00	13,229063	0,53851646	21,801407
2021-12-29T05:00:00	13,259062	0,3	360
2021-12-29T06:00:00	13,399063	0,14142136	315
2021-12-29T07:00:00	12,349062	1,0770329	158,1986
2021-12-29T08:00:00	14,349062	0,781025	140,19443
2021-12-29T09:00:00	16,079063	0,64031243	38,659805

2021-12-29T10:00:00	17,689062	2,0124612	26,565033
2021-12-29T11:00:00	18,299063	3,354102	10,30484
2021-12-29T12:00:00	17,859062	3,9115217	4,398697
2021-12-29T13:00:00	17,669062	3,5014284	1,6365662
2021-12-29T14:00:00	17,129063	3,0805843	13,134018
2021-12-29T15:00:00	15,929062	2,7313	23,749481
2021-12-29T16:00:00	14,879063	2,236068	26,565033
2021-12-29T17:00:00	14,209063	1,5811388	18,434952
2021-12-29T18:00:00	13,7890625	1,118034	10,30484
2021-12-29T19:00:00	13,559063	0,53851646	21,801407
2021-12-29T20:00:00	13,309063	0,7211103	56,30993
2021-12-29T21:00:00	13,019062	0,6324555	71,56504
2021-12-29T22:00:00	12,729063	0,5	89,99999
2021-12-29T23:00:00	12,579063	0,42426407	135
2021-12-30T00:00:00	12,529062	0,4	180
2021-12-30T01:00:00	12,369062	0,5	180
2021-12-30T02:00:00	11,849062	0,82462114	194,03624
2021-12-30T03:00:00	10,989063	1,2165525	189,46233
2021-12-30T04:00:00	10,759062	1,5033296	183,81407
2021-12-30T05:00:00	10,719063	1,5	180
2021-12-30T06:00:00	10,649063	1,6	180
2021-12-30T07:00:00	11,869062	1,1	180
2021-12-30T08:00:00	13,719063	0,41231057	165,96376
2021-12-30T09:00:00	15,339062	0,3	360
2021-12-30T10:00:00	16,399063	1,4	360
2021-12-30T11:00:00	16,359062	2,4020824	2,3859253
2021-12-30T12:00:00	15,869062	3,1144822	354,47247
2021-12-30T13:00:00	16,859062	2,9	360

Anexo 4

Diagrama detallado de instalación del prototipo eólico-solar



Anexo 5

Código Arduino para toma de datos del prototipo eólico-solar

```
1 //LIBRERIAS PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS DIFERENTES SENSORES
2 //CÓDIGO DE RONALDO FARINANGO
3 #include <EmonLib.h> //Libreria para el funcionamiento del
4 sensor de corriente AC
5 #include <ZMPT101B.h> //Libreria para el funcionamiento del
6 sensor de voltaje AC
7 #include "ACS712.h" //Libreria para el funcionamiento del
8 sensor de corriente DC
9 #include <SPI.h> //Libreria para el funcionamiento del
10 modulo SD Card
11 #include <SD.h> //Libreria para el funcionamiento del
12 modulo SD Card
13
14 #define SENSITIVITY 500.0f //Constante para el
15 funcionamiento del sensor voltaje AC
16 ZMPT101B voltageSensor(A3, 60.0); //Declaracion del pin de
17 conexion del sensor de voltaje AC, y frecuencia de la red
18 ACS712 ACS(A2, 5.0, 1023, 100); //Declaracion del pin de
19 conexion del sensor de corriente DC, Voltaje de entrada 5V, Valor
20 analogico, sensibilidad del sensor
21
22 EnergyMonitor energyMonitor; // Crear un instancia
23 EnergyMonitor para el funcionamiento del sensor de corriente AC
24
25 //////DECLARACION DE PINES ///
26
27 #define sct_pin A0 //Pin analogico de entrada del
28 sensor de corriente AC
29 #define sen_voltajedc A1 //Pin analogico de entrada del
30 sensor de voltaje DC
31 const byte pinSD = 9; //Pin de comunicacion con el
32 modulo de tarjeta ssd
33
34 ////// VARIABLES ////
35
36 double Irms = 0.0; // Valor de la corriente eficaz
37 double potencia = 0.0; // Valor potencia aparente
38 const int voltaje_max= 25000; // 25 Voltios es lo maximo que
39 Arduino puede medir mediante el sensor de voltaje DC
40 float voltaje_dc = 0; // Variable para guardar el valor de
41 voltaje DC
42 float corriente_dc = 0.000; // Variable para guardar el valor de
43 corriente DC
44
45 // Variables tipo string para enviar hacia el modulo sd
46 String S_Voldc = " "; // Variable tipo String para guardar
47 el valor de voltaje dc
48 String S_Ampdc = " "; // Variable tipo String para guardar
49 el valor de corriente dc
```

```

50 String S_Volac = " ";           // Variable tipo String para guardar
51 el valor de voltaje ac
52 String S_Ampac = " ";           // Variable tipo String para guardar
53 el valor de corriente dc
54 String escritura = " ";         // Variable para enviar los datos al
55 archivo excel
56
57 int medicion;                   // Variable para enumerar las
58 mediciones realizadas
59 String s_medicion;              // Variable string para enviar el
60 numero de muestras hacia el excel
61
62 File myFile;                    //Establesco el uso de
63 archivo para ser guardado
64 String nombreArchivo = "/Datos.csv"; //Colocamos el nombre del
65 archivo ha guardar
66
67 void setup() {
68     energyMonitor.current(sct_pin, 2.6 );           // Número de pin:
69 donde tenemos conectado el SCT-013 - valor obtenido de la
70 calibración teórica
71     voltageSensor.setSensitivity(SENSITIVITY); // Iniciamos el
72 sensor de corriente con la sensibilidad establecida
73
74     //CICLO DE INICIO DEL SENSOR DE CORRIENTE DC
75     while (!Serial);
76     Serial.println(__FILE__);
77     Serial.print("ACS712_LIB_VERSION: ");
78     Serial.println(ACS712_LIB_VERSION);
79
80     ACS.autoMidPoint();
81
82     //DECLARACION DE FUNCONAMIENTO DE PINES
83     pinMode(sen_voltajedc, INPUT);
84
85     //BUCLE PARA DETECTAR EL FUNCIONAMIENTO CORRECTO DE SD Card
86     Serial.print("Iniciando SD card...");
87
88     if (!SD.begin(pinSD)) {
89         Serial.println("No se inició la SD");
90         while (1);
91     }
92     Serial.println("Se inició la SD exitosamente");
93
94     //ESCRIBO ENCABEZADO DEL ARCHIVO A CREAR
95     if(!SD.exists(nombreArchivo)) {
96         myFile = SD.open(nombreArchivo, FILE_WRITE);
97         for (int i = 0; i < 3; i++) {
98             if (myFile) {
99                 Serial.println("Archivo nuevo, Escribiendo encabezado");
100                 myFile.println("Medicion N.;Voltaje AC;Voltaje Dc;Corriente
101 AC;Corriente DC");

```

```

102     myFile.close();
103     break;
104 } else {
105     Serial.println("Error creando el archivo " +
106 nombreArchivo);
107     delay(500);
108 }
109 }
110 }
111
112     Serial.begin(115200);
113 }
114
115 void loop() {
116
117     //AUMENTO DEL NUMERO DE CADA MEDICION
118     medicion++;
119     s_medicion = String(medicion);
120
121     //OBTENCION DE VOLTAJE AC MEDIANTE LA LIBRERIA
122     float voltage = voltageSensor.getRmsVoltage();
123     S_Volac = String(voltage);
124     Serial.print("Voltaje AC :");
125     Serial.println(voltage);
126
127     //OBTENCION DE CORRIENTE AC MEDIANTE LA LIBRERIA
128     Irms = energyMonitor.calcIrms(1484);
129     potencia = Irms * voltage;
130     S_Ampac = String(Irms);
131     Serial.print("Corriente AC :");
132     Serial.println(Irms);
133
134     //OBTENCION DE VOLTAJE DC MEDIANTE LA FUNCION
135     Lectura_vdc ();
136     S_Voldc = String(voltaje_dc);
137     Serial.print("Voltaje DC :");
138     Serial.println(voltaje_dc);
139
140
141     //OBTENCION DE CORRIENTE DC MEDIANTE LA FUNCION
142     Lectura_adc ();
143     S_Ampdc = String(corriente_dc);
144     Serial.print("Corriente DC :");
145     Serial.println(corriente_dc);
146     Serial.println(" ");
147
148     //IMPRESION DE TODAS LAS MEDICIONES EN EL ARCHIVO EXCEL
149     escritura = s_medicion + ";" + S_Volac + ";" + S_Voldc + ";" +
150 S_Ampac + ";" + S_Ampdc;
151
152     //CONDICIONAL PARA DETECTAR UN ERROR AL GUARDAR LOS DATOS EN EL
153 EXCEL

```

```

154     myFile = SD.open(nombreArchivo, FILE_WRITE);
155     if (myFile) {
156         myFile.println(escritura);
157         myFile.close();
158     }else{
        Serial.println("Error al abrir el archivo " +
nombreArchivo);
    }

    delay(600000); // Tiempo de espera de 10 minutos para realizar
cada medicion

}

// FUNCION PARA LA OBTENCION DE VOLTAJE DC
void Lectura_vdc () {
    voltaje_dc = map(analogRead(sen_voltajedc), 0, 1023, 0,
voltaje_max)/1000.0; // Pasamos el valor de la lectura analogica a
el valor del voltaje
    voltaje_dc = voltaje_dc*2;
}

// FUNCION PARA LA OBTENCION DE CORRIENTE DC
void Lectura_adc () {
    float mA = ACS.mA_DC();
    corriente_dc =(mA/1000);

    if (Serial.available() > 0)
    {
        char c = Serial.read();
        if (c == '+') ACS.incMidPoint();
        if (c == '-') ACS.decMidPoint();
        if (c == '0') ACS.setMidPoint(512);
        Serial.println(ACS.getMidPoint());

        if (c == '*') ACS.setmVperAmp(ACS.getmVperAmp() * 1.05);
        if (c == '/') ACS.setmVperAmp(ACS.getmVperAmp() / 1.05);
        Serial.println(ACS.getmVperAmp());
    }
}
}

```

Anexo 6

Luminaria elegida bajo REGULACIÓN CONELEC 005/14 (2015)

SYLVANIA

START

LED Solar
LED STREET SOLAR
P23998



Sistema integral de iluminación LED Solar Sylvania Start, con una estructura unificada que incluye luminaria LED, panel solar, controlador y baterías de litio. Esta innovadora tecnología ofrece una forma conveniente y sostenible de iluminar áreas exteriores y senderos con un mínimo de inversión y mantenimiento, pues no requiere un punto eléctrico o conexión a la red de suministro de energía.

CARACTERÍSTICAS

Luminaria LED integrada con batería de litio de gran capacidad de almacenamiento de carga en proceso de conversión de la energía.

Sensor de movimiento integrado de rango de hasta 4 mt.

APLICACIONES

Alumbrado exterior en parques, senderos peatonales, jardines, terrazas.

Áreas comunes en conjuntos residenciales.

Con radiación solar directa con más de 6 horas al día



DATOS ÓPTICOS

Temperatura de color	6500K (DL)
Flujo luminoso inicial	2673-8100 lm
Apertura haz de luz	90x70°
Reproducción de color (IRC)	>70
Vida útil LED	20.000 hrs
Eficacia inicial LED	
Garantía	1 Año

DATOS FÍSICOS

Tipo panel solar	Silicio policristalino
Acabado housing	ABS Negro
Grado de protección	IP65
Dimensiones (LxWxH)	505x233x75 mm
Peso Kg	1.7 Kg
Tipo de montaje	Brazo
Temperatura de operación Ta	-20°C ~ 45°C

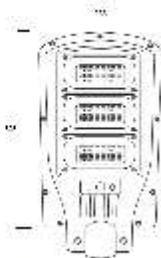
DATOS ELÉCTRICOS

Potencia Panel	150W
Batería	LiFePO4 3.2V 4000mAh
Tiempo de carga	8-10h/día*
Autonomía	Según programación
Sensor	PIR
Función sensor	encendido/apagado
Rango sensor	5/4 mt

*El flujo luminoso puede reducirse por efectos de la temperatura de operación y de la temperatura ambiente.

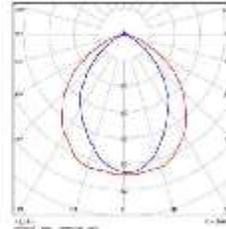
* El desempeño (lumen inicial, autonomía y tiempo de carga) del producto depende de las condiciones particulares de instalación respecto a horas de luz diurna, nubosidad, clima, y sombras provenientes de construcciones y objetos cercanos.

DIMENSIONES



Las características de los productos pueden ser modificadas sin previo aviso según la evolución de la tecnología LED. 12/21.

FOTOMETRIA



Producto Ecológico:
Permite ahorrar energía comparado con productos tradicionales. Libre de mercurio.

by FEILO SYLVANIA