



Diseño de un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica en un parque del barrio las Flores de la ciudad de Barranquilla

**Juan Carlos Maldonado Moreno
Jair de Jesús Cervantes Nobles**

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

2021

Diseño de un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica en un parque del barrio las Flores de la ciudad de Barranquilla

**Juan Carlos Maldonado Moreno
Jair de Jesús Cervantes Nobles**

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

Director (a):
Ingeniero Fabio Bermejo

Línea de Investigación:
Energía renovables
Grupo de Investigación:
Gifourier

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

2021

(Dedicatoria o lema)

Todo esfuerzo tiene su recompensa, esas fueron las palabras que se gravaron en mi mente cuando era solo un niño, después de cumplir con mis obligaciones del hogar.

Desde ese día sé que todas las metas que nos proponamos se obtendrán, después que se les dedique tiempo, amor y esfuerzo.

Gracias a la dedicación y esfuerzo de nuestros padres, esposas e hijos hemos llegado hasta este momento, el cual un día soñamos y hoy se hace realidad.

Gracias a todos los que nunca nos dejaron desfallecer en el intento de lograr este sueño

Todo esfuerzo tiene su recompensa.

Agradecimientos

Dedico este espacio para expresar mi eterno agradecimiento a Dios y a todas aquellas personas que de una u otra manera nos han ayudado a la realización de este proyecto de graduación en especial al profesor Ing. Fabio bermejo, director del proyecto, por todo su conocimiento y orientación que nos brindó durante este proceso. A Roger rodríguez por su aporte y asesoría en el área de diseño. A Alexis Gutiérrez por su apoyo en el desplazamiento a los diferentes lugares durante la ejecución del proyecto. A Daniel cabrera por su aporte en la orientación durante la georreferenciación. A nuestros padres por brindarnos siempre un buen consejo y su mano cuando se necesitó. A nuestras esposas por todas esas horas en las cuales no compartimos con ellas. A nuestros hijos por darnos la fuerza cuando creíamos que ya no podíamos más. A todos los profesores de la Universidad Antonio Nariño por sus conocimientos y enseñanzas. Por último y no menos importante a todos los compañeros de los cuales aprendimos muchas cosas como el trabajo en equipo y la amistad.

Resumen

En el presente proyecto se evidencio el diseño de un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica para el Parque de la 86 del barrio las Flores de la ciudad de Barranquilla, con el fin de mejorar la seguridad de sus moradores por deficiencia en iluminación, por la mala prestación del servicio eléctrico del proveedor de energía en horas nocturnas y colaborar con la disminución de la contaminación ambiental en el mundo por uso de energías no renovables. El diseño contempla la mejora de la iluminación, la reparación del sistema de conectividad del parque, el dimensionamiento de las cargas eléctricas requeridas. La caracterización de la energía eólica en el lugar donde proyecta el diseño.

Se evidencio el desarrollo matemático, el dimensionamiento y la selección de todos los elementos que componen el sistema, el modelamiento geométrico del aerogenerador en el software de SolidWorks, la simulación del funcionamiento del aerogenerador y planimetría general del proyecto desarrollada en el software de diseño AutoCAD.

Teniendo como resultado final la lista de componentes requeridos y el presupuesto, que, por ser de un monto considerable, se propone buscar alternativas de menor costo para proyectos a futuros, como podría ser el diseño y la fabricación de un aerogenerador con materiales de bajo costo.

Palabras clave: Energía eólica, aerogenerador, electricidad, potencia eléctrica, iluminación.

Abstract

In this project, the design of an electricity generation system from wind energy was evidenced for the 86 Park of the Las Flores neighborhood of the city of Barranquilla, in order to improve the safety of its residents due to deficiency in lighting, due to the poor provision of electrical service by the energy provider at night and collaborating with the reduction of environmental pollution in the world due to the use of non-renewable energies. The design includes the improvement of the lighting, the repair of the park's connectivity system, the sizing of the required electrical loads. The characterization of wind energy in the place where the design projects.

mathematical development was evidenced, the sizing and selection of all the elements that make up the system, the geometric modeling of the wind turbine in SolidWorks software, the simulation of the operation of the wind turbine and general planimetry of the project developed in the AutoCAD design software.

Having as a final result the list of required components and the budget, which, since it is a considerable amount, proposes to look for lower-cost alternatives for future projects, how could it be the design and manufacture of an autogenerator with low-cost of materials.

Keywords: Wind energy, electrical energy, wind turbine, connectivity, electrical power, lighting.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Lista de figuras	XIV
Lista de tablas	XVI
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVII
Introducción	1
1. Generalidades	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general	4
1.2.2 Objetivo específicos	5
1.3 Justificación.....	5
1.4 Delimitación.....	5
2. Fundamentos teóricos.....	6
2.1 Antecedentes de la investigación	6
2.2 Fundamentos de la energía eólica	8
2.2.1 Breve historia de la energía eólica.....	8
2.2.2 Energía eólica.....	9
• Procedencia de la energía eólica.....	10
• Variación de viento	10
2.3 Obtención y tratamiento de datos de viento	11
2.3.1 Parámetros representativos del potencial eólico.....	11
2.3.2 Toma de medidas.....	12
• Instrumentación	12
• Frecuencia y duración de las medidas	16
• Ubicación de los sensores	17
• Elección de los instrumentos de medida	17
2.3.3 Tratamiento de los datos eólicos	17
• Distribución de direcciones	17
2.4 Aerogenerador	18
2.4.1 Tipos de aerogeneradores	18
2.4.2 Funcionamiento de un aerogenerador.....	22
2.4.3 Partes de un aerogenerador	24

3. Metodología de la investigación.....	26
3.1 Caracterización	26
3.1.1 Necesidades del parque objeto del proyecto.....	26
3.1.2 Características del parque.....	26
3.1.3 Caracterización de la energía eólica	31
3.2 Cálculos de diseño.....	35
3.2.1 Cálculos de iluminación.....	35
3.2.2 Dimensionamiento de la carga eléctrica del sistema	37
3.2.3 Dimensionamiento Aerogenerador	37
3.2.4 Dimensionamiento banco de baterías	44
3.2.5 Dimensionamiento regulador	46
3.2.6 Dimensionamiento inversor.....	47
3.2.7 Cableado.....	47
3.3 Elaboración del aerogenerador en SolidWorks	49
3.4 Simulación CFD	52
3.4.1 Procedimiento de la simulación CFD.....	52
3.4.2 Pasos en una simulación CFD.....	52
• Preparación de la pieza a simular.....	52
• Solución de las ecuaciones.....	53
• Análisis de los resultados.....	53
3.4.3 Verificación de la independencia de la malla.....	53
• Mallas estructuradas	53
• Mallas no estructuradas	54
3.4.4 Condiciones de contorno e iniciales.....	54
4. Resultados y discusión	56
4.1 Cálculo de iluminación	56
4.2 Caracterización energética eléctrica del parque	61
4.3 Dimensionamiento de componentes del sistema.....	61
4.3.1 Aerogenerador.....	61
4.3.2 Banco de baterías.....	62
4.3.3 Regulador de carga	63
4.3.4 Inversor	63
4.3.5 Cableado.....	63
4.4 Selección de componentes y especificaciones técnicas.....	66
4.4.1 Aerogenerador.....	66
4.4.2 Banco de baterías.....	67
4.4.3 Regulador de carga	67
4.4.4 Inversor.....	68
4.4.5 Cableado.....	68
4.4.6 Conectividad y tomas corrientes	69
4.5 Elaboración de planos y CAD isométrico del aerogenerador	70
4.6 Listado de componentes.....	72
4.7 Simulación del funcionamiento del aerogenerador	73
4.8 Presupuesto	74
5. Conclusiones y recomendaciones	75
Bibliografía	77
Anexo A: Plano diagrama de conexiones sistema.....	79

Anexo B:	81
Plano distribución de componentes tablero #1	81
Anexo C:	82
Plano distribución de componentes tablero #2	82

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Vista frontal Parque de la 86.....	4
Figura 1-2: Vista lateral Parque de la 86.....	4
Figura 2-1: Distribución de Weibull	11
Figura 2-2: Anemómetro de cazoletas	13
Figura 2-3: Anemómetro de hélice	14
Figura 2-4: Anemómetro de presión.....	14
Figura 2-5: Veleta	15
Figura 2-6: Termómetro meteorológico digital	15
Figura 2-7: Barómetro meteorológico digital	16
Figura 2-8: Rosa de los vientos en la ciudad de Sincelejo.....	18
Figura 2-9: Velocidad media por direcciones.....	18
Figura 2-10: Aerogenerador Savonius	19
Figura 2-11: Aerogenerador Darrieus	20
Figura 2-12: Aerogenerador Giromill.....	20
Figura 2-13: Aerogenerador multipala.....	21
Figura 2-14: Aerogenerador tipo hélice.....	22
Figura 2-15: Coeficiente de potencia	23
Figura 2-16: Potencia de un aerogenerador	23
Figura 2-17: Partes de un aerogenerador.....	24
Figura 3-1: Visita a campo Parque de la 86.....	27
Figura 3-2: Plano vista superior Parque de la 86.....	29
Figura 3-3: Medición del área del Parque de la 86, Unidad: m ²	31
Figura 3-4: Coordenadas geográficas Parque de la 86.....	32
Figura 3-5: Recurso eólico Parque de la 86.....	33
Figura 3-6: Histograma de los valores de velocidad de viento en m/s Parque de la 86 ..	34
Figura 3-7: Rosa de viento Parque de la 86	34
Figura 3-8: Modelo de Betz	40
Figura 3-9: Tipos de conexión banco de baterías.....	46
Figura 3-10: Plano 3D aerogenerador en DWG unidades en milímetros.....	50
Figura 3-11: Cambio de escala dibujo 3D aerogenerador.....	50
Figura 3-12: Importación dibujo aerogenerador de AutoCAD a SolidWorks.....	51
Figura 3-13: Dibujo aerogenerador en SolidWorks.....	52
Figura 3-14: Mallas con puntos en el centro y puntos en los vértices.....	54

Figura 3-15: Condición de contorno de no deslizamiento (izquierda) y de tangencia (derecha) en el contacto del flujo con una superficie.....	55
Figura 4-1: Proyector Sylveo Led RGBW	56
Figura 4-2: Plano ubicación de luminarias Parque de la 86	59
Figura 4-3: Graficas de producción aerogenerador E30PRO.....	66
Figura 4-4: CAD isométrico del aerogenerador vista frontal	70
Figura 4-5: CAD isométrico del aerogenerador vista izquierda	70
Figura 4-6: Simulación de flujo	73
Figura 4-7: Simulación de presiones sobre una sección de un aspa.....	73

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 3-1: Producción eólica en el año parque de la 86.....	33
Tabla 3-2: Fotometría mínima en áreas críticas distintas a vías vehiculares.....	35
Tabla 3-3: Cables Centelsa THW/THHW-LS 600V con aislamiento de PVC.....	49
Tabla 4-1: Cálculo de numero de luminarias requeridas	57
Tabla 4-2: Dimensionamiento de carga eléctrica sistema	61
Tabla 4-3: Cálculo dimensionamiento aerogenerador	62
Tabla 4-4: Cálculo dimensionamiento del banco de baterías	62
Tabla 4-5: Cálculo dimensionamiento del regulador de carga.....	63
Tabla 4-6: Cálculo dimensionamiento del inversor	63
Tabla 4-7: Cálculo conductor aerogenerador – regulador	64
Tabla 4-8: Cálculo conductor regulador – batería.....	64
Tabla 4-9: Cálculo conductor regulador – inversor	65
Tabla 4-10: Cálculo conductor inversor - carga	65
Tabla 4-11: Especificaciones técnicas aerogenerador	66
Tabla 4-12: Especificaciones técnicas baterías	67
Tabla 4-13: Especificaciones técnicas regulador de carga.....	67
Tabla 4-14: Especificaciones técnicas inversor.....	68
Tabla 4-15: Especificaciones técnicas equipo de conectividad	69
Tabla 4-16: Especificaciones técnicas toma corriente	69
Tabla 4-17: Listado de componentes	72
Tabla 4-18: Presupuesto.....	74

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI
A	Área	m^2
ρ	Densidad	kg/m^3
Lm	Flujo luminoso	lumen
W	Potencia eléctrica	vatio
V	Voltaje	Volt
I	Corriente	Amp
Hz	Frecuencia	hercio
η	Rendimiento	%
L	Luminancia	Candela/ m^2
v	Velocidad	m/s

Abreviaturas

Abreviatura	Término
CAD	Diseño asistido por computador
VAC	Voltaje de corriente alterna
CFD	Dinámica de fluidos computacional
MW	Mega Watios un millón de vatios
MWh/año	Megavatio-hora/año
KWh/día	Kilovatios-hora/día
KW	Kilo Watios 1000 vatios
GIMUP	Grupo de Investigaciones en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona
RMSE	Medida de uso frecuente de las diferencias entre los valores (valores de muestra o de población)
CO ₂	Dióxido de carbono
GRP	(Glass Reinforced Plastic) Plástico reforzado con vidrio
Eprom	Iluminancia media dada (lx)
RETILAP	Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público
AutoCAD	Software de diseño asistido por ordenador, para crear dibujos precisos en 2D y 3D.
SolidWorks	Software tipo CAD, de diseño mecánico
FlowSimulation	Herramienta de simulación de flujo de fluidos
DesingFoil	Herramienta de software de perfil aerodinámico basada en Windows / Linux

Weibull	Técnica mayormente escogida para estimar una probabilidad basada en datos medidos o asumidos
Interdistancia	Distancia entre postes
Coriolis	Es una fuerza a la que se sujetan los fluidos del planeta que están en desplazamiento
Límite de Betz	Es la máxima energía posible que se puede derivar por medio de un rotor infinitamente delgado de un fluido que fluye a una cierta velocidad

Introducción

La energía eléctrica cumple un papel fundamental en el desarrollo social y económico de la humanidad, En este sentido, la población mundial requiere de energía para cubrir sus necesidades básicas de alimentación e iluminación y conectividad, sobre todo en estos tiempos de pandemia mundial, en los cuales se ha incrementado el trabajo desde casa y estudio virtual.

Existen diferentes fuentes generadoras de energía eléctrica, como son: hidráulica, carbón, eólica, gas natural, petróleo, térmica y solar entre otras, estas suelen clasificarse en energías renovables y no renovables.

Teniendo en cuenta la contaminación ambiental debido al uso de energías no renovables como el carbón, petróleo y gas natural, se hace necesario el uso de una energía renovable que se amigable con el medio ambiente.

Por su posición geográfica la ciudad de Barranquilla, cuenta con una fuente de energía renovable como es el viento, por tal motivo es viable el uso de la energía eólica como generación para el suministro de energía que contribuya a satisfacer las necesidades de energía y conectividad en un parque público de una zona vulnerable.

1. Generalidades

1.1 Planteamiento del problema

La costa caribe colombiana en los últimos años se ha visto afectada por la mala prestación del servicio de energía eléctrica (razonamientos y fluctuaciones de tensión) por parte del operador de servicio de energía, en la actualidad se cuenta con un proveedor nuevo en etapa de transición y a un no se evidencia mejora en la prestación del servicio de energía eléctrica, debido a esta situación se hace necesario la utilización del uso de energía eléctrica independiente al servicio prestado por el operador, debido a esta problemática, como lo es la energía renovable a través de un sistema de generación eólica. El parque no cuenta con un suministro de energía autónomo para la alimentación del circuito de alumbrado del parque, por lo que cualquier falla del suministro de energía en horas de la noche, aumenta la inseguridad del parque y sus alrededores.

Teniendo en cuenta estas necesidades el proyecto le apunta a uno de los objetivos de desarrollo sostenible del plan del gobierno nacional y va en caminado a satisfacer el suministro de energía eléctrica para la iluminación y conectividad del Parque de la 86 del barrio Las Flores de la ciudad de Barranquilla, que tiene las siguientes características: Temperatura promedio: 28° C, humedad relativa entre el 79% y el 81%, velocidad del viento: 3.9 m/seg, datos tomados del Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas Cartagena – Colombia [9].

Las cargas eléctricas asociadas a parque público son: 3 toma corriente de 110 VAC, 6 luminarias de 50 Watios y 1 Access point o Wireless Access point.

El parque se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud: 11.04344, Longitud: -74.82630.



Figura 1-1: Vista frontal Parque de la 86
Fuente: Autores



Figura 1-2: Vista lateral Parque de la 86
Fuente: Autores

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica disponible en el Parque de la 86 del barrio Las Flores de la ciudad de Barranquilla.

1.2.2 Objetivo específicos

Para atender el objetivo general de la investigación, tres objetivos específicos han sido formulados:

- ✓ Caracterizar la energía eólica disponible en el barrio las flores que pueda abastecer el consumo eléctrico del parque.
- ✓ Calcular los parámetros operativos del aerogenerador de acuerdo a las necesidades energéticas del parque
- ✓ Simular el funcionamiento del aerogenerador diseñado mediante herramientas CFD, el cual será de ayuda didáctica para el aprendizaje en la signatura de mecánica fluidos. (diseño en SolidWorks de las hélices)

1.3 Justificación

Los problemas de contaminación medioambiental en el mundo debido a la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural) son causantes del calentamiento global, de los problemas de contaminación urbana y de la lluvia acida, por lo surge la necesidad que la ciudad empiece a trabajar con energías renovables amigable con el medio ambiente.

Al tener un suministro de energía autónomo para la alimentación del circuito de alumbrado del parque, permite contar con un sistema de iluminación permanente que mejoraría sustancialmente la seguridad del parque y sus alrededores.

Al ser un sistema autónomo y su inversión económica es auto sostenible en el tiempo, disminuyendo el suministro de energía de alumbrado público en la ciudad, este proyecto puede ser replicado en otros parques, mejorando la calidad de vida a las personas en sus alrededores, creando espacios públicos con disponibilidad de conectividad que permita a la población usuaria del parque poder realizar sus actividades escolares y entrenamiento.

1.4 Delimitación

- ✓ Delimitación espacial. Este estudio se realiza en Colombia, departamento del Atlántico, en la ciudad de Barranquilla, barrio Las Flores, Parque de la 86, dirigidos a los estratos socio económicos 1 y 2.

- ✓ Delimitación temporal. Este estudio tiene sus inicios en el mes de febrero del 2021 y su fecha estimada de terminación es el mes junio del 2021.
- ✓ Delimitación temática. El desarrollo de la investigación es diseñar un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica, para el abastecimiento eléctrico de un parque público.

2. Fundamentos teóricos

2.1 Antecedentes de la investigación

Se realizó una investigación con la intención de encontrar proyectos de grado relacionados con diseños de sistemas de generación de electricidad a partir de la energía eólica en el país y en el mundo. En los siguientes estudios y tesis encontraremos como a través de los años, el interés por la generación de electricidad a través de la energía eólica ha ido en aumento de la mano de los avances tecnológicos en este campo.

En la tesis realizada por Catalina (2018), identifico en el departamento de Boyacá oportunidades de desarrollo eólico, mediante el planteamiento de cuatro parques eólicos con capacidad total instalada de 52,5 MW, mediante 21 aerogeneradores de potencia nominal de 2,5 MW que producirían una energía neta de 200020 MWh/año con factores de carga superiores al promedio global ponderado del 2017 para la energía eólica “onshore”. En la evaluación de los proyectos se obtuvieron indicadores financieros positivos que hacen atractivos los proyectos bajo ciertas condiciones [1].

A su vez Jiménez et al. (2016), Realizaron el estudio y evaluación de un proyecto de energía en eólica por medio de la aplicación de las opciones reales. En donde identificaron las principales características y las incertidumbres de este tipo de inversiones, lo que justifica el uso de las opciones reales junto con los métodos tradicionales, aplicando las opciones reales, la administración del proyecto puede analizar las condiciones del mercado a medida que se obtiene información y la incertidumbre se reduce. Esta obtención de

información más completa y realista, permite evitar pérdidas y obtener mayores ganancias del proyecto durante los cinco años de evaluación [2].

Desde el ámbito nacional, se toma como referencia un estudio realizado por Perdomo et al. (2014), quienes estudiaron la disponibilidad de la tecnología actual y la capacidad de generación de la energía eólica frente a la reducción de costos de producción y el impacto sobre el medioambiente en Colombia [3].

En la tesis realizada por Orozco (2014), se muestra un estudio sobre la comparación de herramientas de diseño tales como SolidWorks y FlowSimulation contra DesingFoil las cuales permiten simular el comportamiento del perfil eólico en un túnel de viento (FlowSimulation) y el comportamiento del álabe en condiciones simuladas de viento (SolidWorks), con el fin de caracterizar las variables de álabes de aerogeneradores eólicos de baja velocidad de viento los cuales usando la teoría de la sustentación y arrastre para aeronaves, permite obtener un perfil para una pala de aerogenerador [4].

En este artículo Serrano (2013), realiza un análisis y comparación de cinco métodos numéricos para el análisis de la efectividad en determinar los parámetros de la distribución de Weibull, usando datos de velocidad del viento registrados en la ciudad de Pamplona, en la región nororiental de Colombia, para el periodo comprendido entre enero de 2006 y noviembre de 2007, los registros fueron obtenidos por el Grupo de Investigaciones en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Pamplona (GIMUP) y manejo de la base de datos por el grupo de Ciencias Computacionales. La efectividad de estos métodos se realiza usando la prueba de Chi-cuadrado, el método de análisis de varianza y raíz cuadrada del error cuadrático medio RMSE, observando que el método de los momentos presenta un mejor ajuste en la determinación de los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull [5].

Por su parte, Giménez et al. (2011), consideraron de gran importancia realizar un estudio analítico de los esquemas de funcionamiento de los generadores eólicos, con el fin de concluir cuales son los que producen la mayor transferencia de energía, mejorando el aprovechamiento del viento y considerando su impacto desde el punto de vista eléctrico. Los investigadores obtuvieron como resultado que existe una fuerte interacción entre las potencias relativas del generador y el sistema en su punto de conexión [6].

En este artículo los investigadores Escalante et al. (2011), se enfocan en desarrollar un prototipo experimental en el cual se implementa un esquema para maximizar la eficiencia en la obtención de energía eólica con un generador síncrono de imanes permanentes.

Obtienen de manera experimental los parámetros que se emplean en el modelo matemático del generador síncrono con el fin de representar la dinámica que rige su comportamiento [7].

Según López et al. (2007), Aborda en su artículo algunas de las soluciones actuales más utilizadas de los sistemas de generación eólica, enfatizando en los fundamentos del control y el diseño de aplicaciones individuales de potencia reducida. Lo previo, orientado a pequeños sistemas de potencia rurales o aislados, donde la conexión a la red pública es difícil o muy costosa. Se examinan los elementos en común y diferencias de las diversas propuestas existentes, ventajas y desventajas, su potencial y lo que se puede esperar de sus tendencias en el mediano y largo plazo [8].

La diferencia de este proyecto respecto a los antecedentes encontrados, es la población a la cual beneficiara, debido al que el proyecto va encaminado a suministrar energía eléctrica autónoma renovable y amigable con el medio ambiente a un parque público para una población de estratos socioeconómicos 1 y 2 de la ciudad de Barranquilla, para disminuir la inseguridad y fomentar actividades deportivas, recreativas y de conectividad a sus habitantes.

2.2 Fundamentos de la energía eólica

Este subtítulo detalla ampliamente la fundamentación teórica y conceptos básicos relacionados con el proyecto de investigación.

2.2.1 Breve historia de la energía eólica

Durante mucho tiempo el planeta tierra nos ha brindado grandes corrientes de aire las cuales son generadas en la atmosfera gracias a sucesos naturales.

Estas corrientes de aire también llamadas viento han ayudado al hombre desde hace mucho tiempo para realizar algunas actividades diarias como regar cultivos y procesar el grano. Uno de los primeros pueblos fueron los persas actual mente conocido como (IRÁN) para el siglo VII d. c. los pueblos persas empleaban molinos bastantes rudimentarios los cuales consistían en una rueda con aspas las cuales estaban soportadas sobre un eje vertical.

En países como Inglaterra y Francia se desarrollaron las primeras turbinas eólicas, construidas con madera las cuales fueron llamadas torres de molino estas torres fueron adoptadas por toda Europa

En el siglo XIV se desarrolló un molino el cual su torre estaba construida en piedra contaba con una estructura giratoria de madera el cual soportaba el eje del molino, el tamaño de las aspas de estos molinos era entre 3 y 9 metros este tipo de molino fue llamado molino de torre.

En el año 1745 se introdujo el abanico de aspas el cual era impulsado por el viento esto representó un gran avance.

Para el año de 1772 se introdujo las aspas con resortes.

Durante el siglo XIX los molinos de vientos tomaron gran importancia en estados unidos por el movimiento de los colonos hacia las llanuras, donde la necesidad de suministrar agua a las grandes cantidades de ganado y el suministro de agua a las locomotoras impulso esta tecnología.

Para el siglo XX la gran mayoría de molinos de vientos eran construidos con acero y contaban con sistemas de lubricación y rodamientos estos molinos americanos dominaron el mercado durante varios años en América y gran parte de Europa.

A finales del siglo pasado en Dinamarca se comenzó con el uso de las turbinas de viento para la generación de electricidad, gracias al incremento del petróleo en 1973 se produjo un gran interés en las fuentes de energía no renovables, actualmente la tecnología de los aerogeneradores tienen una gran madurez tecnológica, sin embargo, esta tecnología está en constante mejoramiento [10].

2.2.2 Energía eólica

La energía eólica es una de las fuentes de energías renovables más antiguas que existen siendo las industrias uno de los mayores beneficiarios en la actualidad para la generación de energía eléctrica.

Ventajas de la energía eólica:

Las principales ventajas de la energía eólica.

- ✓ Reduce emisiones de CO₂
- ✓ No emite gases contaminantes, ni efluentes líquidos, ni residuos sólidos, tampoco utiliza agua.

- ✓ No requiere minería de extracción subterránea o a cielo abierto.
- ✓ Ahorra combustibles, diversifica el suministro y reduce la dependencia energética.

Desventajas de la energía eólica:

Algunas desventajas de la energía eólica son:

- ✓ El viento es aleatorio y variable, tanto en velocidad como en dirección.
- ✓ Tiene un impacto ambiental sobre la fauna, en particular sobre las aves [11].

• **Procedencia de la energía eólica**

La energía eólica se da gracias a los vientos y estos tienen varios orígenes como son vientos geostroficó, brisa marina y vientos de montaña entre otros.

Vientos geostroficó o vientos globales:

Estos se originan gracias a la diferencia de temperaturas entre las zonas del ecuador y las zonas más alejadas de este, como el aire caliente es más liviano que el aire frío el aire caliente sube hasta alcanzar los 10km aproximadamente donde se extenderá al norte y sur, a 30° de latitud esta la zona de altas presiones que originan que el aire caliente comience a bajar donde es atraído por las zonas de baja presión en el ecuador de esta manera el viento se mantiene en movimiento cambiando su dirección en función de la rotación del planeta.

Brisa marina:

Este viento se origina debido al gradiente de temperaturas que se origina entre la noche y el día entre el mar y la tierra, la brisa sopla del mar a la tierra durante el día mientras que durante la noche la dirección del viento es lo contrario

Vientos de montaña:

Estos vientos son ocasionados por el calentamiento del aire de las laderas, el cual sube hasta la cima debido a la disminución de la densidad, durante la noche se invierte el proceso cambiando la dirección del viento [11].

• **Variación de viento**

Cada día se hace más necesario el aprovechamiento de los recursos disponibles al momento de realizar un proyecto y la manera de impactar lo menos posible el medio ambiente y los recursos económicos de quienes pretenden financiar un proyecto, por este motivo es importante describir las diferentes variaciones que puede presentar el viento al

momento del diseño del aerogenerador, una de las maneras de describir la variación del viento es la distribución de Weibull.

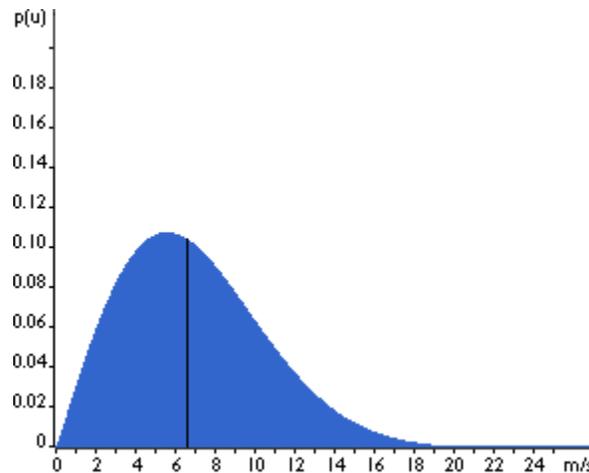


Figura 2-1: Distribución de Weibull

Fuente: <http://www.windpower.org/es/tour/wres/weibull/index.htm>

En la Figura 2-1. Se puede identificar una distribución de probabilidad. El área que se encuentra debajo de la curva será siempre 1. Debido a que la probabilidad de que el viento sople a cualquier velocidad es del 100%. La Distribución de Weibull nos indica que la probabilidad de que del viento sople a bajas velocidades es superior a que sople a altas velocidades, si se revisan los datos de un área determinada se observara que son más los vientos suaves que los vientos a altas velocidades.

Las velocidades del viento varían de un lugar a otro según el lugar donde te encuentres. Una de las cosas a tener en cuenta al diseñar un aerogenerador es tener claro que no es suficiente la toma de datos del viento y luego utilizar la velocidad media para la elaboración de los cálculos ya que no es lo correcto, hay es que ponderar la probabilidad de cada una de las velocidades con la correspondiente potencia que es capaz de extraerse de esa velocidad de viento [11].

2.3 Obtención y tratamiento de datos de viento

2.3.1 Parámetros representativos del potencial eólico

A la hora de evaluar un emplazamiento hay que determinar las características del viento en el mismo, para lo cual habrá que considerar cada uno de los siguientes aspectos:

Condiciones generales del viento en un emplazamiento (medias diarias, estacionales, anuales)

Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio:

- ✓ Condiciones meteorológicas (temperatura, presión atmosférica, humedad relativa, densidad del aire)
- ✓ Distribución de frecuencias de dirección.
- ✓ Variación temporal de la velocidad.
- ✓ Potencial eólico disponible.

Características del viento para el funcionamiento del sistema.

Datos de 10 minutos a 1 hora de promedio:

- ✓ Perfil vertical de velocidad horizontal.
 - Variaciones temporales.
 - Relaciones con la dirección.
- ✓ Variación de la velocidad vertical
 - Relaciones entre el viento vertical y la dirección.
 - Relaciones entre el viento vertical y el horizontal.

Datos de 1 minuto a 10 minutos de promedio:

- ✓ Factores de ráfaga.
 - Relaciones entre la velocidad, dirección y factor de ráfagas.
- ✓ Características de la turbulencia
 - Relaciones entre dirección y turbulencia.
 - Relaciones entre velocidad y turbulencia.
- ✓ Desviación de la velocidad.

2.3.2 Toma de medidas

• Instrumentación

Los instrumentos de medida necesarios en energía eólica son:

- ✓ Anemómetros.
- ✓ Veletas.
- ✓ Termómetros.

- ✓ Barómetros.

En general, la señal que proviene de los instrumentos de medida está conectada a un sistema de registro de diversos tipos:

- ✓ Un dispositivo de integración.
- ✓ Un indicador.
- ✓ Un dispositivo de grabación, por ejemplo, el soporte magnético o electrónico.

Anemómetros:

A continuación, se mencionarán algunos de los anemómetros utilizados para determinar la velocidad del viento:

- ✓ **De rotación:** Pueden ser de cazoletas o de hélice.

• El anemómetro de cazoletas:

Este anemómetro está constituido por tres o cuatro cazoletas instaladas alrededor de un eje vertical, en el lado cóncavo se concentra la fuerza ejercida por el viento la cual hace girar el anemómetro esta gira dependiendo la velocidad del viento, estos anemómetros cuentan con la ventaja de medir las dos componentes horizontales del viento.



Figura 2-2: Anemómetro de cazoletas

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/fuehlersysteme-enet-international-gmbh/product-59132-486244.html>

• El anemómetro de hélice:

Este tipo de anemómetro es utilizado cuando es de vital importancia conocer la dirección del viento, para lo cual se utilizan dos o tres anemómetros perpendiculares para poder identificar los componentes de la velocidad sobre los ejes horizontales y verticales.



Figura 2-3: Anemómetro de hélice

Fuente: <https://www.directindustry.es/prod/nrg-systems/product-61562-656729.html>

✓ De presión

En este tipo de anemómetros los datos de la velocidad del viento se obtienen mediante los efectos de las variaciones de presión que generan el viento cuando está en movimiento, estos anemómetros su principal función es la de medir la rafagosidad mediante el uso de galgas extensométricas las cuales están acopladas a una esfera logrando de esta manera medir la magnitud y dirección del viento.



Figura 2-4: Anemómetro de presión

Fuente: <https://es.omega.com/prodinfo/anemometros.html>

Veletas:

Las veletas son utilizadas para medir la dirección del viento se podría decir que las utilizadas, este dispositivo está montado sobre un eje el cual gira libremente en el momento que el viento cambia de dirección la veleta lo realiza con un movimiento amortiguado para evitar que esta se mueva demasiado rápido con los cambios de viento.



Figura 2-5: Veleta

Fuente: <https://www.aulafacil.com/cursos/medio-ambiente/energia-eolica/el-viento-l37084>

Termómetros:

Los termómetros son de gran importancia para evaluar la climatología del lugar donde se encuentre el aerogenerador tomando la temperatura, la cual también se utiliza para determinar la potencia suministrada. Estos termómetros están basados en una resistencia de platino.



Figura 2-6: Termómetro meteorológico digital

Fuente: <https://www.raig.com/termometros-a133/>

Barómetros:

Los barómetros se utilizan para obtener la presión atmosférica con esta presión se determina la potencia suministrada por una estación eólica. Por lo general se utilizan en estas estaciones barómetros meteorológicos [12].



Figura 2-7: Barómetro meteorológico digital

Fuente: <https://www.vaisala.com/es/products/instruments-sensors-and-other-measurement-devices/instruments-industrial-measurements/ptb330>

• Frecuencia y duración de las medidas

Para obtener mejores resultados en el diseño e instalación de aerogeneradores se hace necesario determinar las frecuencias y duración de toma de datos.

Estas frecuencias y medidas dependen del propósito de la toma de datos.

Un ejemplo de esto es la toma de la presión atmosférica que varía lentamente, en estas condiciones es suficiente con realizar medidas cada tres horas. Con respecto a la temperatura es suficiente con tomarla con los valores horarios.

Sin embargo, si queremos para un cálculo preciso del potencial eólico se deben tomar muestras del valor del viento con una frecuencia de 5 a 10 segundos cada 10 minutos cada hora.

Para analizar maquinarias eólicas o estudios de vientos más específicos como son las ráfagas de viento o turbulencia se hace necesario tomas de datos con frecuencias mayores a 1Hz o a u promedio de 1 minuto.

También se tiene en cuenta las siguientes características para instalar aerogeneradores.

- ✓ Realizar las mediciones durante un periodo de tiempo más largo, que sea prácticamente y económicamente posible.
- ✓ Realizar mediciones en cada estación del año, teniendo en cuenta que los patrones de la velocidad y dirección del viento son por lo general estacionales.
- ✓ Realizar comparaciones con las medidas de otros lugares cercanos donde estén disponibles datos donde se registren largos periodos de tiempo.
- ✓ Realizar comparaciones con las tendencias regionales a largo plazo, para registrar las variaciones climatológicas en las variaciones de velocidad del viento [12].

• **Ubicación de los sensores**

La ubicación de los sensores es de vital importancia estos deben de estar ubicados en los mejores lugares para que estén en contacto directo con las condiciones que desean censar o medir.

La mejor altura para realizar la medición es aproximadamente de 10 metros para establecer mediciones homogéneas.

Dependiendo la maquinaria es recomendable tomar las medidas lo más cercano al buje para reducir incertidumbres [12].

• **Elección de los instrumentos de medida**

Para la elección de un instrumento es de vital importancia tener en cuenta los siguientes factores:

- ✓ Coste y fiabilidad.
- ✓ Robustez, soportar posibles daños.
- ✓ Sensibilidad.
- ✓ Calibración adecuada.

2.3.3 Tratamiento de los datos eólicos

Los datos que se toman del viento son tratados estadísticamente, para obtener las distintas características de las velocidades del viento, como son la distribución por frecuencias y las distribuciones por rumbo.

• **Distribución de direcciones**

Al momento de ubicar las turbinas eólicas hay un punto muy importante que es la distribución de direcciones de viento. La distribución de direcciones también nos ayuda a conocer la variabilidad direccional del régimen de los vientos al cual los sistemas de orientación de las maquinas responderán.

Una de las representaciones más comunes es la rosa de vientos donde se puede identificar el porcentaje de tiempo en el que el viento tiene una dirección y la distribución de velocidades de viento para cada intervalo direccional [12].

Eje vertical:

Los aerogeneradores de tipo vertical cada día son más usados debido a la facilidad que tienen en el momento de realizarles mantenimiento gracias a que la mayoría de los componentes de generación se encuentran a nivel del suelo.

Cuenta con un eje vertical el cual se extienden al centro de las palas curvadas que salen de la parte interior del eje hasta la parte superior final. Las palas tienen una forma ovalada que les permite tener un mayor contacto con el viento, produciendo de esta manera electricidad.

Estos aerogeneradores se clasifican en:

✓ **Savonius:**

Este tipo de aerogeneradores son turbinas aerodinámicas con dispositivos de arrastre o resistencias las cuales tienen dos o tres palas. Desde un punto de vista superior las palas se asemejan a una S. estas palas cuentan con una característica que las hace que presenten menos resistencia cuando se mueven en contra del viento que cuando lo hacen a favor de él. esta diferencia hace que las turbina gire.



Figura 2-10: Aerogenerador Savonius

Fuente: Fred Hsu on en Wikipedia

✓ **Darrieus:**

Este tipo de turbina son aerodinámicas las cuales tienen una pala fina con forma de alas de avión simétricas las cuales se encuentran unidas al eje por sus extremos.

Con su diseño el cual tienen la apariencia de cuerdas de saltar, hace que los alerones tengan una gran fuerza centrífuga. Estos rotores tienen una característica que es que no pueden girar por si solos necesitan un sistema de arranque auxiliar.



Figura 2-11: Aerogenerador Darrieus

Fuente: Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3d de dinámica computacional de fluidos - Juan Rodríguez

✓ **Giromill:**

Este tipo de turbinas cuenta con alerones verticales con eje recto orientados mecánicamente para cambiar el Angulo de ataque. un conjunto de estas palas verticales acopladas a través de una barra al eje vertical pueden generar potencias de hasta 20 KW [13].



Figura 2-12: Aerogenerador Giromill

Fuente: Evolución de las instalaciones de energía eólica en España - Antonio Galián

Eje horizontal:

Este tipo de aerogeneradores cuentan con una ventaja con respecto a los demás de aprovechar mucho mejor el viento, gracias a la altura a la cual se coloca estos aerogeneradores es mucho mayor a los demás siendo esta una de las características que hace este tipo de aerogenerador sean los más utilizados.

Los aerogeneradores de eje horizontal se clasifican en:

✓ **Rotores multipala o aeroturbinas lentas:**

Los aerogeneradores de rotores multipala o aeroturbinas lentas tiene muchas más palas que los demás sistemas estos tienen entre 6 y 24 palas, este tipo de aerogeneradores se utilizan básicamente para sistemas de bombeo de agua y no para la generación de electricidad ya que no alcanzan altas velocidades.



Figura 2-13: Aerogenerador multipala
Fuente: Greenefficient solutions - Smart energy

✓ **Rotor tipo hélice o aeroturbinas rápidas:**

Las velocidades de punta de este tipo de aerogenerador son superiores de 6-14 veces a las velocidades en el rotor, gracias a esta característica hace de estos aerogeneradores uno de los más usados a la hora de generar electricidad, también cuentan con un par de arranque muy bajo el cual las hace girar por misma [13].



Figura 2-14: Aerogenerador tipo hélice
Fuente: GreenMountainWindFarm Fluvanna 2004.jpg

2.4.2 Funcionamiento de un aerogenerador

El funcionamiento de un aerogenerador de forma básica consiste en un rotor que cuentan con unas palas las cuales obtienen su movimiento gracias a la fuerza del viento esta energía trasferida al rotor por el viento depende de la densidad del aire, del área de barrido de las palas y la velocidad del viento.

La densidad del viento se debe a la densidad del aire. a presión atmosférica en condiciones normales con una temperatura de 15°C la densidad del aire es de $1,255 \text{ kg/m}^3$

La cantidad de energía que pueden capturar depende del área de barrido de las palas a mayor diámetro de palas mayor es la energía que adsorbe el rotor.

A mayor velocidad del viento la energía capturada por el rotor será mucho mayor.

El movimiento del aerogenerador se debe gracias a la sustentación que se produce en las palas, la sustentación es la fuerza perpendicular a la dirección del viento y es generada gracias a la diferencia de presiones a ambos lados de la pala. Los aerogeneradores no pueden transformar toda la energía eólica del viento en energía mecánica, por tal motivo se tiene en cuenta el rendimiento denominado coeficiente de potencia C_p . Que es la relación que existe entre la potencia eólica del emplazamiento y la potencia mecánica obtenida. Este coeficiente depende de la velocidad del viento y el rendimiento del aerogenerador.

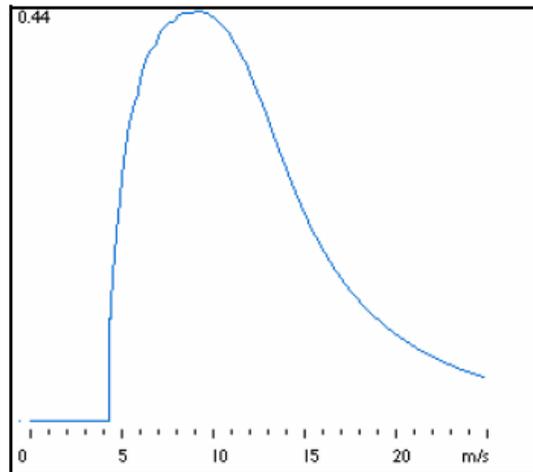


Figura 2-15: Coeficiente de potencia

Fuente: Diseño de un aerogenerador de baja potencia

La potencia de un aerogenerador al igual que el coeficiente de potencia es variable con la velocidad del viento (ver Figura 2-16). Esto se puede ver en las curvas de potencia de los aerogeneradores en las cuales se evidencia la potencia eléctrica disponible de un aerogenerador en varias velocidades [11].

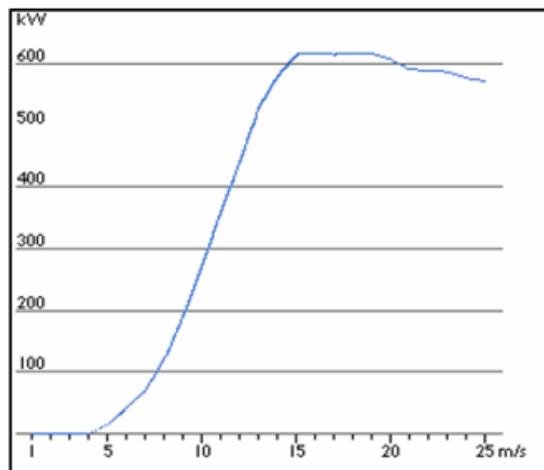


Figura 2-16: Potencia de un aerogenerador

Fuente: Diseño de un aerogenerador de baja potencia

2.4.3 Partes de un aerogenerador

Un aerogenerador está compuesto generalmente por los siguientes elementos:

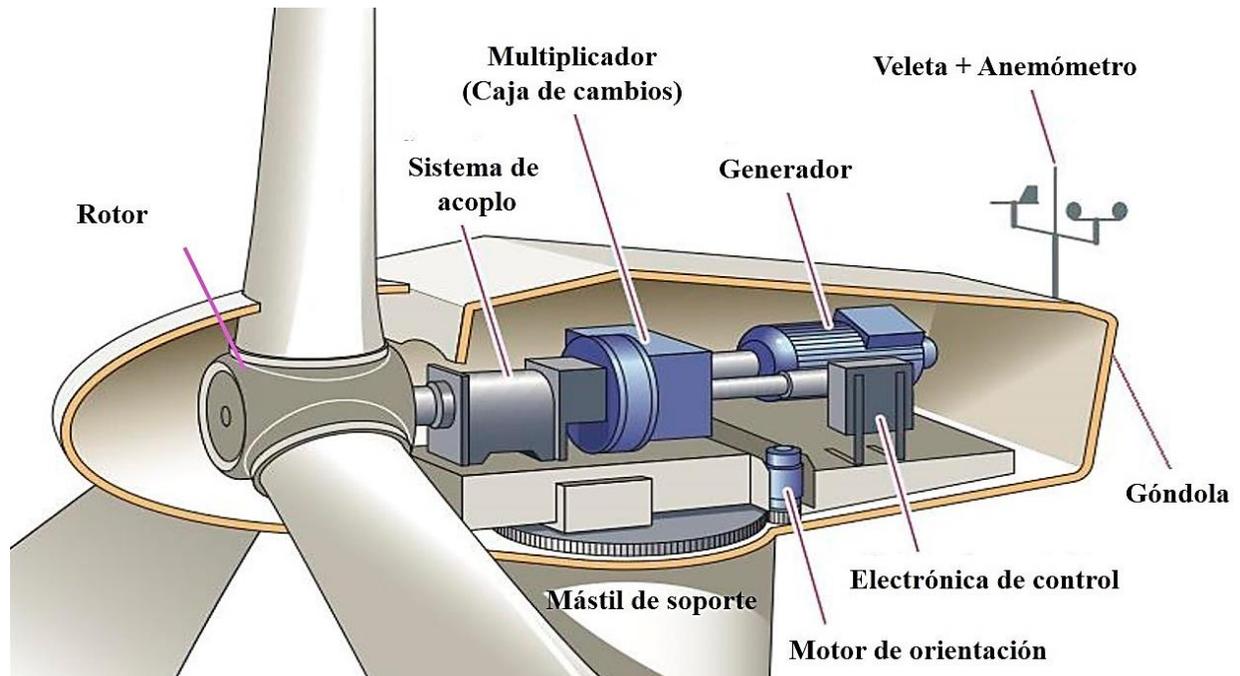


Figura 2-17: Partes de un aerogenerador

Fuente: <https://energiasrenovadas.com/componentes-de-un-aerogenerador/>

Rotor: Es uno de los principales componentes en el rotor van acopladas las aspas las cuales por lo general son tres, el rotor está compuesto por:

- ✓ **Palas:** Son las encargadas de convertir la energía cinética que genera el viento en energía el par de rotación de la turbina, en las modernas palas de los grandes aerogeneradores están construidas de plástico reforzadas con fibra de vidrio. ("GRP").
- ✓ **Buje:** Es el soporte de las palas y está construido en acero moldeado, de este parte el eje principal este eje conecta el buje del rotor al multiplicador la cual cuenta con na velocidad angular de 30 rpm.
- ✓ **Mecanismo de orientación:** El mecanismo de orientación es el encargado de colocar el rotor de las turbinas en un ángulo adecuado para el aprovechamiento del viento.

- ✓ **Nariz:** Es la encargada de re direccionar el viento de enfrente del rotor hacia la góndola y de esta manera evitar las turbulencias en la parte frontal del rotor. está diseñado de una forma aerodinámica con forma de punta para cumplir la función de re direccionamiento.

Góndola: Es el encargado de contener los componentes más importantes del aerogenerador, los cuales incluyen el generador eléctrico y el multiplicador.

Multiplicador: Por lo general son engranajes helicoidales o planetarios. Su función es transmitir la potencia desde el eje de baja velocidad al de alta velocidad.

Eje de baja velocidad: Este eje gira a muy bajar entre 19 y 30 rpm se encuentra ubicado entre el buje y el multiplicador. Cuenta con un sistema hidráulico que hace funcionar los frenos aerodinámicos.

Eje de alta velocidad: Como su nombre lo indica su giro es superior al del eje de baja velocidad este eje gira a 1.500 rpm, lo que permite el funcionamiento del generador eléctrico.

Generador: Este es el encargado de convertir la energía mecánica en energía eléctrica., los generadores asíncronos doble alimentados son los más utilizados. Para estos casos, la velocidad de rotación es variada, a diferencia a cuando se usan generadores asíncronos convencionales.

Anemómetro: Es el dispositivo encargado de medir la velocidad del viento. Gracias a su medición se pone en funcionamiento o detiene el aerogenerador, Generalmente, con vientos superiores a 5 m/s, un generador se pone en funcionamiento, aunque esto puede cambiar entre modelos.

Veleta: Su función principal es la de identificar la dirección del viento y poder orientar el aerogenerador respecto a ella.

Controlador: Es el encargado de controlar los mecanismos de orientación, frenos, y conexión entre otros.

Unidad de refrigeración: Su función principal es la disipación de calor esto lo realiza a través de distintos mecanismos como son, ventiladores y sistemas de refrigeración de agua o aceite.

Torre: Es el soporte principal del aerogenerador este soporta la góndola y el rotor. Es de vital importancia contar con una torre alta entre más elevado del viento se encuentre mucho mejor ya que a mayor altura mayor velocidad del viento [14].

3. Metodología de la investigación.

3.1 Caracterización

3.1.1 Necesidades del parque objeto del proyecto

En el barrio las flores de la ciudad de Barranquilla, está ubicado el parque de la 86 entre la calle 108 carrera 86. Este parque cuenta con un kiosko, juego para niños, bancas y zonas verdes, se pudo observar durante la visita a campo y al consultar con los moradores este presenta deficiencia en la iluminación, debido a que solo cuenta con 2 luminarias instaladas en el parque, con una distancia aproximada de 6 metros entre ellas.

Surge la necesidad de incluir en el proyecto un estudio de iluminación, que cumpla con los requerimientos establecidos en el Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público “Retilap”.

También se pudo observar que el parque cuenta con una conectividad de internet, que se encuentra alimentado por un sistema de panel solar, este sistema se encuentra fuera de servicio; por tal motivo se propone en el diseño la instalación de un equipo de conectividad y la instalación de 3 toma corrientes con protección de falla a tierra para carga de computadores, tabletas y/o celulares.

3.1.2 Características del parque

El parque actualmente cuenta con zonas de columpios, juego de toboganes para niños, balancín, bancas y zonas verdes.

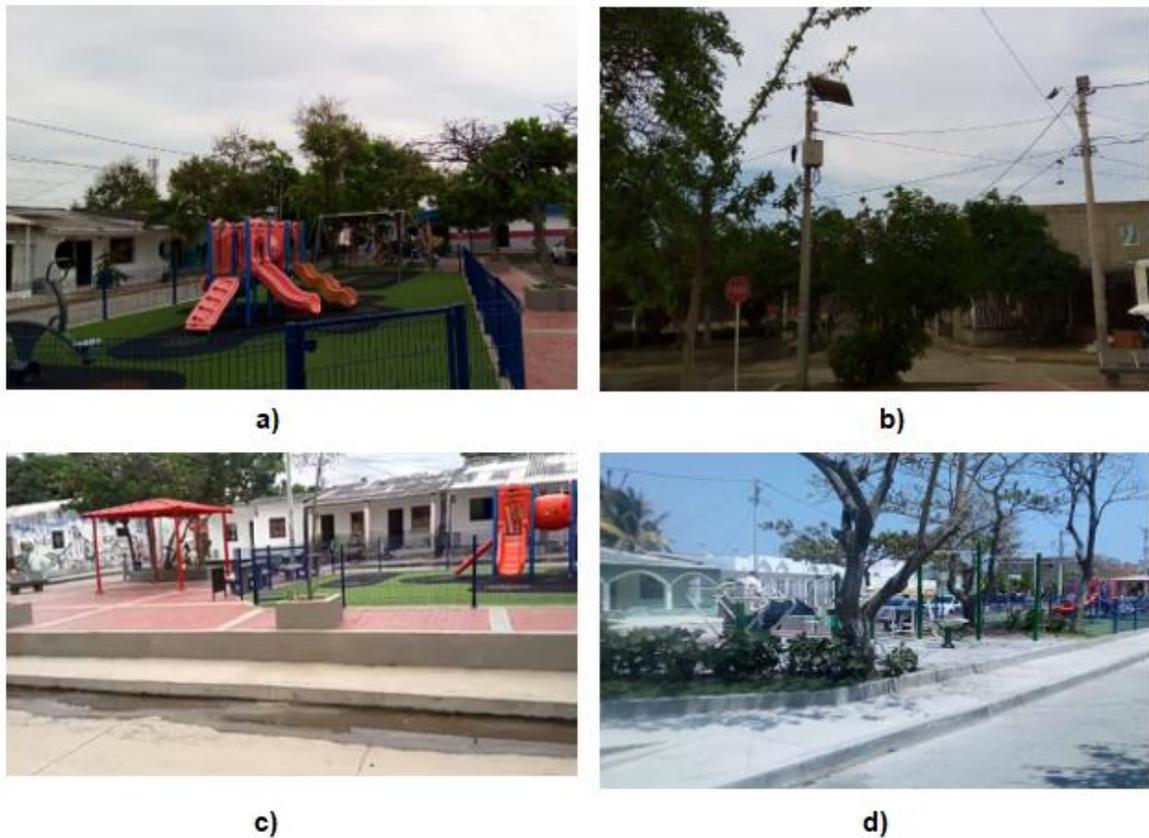


Figura 3-1: Visita a campo Parque de la 86

Fuente: Autores

Se realizó dibujo a escala del parque, utilizando la herramienta de georreferenciación del software AutoCAD, con el fin de determinar el área del parque, debido a que no fue posible realizar el levantamiento arquitectónico del parque durante visita a campo, por los constantes toques de queda implementados por el gobierno, en busca de mitigar los contagios del Covid 19.

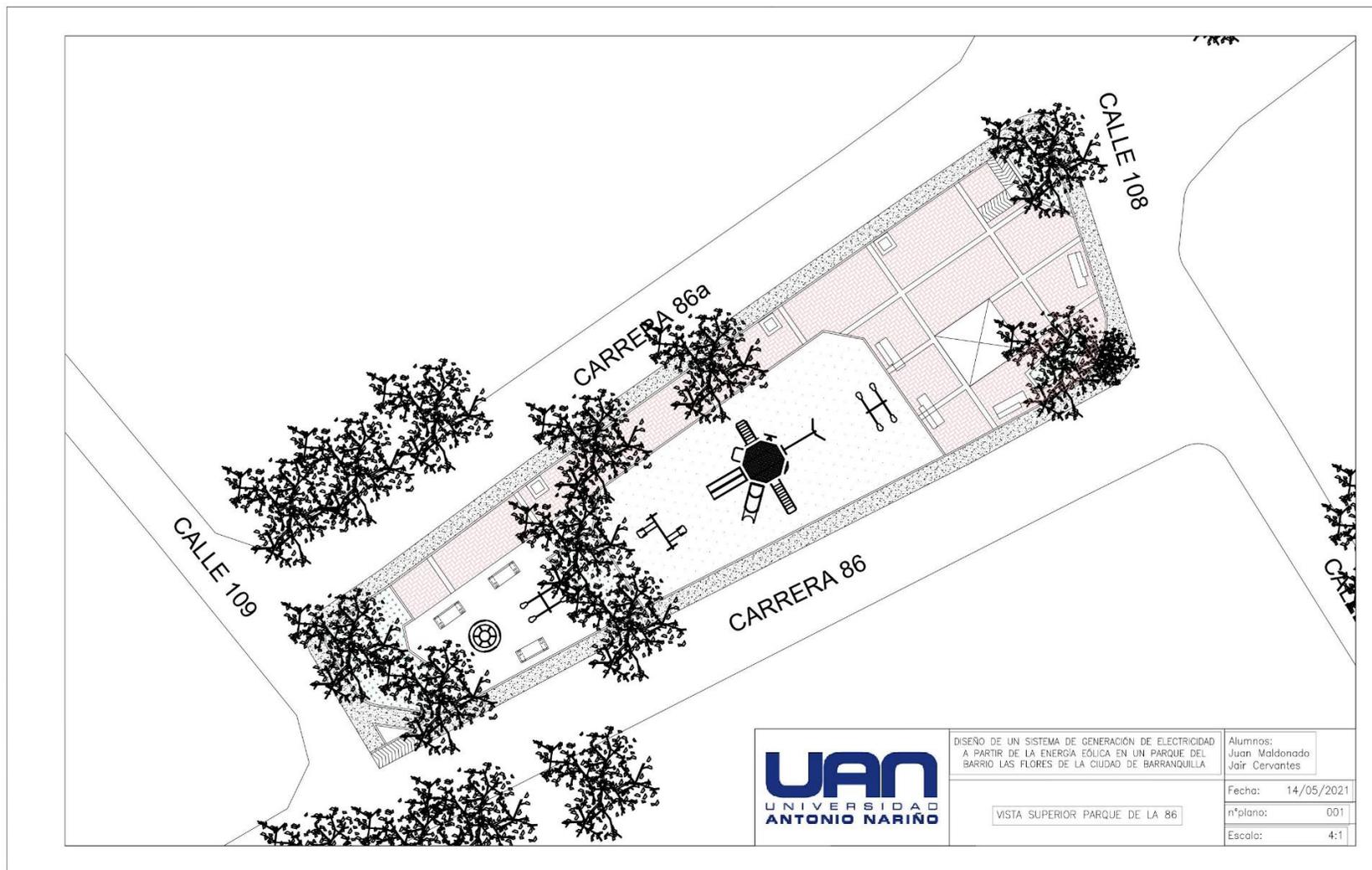


Figura 3-2: Plano vista superior Parque de la 86
Fuente: Autores

Se determinó el área del parque de 675.85 m², usando la herramienta de medir área del software AutoCAD.

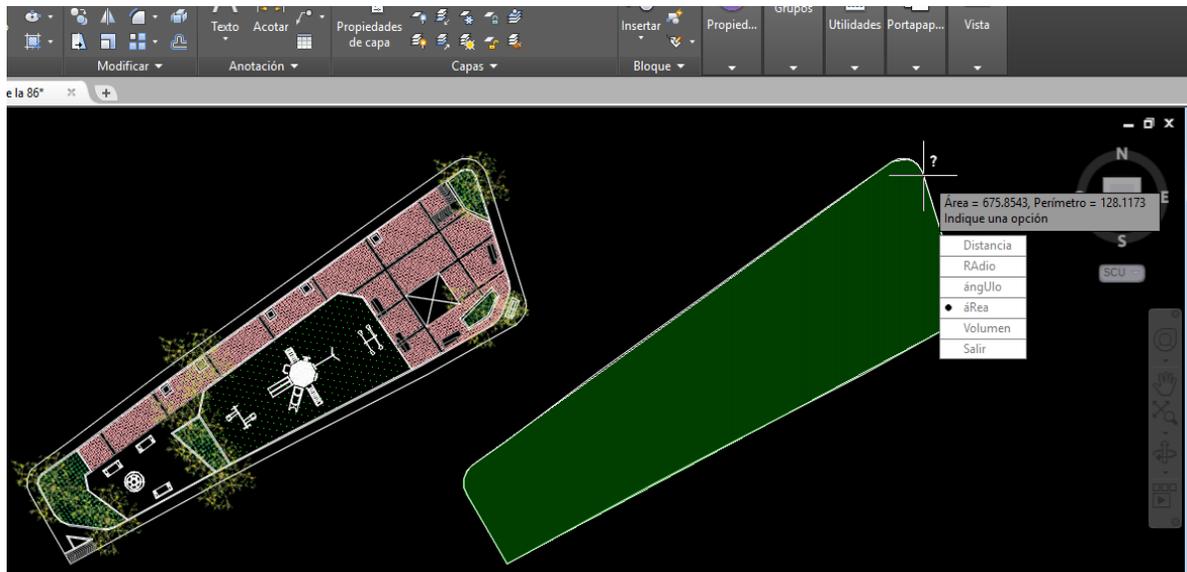


Figura 3-3: Medición del área del Parque de la 86, Unidad: m²
Fuente: Autores

3.1.3 Caracterización de la energía eólica

El diseño del sistema de generación de energía eólica se realizará en el parque de la 86 ubicado en el barrio las Flores de la ciudad de Barranquilla, en las siguientes coordenadas geográficas: Latitud: 11.04344, Longitud: -74.82630.

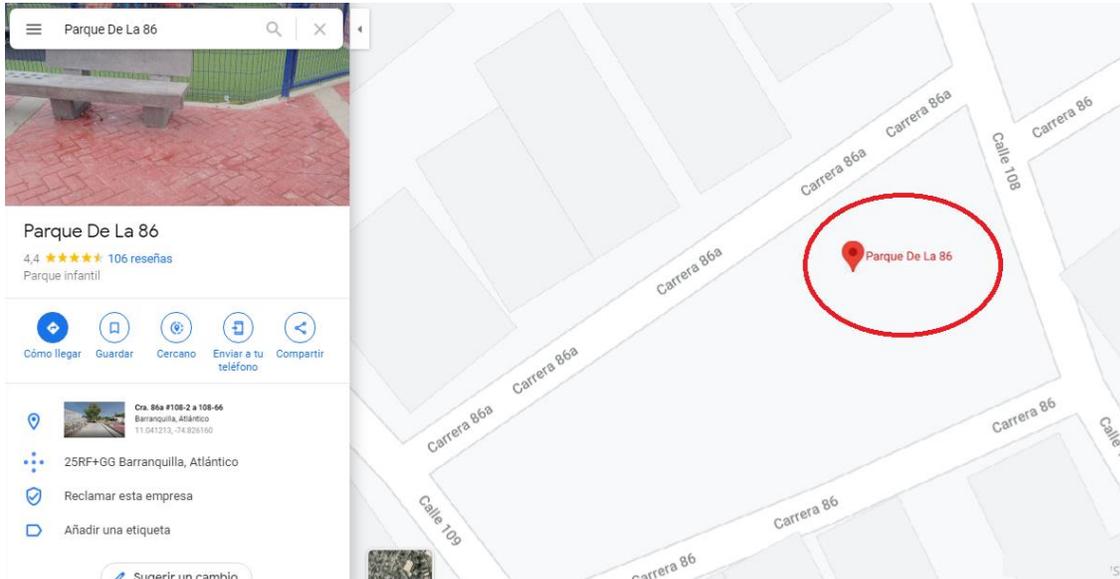


Figura 3-4: Coordenadas geográficas Parque de la 86

Fuente: Google maps. Obtenido de: <https://www.google.com.co/maps>

Los datos de velocidad del viento son tomados de la página del fabricante de aerogeneradores en España, <https://www.enair.es/>, debido a que no se logró realizar las salidas de campo para realizar la medición de la velocidad del viento a varias horas del día mediante el uso del anemómetro que se encuentra en la universidad Antonio Nariño y cuál iba a ser usado para la práctica, por motivos de la pandemia y las medidas establecidas por el gobierno para mitigar los contagios por Covid 19.

Según datos arrojados en las coordenadas donde se encuentra ubicado el parque y a una altitud de 5,3 metros, se cuenta con un recurso eólico de 5,9 m/s [15].

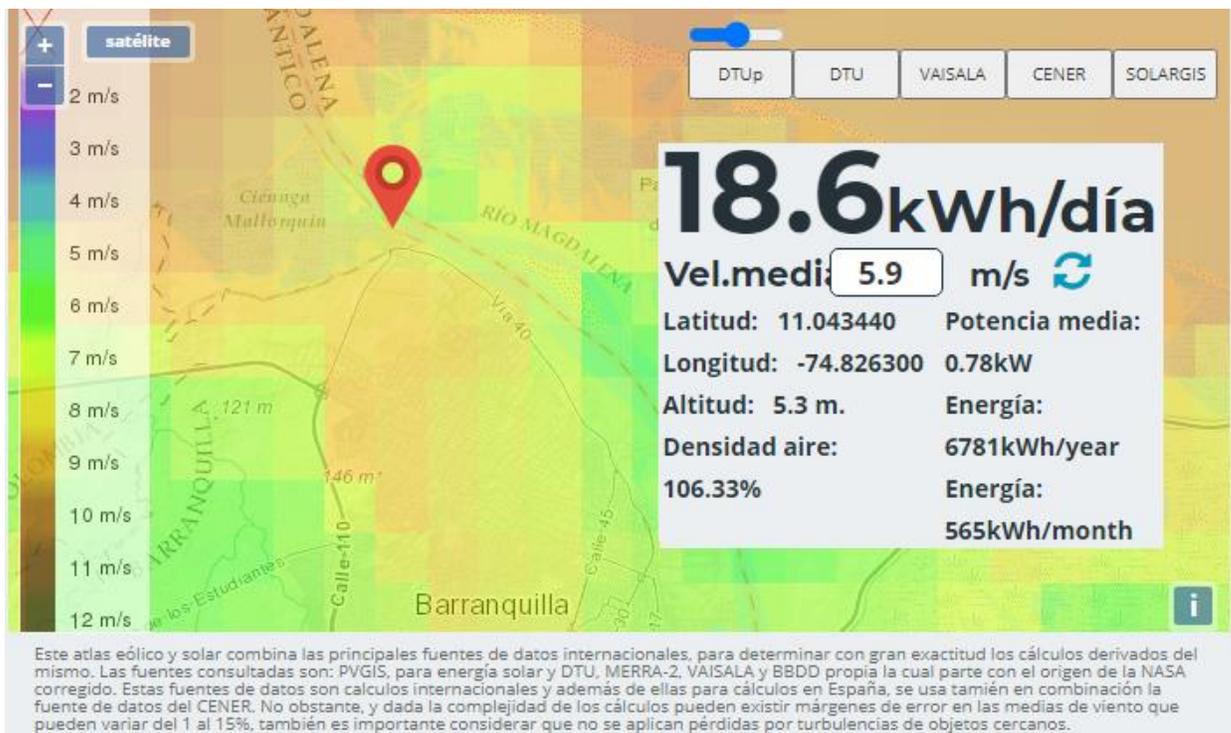


Figura 3-5: Recurso eólico Parque de la 86

Fuente: Estimación de producción eólica y solar. Obtenido de: <https://www.enair.es/es/app/>

La producción eólica durante los 12 meses del año se encuentra en la siguiente gráfica, observando un promedio de 18,6 kWh/día y una producción de energía eólica al año de 6781 kWh/año [15].

Tabla 3-1: Producción eólica en el año parque de la 86

	Producción eólica en kWh												Average	Anual
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec		
Wind speed (m/s)	9.1	9.1	8.6	6.8	4.5	4.7	5.4	4.4	3.5	3.3	4.3	7.2	5.9	6781 kWh/year
kWh/day	49.7	48.7	40.7	20.8	6.1	6.6	10.1	5.6	2.7	2.3	5.2	24.2	18.6	
kWh/month	1540	1377	1261	625	189	197	312	175	82	73	156	751	565	

Fuente: Estimación de producción eólica y solar. Obtenido de: <https://www.enair.es/es/app/>

Se relaciona a continuación el histograma de los valores de velocidad de viento en m/s más constantes de la zona, mostrando por cada velocidad de viento los valores Weibull y las medias de Weibull. Representación gráfica de cómo se reparte el historial de vientos.

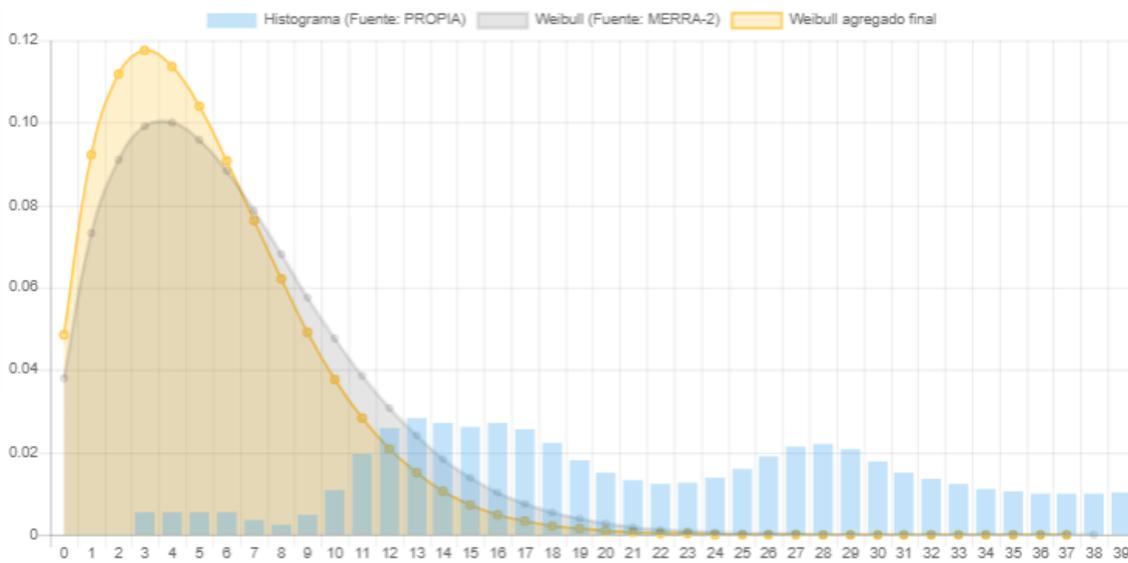


Figura 3-6: Histograma de los valores de velocidad de viento en m/s Parque de la 86
Fuente: Estimación de producción eólica y solar. Obtenido de: <https://www.enair.es/es/app/>

Para la correcta instalación del aerogenerador es necesario conocer la rosa de los vientos predominantes en la zona, con el fin de mantener libre de obstáculos el sector predominante de vientos.

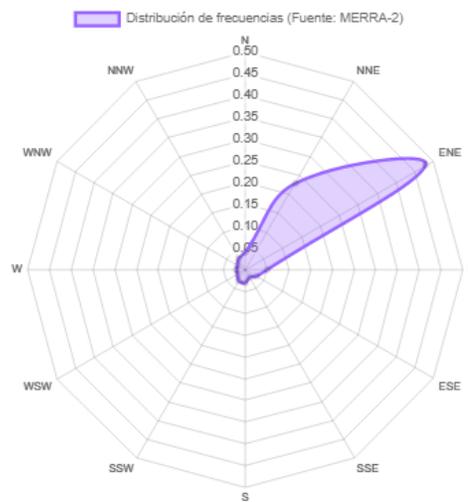


Figura 3-7: Rosa de viento Parque de la 86
Fuente: Estimación de producción eólica y solar. Obtenido de: <https://www.enair.es/es/app/>

3.2 Cálculos de diseño

3.2.1 Cálculos de iluminación

Para realizar el análisis de la cantidad de luminarias necesarias para la iluminación que cumpla con lo establecido en el Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público “Retilap” se requiere conocer la fotometría mínima en el área, ver Tabla 3-2 y seleccionar el tipo de luminaria adecuada a la instalación (tipo de alimentación, potencia, flujo luminoso).

Tabla 3-2: Fotometría mínima en áreas críticas distintas a vías vehiculares

Clasificación	Clase de iluminación	Iluminancia promedio (luxes)	Uniformidad general $U_0 \geq \%$
Canchas múltiples recreativas	C0	50	40
Plazas y plazoletas	C1	30	33
Pasos peatonales subterráneos	C1	30	33
Puentes peatonales	C2	20	33
Zonas peatonales bajas y alledaños a puentes peatonales y vehiculares	C2	20	33
Andenes, senderos, paseos y alamedas peatonales en parques	C3	15	33
Ciclo-rutas en parques	C2	20	40
Ciclo-rutas, senderos, paseos, alamedas y demás áreas peatonales adyacentes a rondas de ríos, quebradas, humedales, canales y demás áreas distantes de vías vehiculares iluminadas u otro tipo de áreas iluminadas	C4	10	40

Tabla 510.3 b. Fotometría mínima en áreas críticas distintas a vías vehiculares.

Fuente: Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público

En el diseño de iluminación, uno de los documentos fotométricos que identifica una luminaria, es la curva del coeficiente de utilización K, el cual sirve para calcular, a partir del conocimiento de la geometría de la vía considerada y la disposición de las luminarias, la iluminancia media sobre la calzada.

En el proceso de diseño y a partir de una iluminancia media dada, puede usarse para calcular la interdistancia. Otra forma de aplicar esta curva, es calcular el flujo luminoso necesario para obtener una iluminancia dada, a partir de una interdistancia fija [16].

La fórmula general del cálculo es:

$$E_{prom} = \frac{\Phi * K_t * F_m}{S * W} \quad (1)$$

Para hallar el coeficiente de utilización K_t , utilizamos la siguiente ecuación:

$$K_t = \frac{E_{prom} * S * W}{\emptyset} \quad (2)$$

Donde:

- E_{prom} : Iluminancia media dada (lx).
- S: Interdistancia de luminarias (espacio entre 2 luminarias) (m).
- W: Ancho de la superficie (m).
- \emptyset : Flujo mantenido de la bombilla (lm).
- K_t : Coeficiente de utilización.

El flujo luminoso total necesario para producir una iluminancia promedio requerida se calcula así:

$$\emptyset_{tot} = \frac{E_{prom} * A}{K_t * F_m} \quad (3)$$

Donde:

- \emptyset_{tot} : Flujo luminoso total (lm).
- E_{prom} : Iluminancia media dada (lx).
- A: Área (m²).
- K_t : Coeficiente de utilización.
- F_m : Factor de mantenimiento.

Para determinar el número de luminarias (N) necesarios, utilizamos la siguiente ecuación:

$$N = \frac{\emptyset_{tot}}{\eta * \emptyset} \quad (4)$$

Donde:

- N: Número de luminarias.
- \emptyset_{tot} : Flujo luminoso total (lm).
- n : número de bombillas por luminaria.

- \emptyset : Flujo mantenido de la bombilla (lm).

3.2.2 Dimensionamiento de la carga eléctrica del sistema

La capacidad instalada corresponde a la energía que consumen todos los elementos de un sistema eléctrico, contemplando a su vez la potencia que requiere cada elemento para su funcionamiento [17].

Para la determinación de la capacidad instalada en un sistema, se contempla los aparatos que se encuentran conectados a la red eléctrica, ya sean elementos que consumen energía en corriente continua o corriente alterna, dada estas condiciones la potencia instalada se determina por la siguiente ecuación:

$$P_T = \sum P_i - Dc + \sum P_i - Ac \quad (5)$$

- P_T : Potencia instalada (W).
- P_{i-Dc} : Potencia individual de aparatos DC (W).
- P_{i-Ac} : Potencia individual de aparatos AC (W).

La energía instalada en el sistema estará determinada por:

$$E_T = \left(\sum P_i - Dc * t \right) + \left(\sum P_i - Ac * t \right) \quad (6)$$

- E_T : Energía total requerida por el sistema (W/h).
- t : Tiempo de trabajo de los elementos del sistema (h).
- P_{i-Dc} : Potencia individual de aparatos DC (W).
- P_{i-Ac} : Potencia individual de aparatos AC (W).

3.2.3 Dimensionamiento Aerogenerador

Los aerogeneradores extraen electricidad beneficiándose de la energía cinética que el aire posee en su movimiento. El viento consigue esa energía cinética gracias a las corrientes que se producen y debido a un desigual calentamiento del sol. Esto provoca que el aire caliente, el cual es más ligero que el aire frío, ascienda hasta unos 10 kilómetros a la vez que se desplaza hacia el Polo Norte y el Polo Sur. Una vez que el aire caliente llega a los

polos, se encuentra con una zona de bajas presiones provocada por el aire frío y empieza a descender hacia el Ecuador de nuevo. Gracias también a la rotación de la Tierra y su correspondiente efecto Coriolis se producen desplazamientos laterales del viento. [18]

Para poder evaluar la potencia que un aerogenerador es capaz de extraer del viento, debemos evaluar la cantidad de energía cinética de la masa de aire que atraviesa la sección barrida por las palas en una cantidad de tiempo determinada, la potencia la expresamos en la siguiente ecuación:

La energía cinética E contenida en una masa de aire m con movimiento uniforme-unidireccional de velocidad V está dada por:

$$E = \frac{1}{2} * m * V^2 \quad (7)$$

La masa de aire que atraviesa el rotor se puede expresar como el volumen del cilindro que tiene el mismo diámetro que el rotor y en donde la longitud del cilindro se puede expresar como la velocidad del viento por el tiempo que está el viento recorriendo el cilindro, se expresan como:

$$m = \rho * A * Vol = \rho * A * L = \rho * A * V * t \quad (8)$$

- m : La masa de aire que atraviesa el rotor (Kg/s).
- ρ : Densidad del aire (Kg/m³).
- Vol : volumen del cilindro de aire.
- A : sección de aire barrida por el rotor (m²).
- L : Longitud del cilindro de aire.
- V : velocidad del aire (m/s).

La potencia eólica de la corriente de viento a través del área de la sección transversal A viene dada por:

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3 \quad (9)$$

En donde la sección de aire barrida por el rotor área del rotor es:

$$A = \frac{2 * P_v}{\rho * V^3} \quad (10)$$

- A: Sección de aire barrida por el rotor (m²).
- P_v: Potencia eólica de la corriente de viento (W).
- ρ: Densidad del aire (Kg/m³).
- V: velocidad del aire (m/s).

La potencia eólica de la corriente de viento requerida de un aerogenerador se puede calcular, si se conoce la potencia instalada (W) que requiere el sistema y el coeficiente de potencia, que no es más que la eficiencia en el que el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad y el rendimiento mecánico de los diferentes componentes que tiene el aerogenerador.

$$P_v = \frac{P_T}{C_p} \quad (11)$$

Para dimensionar el diámetro del rotor, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$A = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \pi \frac{d^2}{4} \quad (12)$$

$$d = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (13)$$

- A: Sección de aire barrida por el rotor (m²).
- d: Diámetro rotor (m).

El coeficiente de potencia (C_p), recibe el nombre de “Límite de Betz”, Este coeficiente cuantifica que no todo el aire que atraviesa el rotor se convierte en potencia y que, además, el aire no se para totalmente pero sí que se ralentiza.

Cuando el viento esté soplando a barlovento, éste poseerá una velocidad V_1 y pertenecerá a la sección transversal del volumen de control de aire A_1 . Cuando el aire esté atravesando las palas del rotor, la velocidad en ese instante es la velocidad útil del aerogenerador V y la sección será la propia área del rotor A . Sin embargo, a sotavento del aerogenerador, el aire sale frenado debido a su paso por el rotor y por ello, tanto la velocidad como la sección en ese momento del volumen de control del aire poseen otros valores que a barlovento, a los cuales podemos llamar A_2 y V_2 . [18].

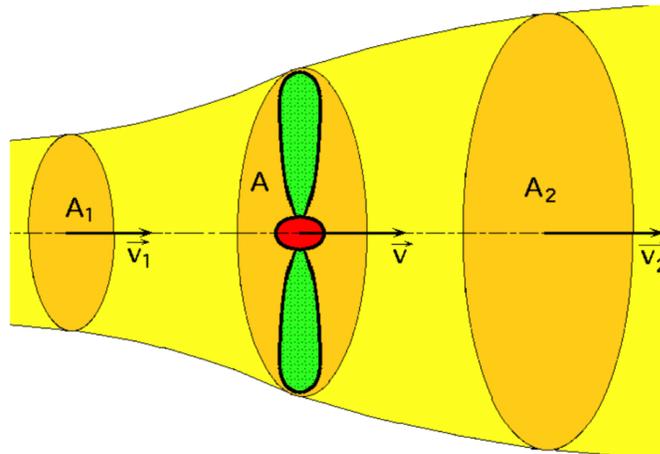


Figura 3-8: Modelo de Betz

Fuente: <http://conocimientoelico.blogspot.com/2017/04/teoria-de-la-cantidad-de-movimiento.html>

Una vez visto el sentido físico del límite de Betz, se puede calcular su valor siguiendo una serie de pasos. Primeramente, se hace uso de la fórmula de la conservación de la masa, ya que el caudal másico que atraviesa el rotor es constante:

$$Q_m = \rho * Q = \rho * A_1 * V_1 = \rho * A_2 * V_2 = \rho * A * V \quad (14)$$

Después de utilizar la expresión del caudal másico, podemos calcular la potencia útil que el viento transfiere al aerogenerador de dos maneras:

- 1) Como la pérdida de energía cinética por unidad de tiempo que sufre el viento al atravesar las palas del rotor:

$$P_{util} = \frac{-\Delta E_T}{\Delta t} = \frac{E_{c1} - E_{c2}}{\Delta t} = \frac{\frac{1}{2} * \rho * A * d * (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} \quad (15)$$

$$= \frac{1}{2} * \rho * A * v * (v_1^2 - v_2^2)$$

En esta expresión se ha utilizado como valor de la masa el producto de densidad por volumen y el concepto de $v = \frac{d}{\Delta t}$.

2) Como el trabajo generado por el viento por unidad de tiempo sobre la sección A:

$$P_{util} = Fv = \frac{\rho * A * d * (v_1^2 - v_2^2)}{\Delta t} * v = \rho * A * v^2 * (v_1^2 - v_2^2) \quad (16)$$

En esta fórmula de la potencia útil podemos observar que, debido a la 3ª ley de Newton, la fuerza del viento es igual a la fuerza ejercida sobre el viento, pero con signo negativo:

$$Fuerza\ del\ viento = -Fuerza\ del\ viento = \frac{-m * (v_1 - v_2)}{\Delta t} \quad (17)$$

$$= \rho * A * v * (v_1 - v_2)$$

Si estas dos ecuaciones de la potencia útil las igualamos, obtenemos:

$$\frac{1}{2} * \rho * A * v * (v_1^2 - v_2^2) = \rho * A * v * (v_1 - v_2) \quad (18)$$

Debemos recordar también que v , la cual es la velocidad del plano medio que se sitúa en el rotor y es la media de las dos velocidades, tanto la de barlovento v_1 como la de sotavento v_2 . Esto es así porque es el modelo que fue diseñado por Betz y hay que utilizarlo así porque si no las dos ecuaciones anteriores de la potencia útil no serían consistentes entre sí. Por lo que queda que el valor de v es:

$$v = \frac{(v_1 + v_2)}{2} \quad (19)$$

También se puede observar que v_2 tendrá un valor que dependerá de v_1 , es decir, de la velocidad que lleve el viento cuando vaya a atravesar el rotor. Por ello, se puede escribir una expresión que relacione las dos velocidades, v_1 y v_2 .

$$v_2 = b * v_1 \quad (20)$$

en donde b tendrá un valor que estará entre 0 y 1.

Así mismo, volvemos a escribir la expresión de la potencia útil, la ecuación 6, pero sustituyendo estos valores de v_2 .

$$\begin{aligned} P_{\text{útil}} &= \frac{1}{2} * \rho * A * \frac{(v_1 + b * v_1)}{2} * (v_1^2 - b^2 - v_1^2) \\ &= \frac{1}{4} * \rho * A * v_1^3 * (1 + b) * (1 - b^2) \end{aligned} \quad (21)$$

Una vez conseguida la fórmula de potencia útil con los valores ya introducidos, podemos calcular la expresión de la potencia útil máxima que el aerogenerador podrá extraer del viento, calculando un valor exacto del coeficiente b . Esto lo podemos conseguir si derivamos la fórmula de la potencia útil con respecto al coeficiente b e igualando a cero.

$$\frac{dP_{\text{útil}}}{db} = 0 \quad (22)$$

Si desarrollamos:

$$\frac{1}{4} * \rho * A * v_1^3 * (1 - 2b - 3b^2) = 0 \quad (23)$$

$$-3b^2 - 2b + 1 = 0 \quad (24)$$

$$b = \frac{2 \pm \sqrt{4 - 4 * 1(-3)}}{-6} = \frac{2 \pm \sqrt{16}}{-6} = \frac{2 \pm 4}{-6} = \begin{cases} -1 \\ 1/3 \end{cases} \quad (25)$$

De la ecuación de segundo grado obtenida, podemos ver los dos valores que nos da de resolver la ecuación. El valor negativo de -1 no podemos tenerlo en cuenta ya que no tiene sentido físico que el valor v_2 tenga el mismo valor que v_1 pero cambiado de signo (el viento tendría que cambiar de sentido). Por lo tanto, el valor de b será de $1/3$ y el valor de v_2 será:

$$v_2 = \frac{1}{3} * v_1 \quad (26)$$

Sustituyendo este valor de b en la fórmula de la potencia útil obtenemos:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{4} * \rho * A * v_1^3 * (1 + b) * (1 - b^2) \quad (27)$$

Para que sea semejante a la fórmula de la potencia que incluía el coeficiente de potencia C_p , podemos variar la fórmula anterior de la potencia útil para que quede de la siguiente manera:

$$P_{\text{útil}} = \frac{1}{2} * \rho * A * v_1^3 * \frac{(1 + b) * (1 - b^2)}{2} \quad (28)$$

en donde el valor de C_p , el límite de Betz, es:

$$C_p = \frac{(1 + b) * (1 - b^2)}{2} \quad (29)$$

$$C_p = \frac{(1 + 1/3) * (1 - 1/3^2)}{2} = \frac{16}{27} = \mathbf{0.593}$$

Este valor obtenido del límite de Betz es el usado para obtener la potencia de un aerogenerador en condiciones ideales de funcionamiento. Fue obtenido por el físico alemán Albert Betz en 1919. Sin embargo, no se tuvo en cuenta otros factores como la resistencia aerodinámica de las palas, la pérdida de energía por la estela generada en la rotación, la compresión del fluido o la interferencia de las palas.

Tampoco, para la obtención de la potencia, se ha tenido en cuenta los diferentes rendimientos mecánicos de los diferentes componentes que tiene el aerogenerador, como pueden ser:

- ✓ Rendimiento de la hélice: 85 %.
- ✓ Rendimiento del multiplicador: 96 %.
- ✓ Rendimiento del alternador: 95 %.
- ✓ Rendimiento del transformador: 96 %.

Teniendo en cuenta todos los valores de rendimientos de los componentes junto con el límite de Betz, calculamos el rendimiento total del aerogenerador y conseguimos un valor de 44 %.

$$R_t = C_p * 0,85 * 0,96 * 0,95 * 0,96 \quad (30)$$

$$R_t = 0.593 * 0,85 * 0,96 * 0,95 * 0,96 = 0,44$$

3.2.4 Dimensionamiento banco de baterías

Cuando se utiliza energía procedente de sistemas de captación, en este caso la energía eólica, es necesario el almacenamiento de energía en baterías, dado que su uso en aplicaciones eléctricas, difiere del momento en que se capta. Estos sistemas de almacenamiento de energía permiten suministrar energía de manera continua y por ende evitan el carácter cíclico que se puede presentar por los factores medioambientales, que impiden una constancia en el viento.

Las baterías usadas recurrentemente en estos sistemas de energía son las estacionarias o de ciclo profundo, la mayoría constituidas por plomo-acido ya que las de níquel o litio resultan ser más costosas, no se recomienda el uso de baterías de descarga rápida, como las que se encuentran instaladas en los vehículos automotrices [17].

La cantidad de energía que puede almacenar una batería se mide por Ah (amperios hora), se determina por la siguiente ecuación:

$$C_{nom} = I * t_d \quad (31)$$

- C_{nom} : Capacidad nominal (Ah).

- t: Tiempo de descarga (h)
- I: Intensidad (A).

El banco de baterías permite acumular la energía que produce el generador, para luego ponerla a disposición y que sea consumible por el sistema en este nuestro caso la iluminación y elementos de conectividad del parque, es por ello que la capacidad del banco de baterías se determina por las siguientes ecuaciones:

$$L_D = \frac{E_D}{V_{nom}} \quad (32)$$

- L_D : Consumo diario medio de la carga (Ah).
- V_{nom} : Tensión de suministro de la batería (V).
- E_D : Consumo diario de energía (Wh/día).

Donde:

$$E_D = E_T \quad (33)$$

La capacidad de la batería se calcula:

$$C = \frac{A * L_D}{PD_{max} * \eta_{inv} * \eta_{rb}} \quad (34)$$

- C: Capacidad del banco de baterías(Ah).
- A: Autonomía del sistema (días).
- L_D : Consumo diario medio de la carga (Ah).
- PD_{max} : Profundidad de descarga máxima.
- η_{inv} : Rendimiento energético del inversor (85%).
- η_{rb} : Rendimiento del regulador + batería (80%).

El número de baterías se calcula:

$$N_B = \frac{C}{C_B} \quad (35)$$

- N_B : Número de baterías.
- C: Capacidad del banco de baterías(Ah).

- C_B : Capacidad de la batería

La conexión del banco de baterías, determinara una de las características propias del sistema dependiendo de su montaje, como se puede apreciar en la Figura: 3-9.

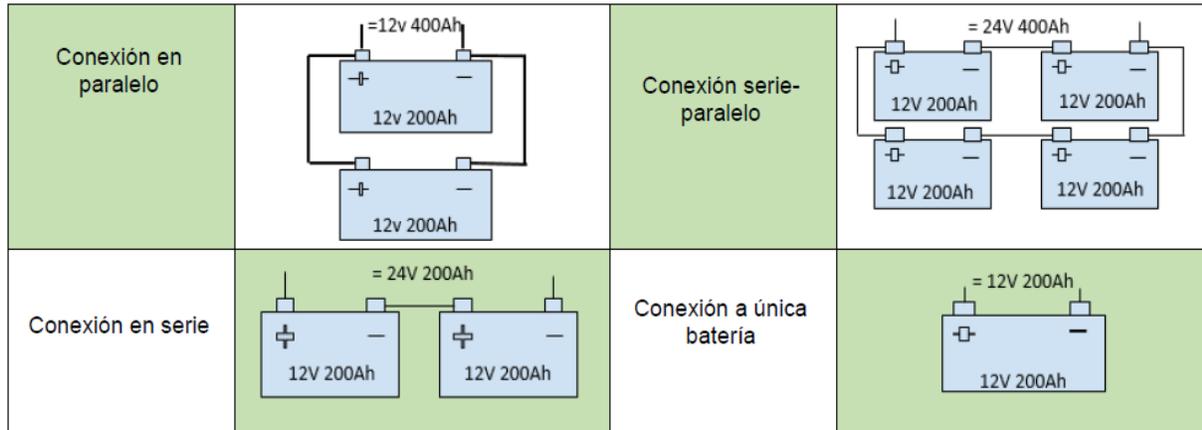


Figura 3-9: Tipos de conexión banco de baterías

Fuente: Implementación de un generador eólico tipo Savonius helicoidal en la empresa Cygni Ingeniería

3.2.5 Dimensionamiento regulador

El regulador se encarga de controlar las cargas que salen del generador eléctrico, protegiendo de esta manera una sobrecarga en las baterías, lo cual generaría una avería en las mismas. Entre sus varias funciones, evita que la energía circule en sentido contrario a su transmisión, esto, gracias a un diodo que encamina la energía únicamente en sentido generador – baterías y también corta el suministro energía cuando detecta que las baterías se encuentran cargadas [17], se determina por las siguientes ecuaciones:

La corriente de entrada del regulador se calcula:

$$I_{Entrada} = \left(\frac{P}{V}\right) * 1,25 \quad (36)$$

- $I_{Entrada}$: Corriente de entrada regulador.
- P: Potencia nominal del aerogenerador.
- V: Voltaje del aerogenerador.

La corriente de salida del regulador se calcula:

$$I_{salida} = \frac{\left(P_{dc} + \frac{P_{ac}}{V\eta_{inv}}\right) * 1,25}{V_b} \quad (37)$$

- I_{salida} : Corriente de salida regulador.
- P_{dc} : Potencia de las cargas en DC.
- P_{ac} : Potencia de las cargas en AC.
- η_{inv} : Rendimiento energético del inversor (85%).
- V_b : Voltaje de las baterías

3.2.6 Dimensionamiento inversor

El sistema de generación de eléctrica eólica entrega un voltaje 24 VDC al regulador de carga y el sistema de iluminación LED y conectividad propuesto para el parque requiere una alimentación de 110VDC, 60 Hz, por lo que es necesario la instalación de un inversor de voltaje de 24 VDC/110 VAC [17], teniendo en cuenta lo anterior se realiza el dimensionamiento del inversor mediante la siguiente ecuación:

$$P = \left(\sum P_i - Dc + \sum P_i - Ac\right) * 1,25 \quad (38)$$

- P: Potencia (W).
- P_{i-Dc} : Potencia individual de aparatos DC (W).
- P_{i-Ac} : Potencia individual de aparatos AC (W).

3.2.7 Cableado

La función principal de este elemento, es ser el medio de transporte, que conduzca energía desde dos puntos distintos, en este caso será entre los elementos que conforman el sistema de generación de energía (aerogenerador, batería, inversor, regulador), procurando evitar un escape de energía del sistema [17], se determina por las siguientes ecuaciones:

$$S = \frac{\rho_{cu} * 2 * L}{u} I * \cos\varphi \quad (39)$$

$$S = \frac{\rho_{cu} * 2 * L}{u} P \quad (40)$$

- S: Sección transversal del conductor (mm^2).
- ρ_{cu} : Resistividad del conductor de cobre $0.0172\Omega\text{mm}^2/\text{m}^2$ a 20°C .
- L: Longitud del conductor (m).
- u: Caída de tensión máxima admisible en el conductor (V), (3%).
- I: Intensidad de corriente que pasará por el conductor (A).
- V: Tensión o voltaje de suministro (V)
- P: Potencia de la carga o receptor eléctrico (W).

La resistividad del conductor de cobre a 90°C , se determina por la siguiente ecuación:

$$\rho_{cu}T^\circ = \rho_{cu}20^\circ * (1 + \alpha_{cu} * (T - 20)) \quad (41)$$

- $\rho_{cu}T^\circ$: Resistividad del conductor de cobre a T $^\circ\text{C}$.
- $\rho_{cu}20^\circ$: Resistividad del conductor de cobre $0.0172\Omega\text{mm}^2/\text{m}^2$ a 20°C .
- α_{cu} : Coeficiente de variación con la temperatura de la resistencia a 20°C .
- T: Temperatura conductor de cobre.

La Tabla 3-3 para la selección de conductores de cobre, tomada del fabricante de cables en Colombia – Centelsa, se relaciona a continuación:

Tabla 3-3: Cables Centelsa THW/THHW-LS 600V con aislamiento de PVC

CABLE CENTELSA THW / THHW-LS 600V
con aislamiento de PVC, 600 V, 75 °C/ 90°C, conductor de cobre suave

Tamaño o designación	Área nominal de la sección transversal	Espesor nominal del aislamiento	Diámetro exterior aproximado	Peso total aproximado	Capacidad de conducción de corriente*		
					Ampere		
AWG/kcmil	mm²	mm	mm	kg/100 m	60°C	75°C	90°C
14	2,08	0,76	3,4	2,9	20	20	25
12	3,31	0,76	3,9	4,2	25	25	30
10	5,26	0,76	4,5	6,2	30	35	40
8	8,37	1,14	5,9	10,4	40	50	55
6	13,3	1,52	7,6	16,8	55	65	75
4	21,2	1,52	8,8	24,8	70	85	95
2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130
1	42,4	2,03	12,2	49,0	110	130	150
1/0	53,5	2,03	13,2	59,9	125	150	170
2/0	67,4	2,03	14,3	73,7	145	175	195
3/0	85,0	2,03	15,6	90,9	165	200	225
4/0	107	2,03	17,0	112,6	195	230	260
250	127	2,41	19,0	134,2	215	255	290
300	152	2,41	20,3	158,4	240	285	320
350	177	2,41	21,6	182,4	260	310	350
400	203	2,41	22,7	207,4	280	335	380
500	253	2,41	24,8	254,9	320	380	430
600	304	2,79	27,6	306,4	355	420	475
750	380	2,79	30,2	383,5	400	475	535
1 000	507	2,79	34,0	504,3	455	545	615

NOTA: Datos aproximados sujetos a tolerancias de manufactura

* Basada en la tabla 310-16 de la NTC 2050 para una temperatura ambiente de 30°C.

Fuente: <https://www.centelsa.com/archivos/Manual-del-electrico-2017>

3.3 Elaboración del aerogenerador en SolidWorks

La elaboración del aerogenerador no fue necesaria realizarla desde 0, conociendo el diámetro del rotor y una vez seleccionado el aerogenerador, se descargó el plano en formato DWG (AutoCAD) de la página del fabricante de aerogeneradores en España, <https://www.enair.es/es/aerogeneradores/e30pro>.

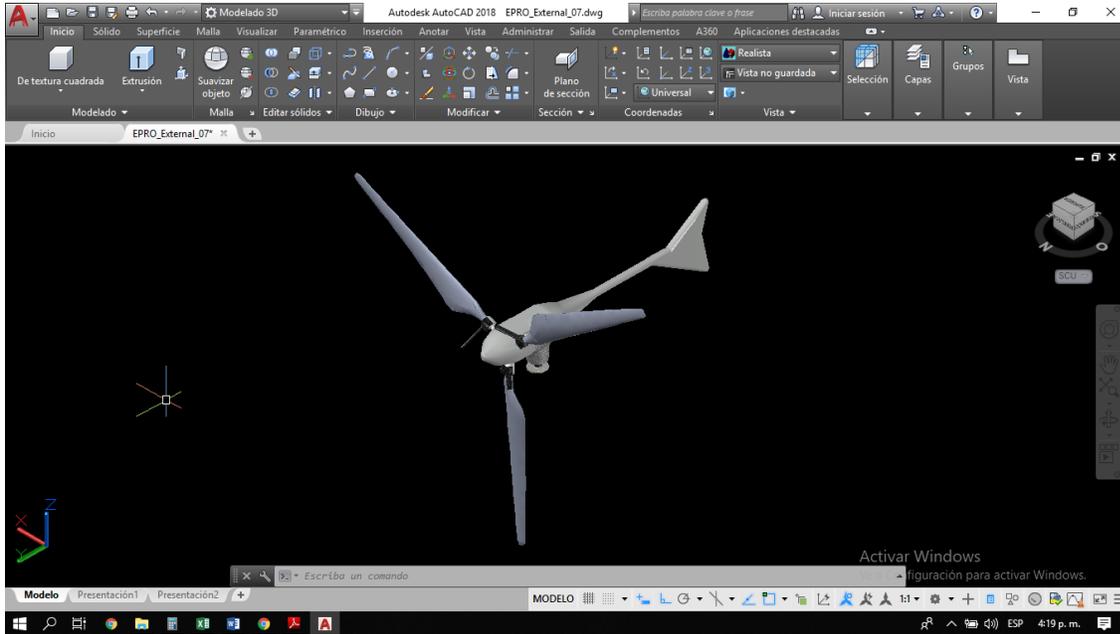


Figura 3-10: Plano 3D aerogenerador en DWG unidades en milímetros
Fuente: Autores

Seguidamente se cambió la escala del dibujo de milímetros a pulgadas, ya que el software de SolidWorks no permitía utilizar la opción de milímetros.

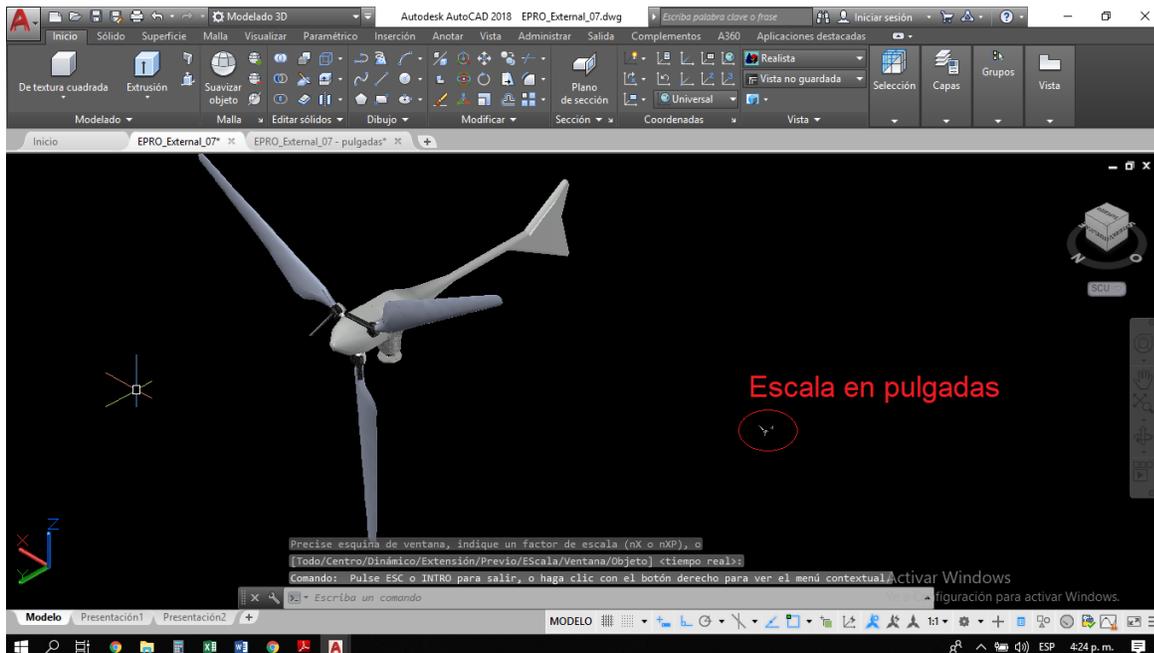


Figura 3-11: Cambio de escala dibujo 3D aerogenerador
Fuente: Autores

Importamos el dibujo 3D de AutoCAD a SolidWorks.

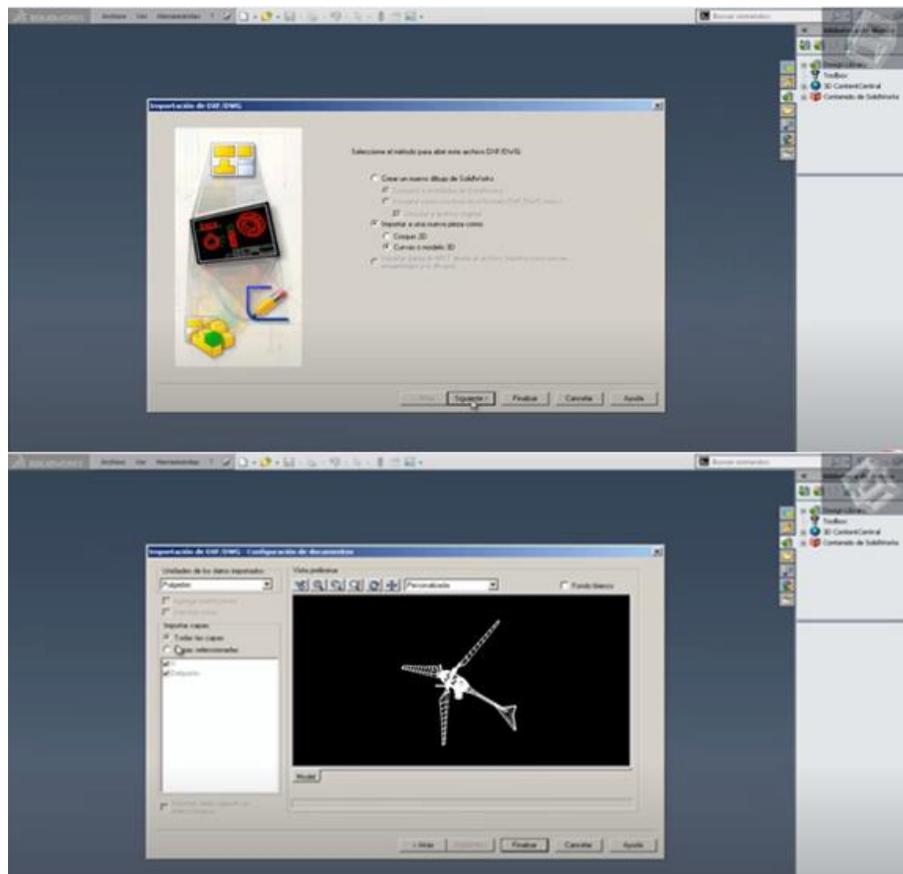


Figura 3-12: Importación dibujo aerogenerador de AutoCAD a SolidWorks

Fuente: Autores

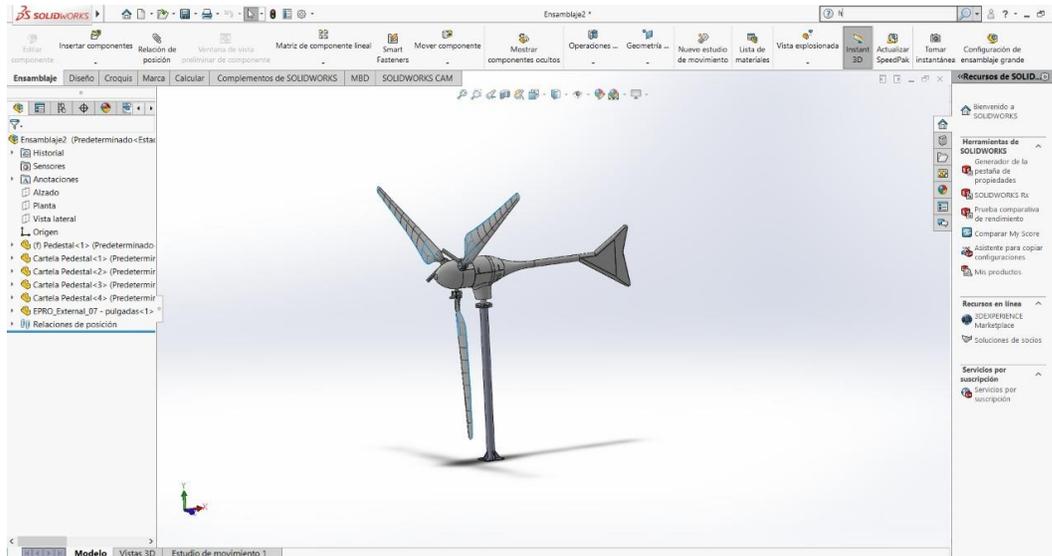


Figura 3-13: Dibujo aerogenerador en SolidWorks

Fuente: Autores

3.4 Simulación CFD

La simulación CFD (Computacional Fluid Dynamics, siglas en inglés), es la rama de la mecánica de fluidos que utiliza diversos métodos y algoritmos con el fin de analizar y resolver problemas sobre el comportamiento de fluidos computacional. Para este análisis se tiene en cuenta la energía, el momento y la conservación de la masa. Utilizando esta técnica y un ordenador de gran potencia, se pueden obtener resultados bastante fiables del comportamiento de dicho fluido.

3.4.1 Procedimiento de la simulación CFD

La simulación CFD, utiliza la aproximación de variables continuas, con un número finito de puntos. Procedimiento que es llamado discretización, el cual consiste en resolver complejas ecuaciones integrales. Para obtener estos resultados realiza ecuaciones aproximadas, más simples, y de tipo algebraico. Al forzar un número elevado de iteraciones y valor muy pequeño de error, se asegura de que los resultados sean fiables y precisos.

3.4.2 Pasos en una simulación CFD

- **Preparación de la pieza a simular**

Los pasos requeridos para la preparar la pieza a simular son:

- ✓ Crear el tipo la malla que cubrirá a la pieza.
- ✓ La elección de las variables y la imposición de las condiciones de contorno.
- ✓ Elegir adecuadamente que desea analizar y cuales son resultados que se desean obtener.
- ✓ Identificación de las capacidades técnicas del ordenador a utilizar.

• Solución de las ecuaciones

Durante la solución de ecuaciones, es el momento donde se lleva a cabo la simulación CFD y las iteraciones de las ecuaciones para llegar a las soluciones requeridas.

• Análisis de los resultados

Durante los análisis resultados, en donde se resuelven las principales del problema, en este punto las variables del problema como velocidad del flujo, viscosidad, densidad y la presión, toman valores para los distintos puntos que se han impuesto al mallado de la estructura. Los datos son entregados en escalas o gráficos de colores.

3.4.3 Verificación de la independencia de la malla

La discretización espacial del dominio o verificación de la independencia de la malla es una de las primeras actividades a realizar cuando se hace uso de la dinámica de fluidos computacional y así poder crear sobre esa discretización espacial, la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos. Los métodos de discretización espacial del dominio más importantes son: Elementos finitos, volúmenes finitos y diferencias finitas.

En necesario realizar una discretización espacial para pasar luego a la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Esta discretización espacial es el mallado que hay que aplicar a lo que se quiera analizar y se pueden diferenciar dos tipos de mallado:

• Mallas estructuradas

Una de las principales ventajas de este tipo de mallas, es el orden de los elementos en la memoria ya que de esta manera el acceso a los datos es muy rápido y sencillo, solo hay que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Cuando se presentan líneas cartesianas, Esto nos representa que todas las líneas que forman las celdas son paralelas al sistema de coordenada y cuando se presenten líneas curvilíneas, estas tienden a deformarse para adaptarse a la forma que tiene la estructura que se va a analizar.

También existen mallas ortogonales, la cuales se cortan entre sí por ángulos de 90° . Sin embargo, con estas mallas los flujos pueden considerarse axisimétricos.

• Mallas no estructuradas

Estas mallas presentan una gran ventaja, debido a que son capaces de ajustarse mucho mejor a geometrías complejas en comparación con las mallas estructuradas. Se debe a que se generan automáticamente que los triángulos (2D) y los tetraedros (3D) para ajustarse a la geometría, independientemente de la dificultad de la misma. Además, el tiempo para crear en una geometría un mallado no estructurado es mucho menor.

La desventaja de los mallados no estructurados es que ocupan más memoria que los mallados estructurados.

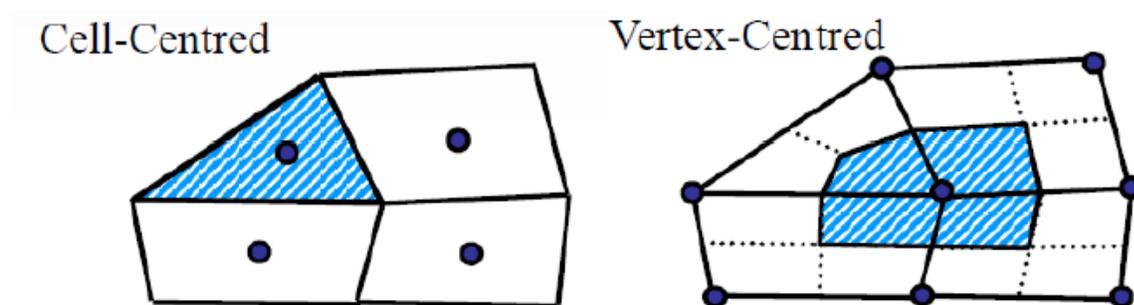


Figura 3-14: Mallas con puntos en el centro y puntos en los vértices
Fuente: Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3d de dinámica computacional de fluidos

3.4.4 Condiciones de contorno e iniciales

Las condiciones de contorno e iniciales se deben imponer o especificar cada vez que se vaya a resolver las ecuaciones de gobierno, independiente de la metodología que se emplee.

Las condiciones iniciales determinan las variables fluidas en el instante $t=0$, o en el primer paso del esquema de integración. Cuando más cerca sea la condición inicial a la solución

del problema, será menor el tiempo necesario empleado para llegar a la convergencia de las ecuaciones. Una práctica general en aerodinámica es imponer como valores iniciales las condiciones de flujo libre en velocidad, presión, densidad y temperatura.

En toda simulación numérica, se considera una parte del dominio fluido para la resolución de las ecuaciones. Esto da lugar a un contorno artificial donde los valores de las variables fluidas tienen que ser especificados a través de lo que se conoce como condiciones de contorno. En general, las condiciones de contorno se pueden clasificar en:

- ✓ Condiciones de contorno de flujo libre: Las condiciones de contorno de flujo libre pueden ser de entrada, de salida o de entrada/salida. Las condiciones de entrada se especifican mediante las condiciones en el infinito ($\rho^\infty, \mu^\infty, u^\infty, v^\infty, \omega^\infty, p^\infty, T^\infty$).
- ✓ Condiciones de contorno de pared: Estas condiciones modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de las superficies. Donde se impone una condición de contorno de no deslizamiento (velocidad nula en el punto de contacto, $u=0$), o de tangencia (velocidad normal a la superficie igual a cero), como se puede observar en la siguiente figura.

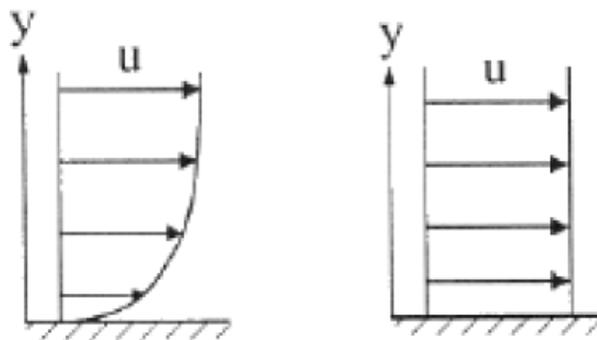


Figura 3-15: Condición de contorno de no deslizamiento (izquierda) y de tangencia (derecha) en el contacto del flujo con una superficie

Fuente: Análisis y diseño de un aerogenerador mediante simulación 3d de dinámica computacional de fluidos

4. Resultados y discusión

4.1 Cálculo de iluminación

Para realizar el análisis de la cantidad de luminarias necesarias para la iluminación que cumpla con lo establecido en el Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público “Retilap” de 20 luxes en parque de la 86, ver Tabla 3-2, se procede a seleccionar una luminaria tipo led con alimentación a 110 VAC.

Luminaria seleccionada:



Proyector SYLVEO LED RGBW IP66 50W

- Tecnología: LED integrada.
- Carcasa: Aluminio.
- Color carcasa: RAL9006 aluminio.
- Consumo total de energía: 50W.
- Corriente: 0,22A.
- Tensión: 100-240 VAC.
- Flujo luminoso de la luminaria (lm): 2500.
- Dimensiones: 287x241x97 mm, (LxAnxAI),
- Grado de protección: IK08, IP66, Clase I.
- Vida útil media: 50000 horas.

Figura 4-1: Proyector Sylveo Led RGBW

Fuente: <https://www.sylvania-lighting.com/product/es-es/products/0048016/>

Tabla 4-1: Cálculo de numero de luminarias requeridas

CALCULO NUMERO DE LUMINARIAS REQUERIDAS

COEFICIENTE DE UTILIZACIÓN		
E _{prom} = Iluminancia promedio (luxes)	20,00	luxes
S = Interdistancia de luminarias (espacio entre 2 luminarias) (m)	8,00	m
W = Ancho de la superficie (m)	16,00	m
∅ = Flujo mantenido de la bombilla (lm)	2500,00	lm
K_t = Coeficiente de utilización	1,024	

$$K_t = \frac{E_{prom} * S * W}{\emptyset}$$

E _{prom} = Iluminancia promedio (lx)	20,00	luxes
A: Área (m ²)	676,00	m ²
K _t = Coeficiente de utilización	1,024	
FM = Factor de mantenimiento.	0,850	%
∅_{tot}: Flujo luminoso total (lm)	15533,09	

$$\emptyset_{tot} = \frac{E_{prom} * A}{K_t * F_m}$$

∅ _{tot} : Flujo luminoso total (lm)	15533,09	
n: número de bombillas por luminaria	1,00	
∅ = Flujo mantenido de la bombilla (lm)	2500,000	
N: Número de luminarias	6,21	
Numero de luminarias requeridas	6	

$$N = \frac{\emptyset_{tot}}{\eta * \emptyset}$$

Fuente: Autores

Para la iluminación del parque se debe seleccionar 6 luminarias de 50 W, flujo luminoso de la luminaria (lm): 2500, voltaje de 110 VAC, las cuales deben ser instaladas a una distancia entre ellas de 16 metros entre ellas en cada carrera del parque. Plano de ubicación de luminarias (Figura 4-2).

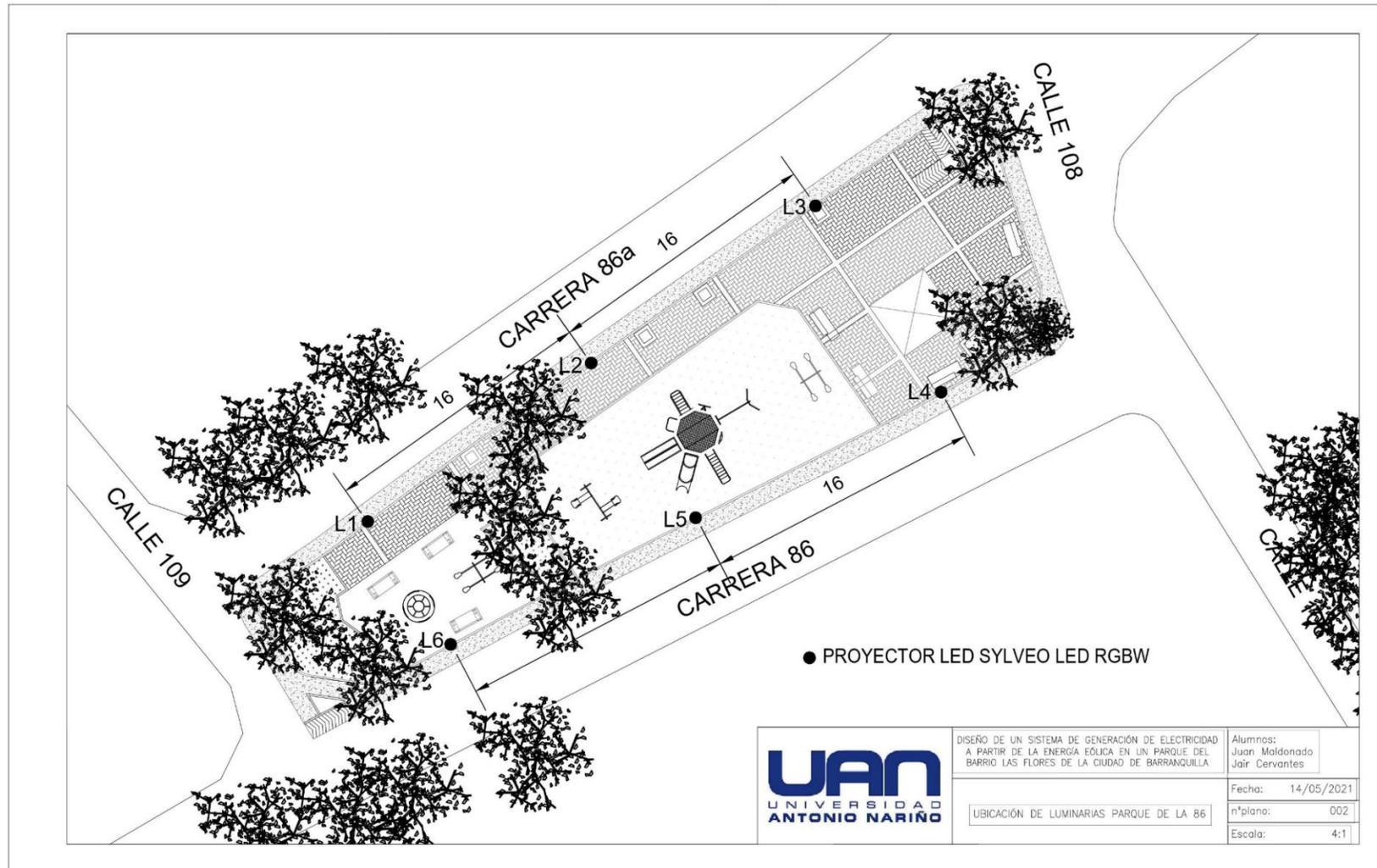


Figura 4-2: Plano ubicación de luminarias Parque de la 86
Fuente: Autores

4.2 Caracterización energética eléctrica del parque

Conociendo los componentes requeridos para la iluminación y conectividad del parque, se realizó el dimensionamiento de la carga eléctrica del sistema.

Tabla 4-2: Dimensionamiento de carga eléctrica sistema

DISEÑO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD A PARTIR DE LA ENERGÍA EÓLICA EN UN PARQUE DEL BARRIO LAS FLORES DE LA CIUDAD DE BARRANQUILLA										
DIMENSIONAMIENTO DE CARGA ELÉCTRICA SISTEMA										
Nº	Descripción	Cant	Nivel de Alimentación		Consumo de Corriente (A)	Potencia de Equipo (W)	Tiempo de Operación (horas)	Energía Día (Wh)	Total Potencia del Equipo (Wh)	TOTAL Energía Día
			DC	AC						
1	Luminaria LED 50 W	6		110	0,45	50,00	12	600	300,00	3600,00
2	Toma Corriente (Carga PC o Celular)	3		110	0,55	60,00	12	720	180,00	2160,00
3	Access Point o Wireless Access Point	1		110	0,11	11,60	24	278	11,60	278,40
4	Inversor 24VDC - 120VAC (Corriente de entrada sin carga)	1	24		4,13	99,00	24	2376	99,00	2376,00

PT: Potencia instalada (W)	590,600
ET: Energía total requerida por el sistema (Wh)	8414,400

Fuente: Autores

La potencia instalada que requiere el sistema es de 590,6 W y la energía total requerida por el sistema es de 8414.4 Wh.

4.3 Dimensionamiento de componentes del sistema

4.3.1 Aerogenerador

Se realizó los cálculos para el dimensionamiento del aerogenerador, como resultado se requiere un aerogenerador de rotor de diámetro $\geq 3,72$ metros y de potencia nominal o útil de $\geq 1338,3$ W.

Tabla 4-3: Cálculo dimensionamiento aerogenerador

CALCULO AEROGENERADOR		
DIAMETRO DEL ROTOR		
PT: Potencia instalada (W)	590,60	W
Coefficiente de potencia	0,593	%
Pv: Potencia eólica de la corriente de viento (Potencia del aerogenerador en condiciones ideales de funcionamiento); (W)	995,95	W
Rendimiento de la hélice: 85 %	0,85	%
Rendimiento del multiplicador: 96 %	0,96	%
Rendimiento del alternador: 95 %	0,95	%
Rendimiento del transformador: 96 %	0,96	%
Rt: Rendimiento total del aerogenerador	0,44	%
Pútil: Potencia útil aerogenerador (Potencia del aerogenerador teniendo en cuenta todos los valores de rendimientos de los componentes); (W)	1338,30	W
ρ: Densidad (Kg/m3)	1,20	Kg/m3
V: velocidad (m/s)	5,90	m/s
A: Área (m2)	10,86	m2
D: Diametro del rotor (m)	3,72	m

$$P_v = \frac{1}{2} * \rho * A * V^3$$

$$R_t = 0,593 * 0,85 * 0,96 * 0,95 * 0,96 = 0,44$$

$$A = \frac{2 * P_v}{\rho * V^3} \quad d = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Fuente: Autores

4.3.2 Banco de baterías

Se realizó los cálculos para el dimensionamiento del banco de baterías, como resultado se requiere un banco de baterías que contenga 2 baterías > 573Ah, en conexión tipo serie para un voltaje de 24 VDC.

Tabla 4-4: Cálculo dimensionamiento del banco de baterías

CALCULO DE BATERIAS		
1. CONSUMO DIARIO MEDIO DE LA CARGA		
1. ED: Consumo diario de energía (Wh/día)	8414,40	Wh/día
2. Vnom: Tensión de suministro de la batería (V)	24	Vdc
3. LD: Consumo diario medio de la carga (Ah)	350,6	Ah
2. CAPACIDAD BANCO DE BATERIAS		
1. A: Autonomia del sistema (días)	1	días
2. LD: Consumo diario medio de la carga (Ah)	350,60	Ah
3. PDmax: Profundidad de descarga máxima	0,90	%
4. ηinv: Rendimiento energético del inversor	0,85	%
4. ηrb: Rendimiento del regulador + batería	0,80	%
5. C: Capacidad del banco de baterías (Ah)	572,88	Ah
3. CAPACIDAD BANCO DE BATERIAS		
1. C: Capacidad del banco de baterías (Ah)	1	días
2. CB: Capacidad de la batería	600	Ah
3. Vb: Voltaje de la batería	12	Vdc
4. Numero de baterías en paralelo	1	
5. Numero de baterías en serie	2	
CANTIDAD DE BATERIAS	2	Unidades

$$L_D = \frac{E_D}{V_{nom}}$$

$$C = \frac{A * L_D}{PD_{max} * \eta_{inv} * \eta_{rb}}$$

$$N_B = \frac{C}{C_B}$$

Fuente: Autores

4.3.3 Regulador de carga

Se realizó los cálculos para el dimensionamiento del regulador de carga, como resultado se requiere seleccionar un regulador de voltaje que soporte una corriente de entrada > 99 A y soporte una corriente de salida > 36 A.

Tabla 4-5: Cálculo dimensionamiento del regulador de carga

CALCULO DEL REGULADOR DE CARGA		
I (entrada del regulador)=	98,96	A
1. P: Potencia nominal del aerogenerador	1900	W
2. V: Voltaje del aerogenerador	24	Vdc
3. A: Corriente del aerogenerador	79,17	A
4. Factor de seguridad	1,25	%
I (salida del regulador)=	35,28	A
1. Pdc: Potencia de las carga en DC	99,00	W
2. Pac: Potencia de las carga en AC	491,60	W
3. η_{inv} : Rendimiento energético del inversor	0,85	%
4. Vb: Voltaje de las baterías	24	Vdc
5. Factor de seguridad	1,25	%

$$I_{Entrada} = \left(\frac{P}{V}\right) * 1,25$$

$$I_{Salida} = \frac{(P_{dc} + \frac{P_{ac}}{V \eta_{inv}}) * 1,25}{V_b}$$

Fuente: Autores

4.3.4 Inversor

Se realizó los cálculos para el dimensionamiento del inversor, como resultado se requiere un inversor > 739W.

Tabla 4-6: Cálculo dimensionamiento del inversor

CALCULO DEL INVERSOR		
1. Pdc: Potencia de las carga en DC	99,00	W
2. Pac: Potencia de las carga en AC	491,60	W
3. Factor de seguridad	1,25	
4. PT: Potencia Instalada	738,25	W

$$P = \left(\sum P_i - Dc + \sum P_i - Ac\right) * 1,25$$

Fuente: Autores

4.3.5 Cableado

Se realizó los cálculos para el dimensionamiento del calibre de cable, para cada uno de los elementos que conforman el sistema de generación de energía, como resultado se requiere:

Tabla 4-7: Cálculo conductor aerogenerador – regulador

CALCULO DE CABLEADO																																																						
1. CONDUCTOR AEROGENERADOR - REGULADOR																																																						
ρ _{cu} : Resistividad del conductor de cobre 20°C	0,0172	Ωmm ² /m ²																																																				
α _{cu} : Coeficiente de variación con la temperatura de la resistencia a 20 °C	0,0039	°C-1																																																				
ρ _{cu} : Resistividad del conductor de cobre 90°C	0,0220	Ωmm ² /m ²																																																				
L: Longitud del conductor (m)	10	m																																																				
u: Caída de tensión máxima admisible en el conductor (V), (3%)	0,72	V																																																				
V: Tensión o voltaje de suministro (V)	24	V																																																				
P: Potencia de la carga o receptor eléctrico (W)	1900	W																																																				
cos φ	0,80																																																					
S: Sección transversal del conductor	48,34	mm²																																																				
I: Intensidad de corriente que pasará por el conductor (A)	98,96	A																																																				
Calibre conductor AWG	1/0	AWG																																																				
CABLE CENTELSA THW / THHW-LS 600V con aislamiento de PVC, 600 V, 75 °C/ 90°C, conductor de cobre suave																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tamaño o designación AWG/kcmil</th> <th rowspan="2">Área nominal de la sección transversal mm²</th> <th rowspan="2">Espesor nominal del aislamiento mm</th> <th rowspan="2">Diámetro exterior aproximado mm</th> <th rowspan="2">Peso total aproximado kg/100 m</th> <th colspan="3">Capacidad de conducción de corriente*</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Ampere</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th>60°C</th> <th>75°C</th> <th>90°C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>33,6</td> <td>1,52</td> <td>10,3</td> <td>37,2</td> <td>95</td> <td>115</td> <td>130</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>42,4</td> <td>2,03</td> <td>12,2</td> <td>49,0</td> <td>110</td> <td>130</td> <td>150</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td>1/0</td> <td>53,5</td> <td>2,03</td> <td>13,2</td> <td>59,9</td> <td>125</td> <td>150</td> <td>170</td> </tr> <tr> <td>2/0</td> <td>67,4</td> <td>2,03</td> <td>14,3</td> <td>73,7</td> <td>145</td> <td>175</td> <td>195</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño o designación AWG/kcmil	Área nominal de la sección transversal mm ²	Espesor nominal del aislamiento mm	Diámetro exterior aproximado mm	Peso total aproximado kg/100 m	Capacidad de conducción de corriente*			Ampere								60°C	75°C	90°C	2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130	1	42,4	2,03	12,2	49,0	110	130	150	1/0	53,5	2,03	13,2	59,9	125	150	170	2/0	67,4	2,03	14,3	73,7	145	175	195			
Tamaño o designación AWG/kcmil						Área nominal de la sección transversal mm ²	Espesor nominal del aislamiento mm	Diámetro exterior aproximado mm	Peso total aproximado kg/100 m	Capacidad de conducción de corriente*																																												
	Ampere																																																					
					60°C	75°C	90°C																																															
2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130																																															
1	42,4	2,03	12,2	49,0	110	130	150																																															
1/0	53,5	2,03	13,2	59,9	125	150	170																																															
2/0	67,4	2,03	14,3	73,7	145	175	195																																															

$$\rho_{cu}T^{\circ} = \rho_{cu}20^{\circ} * (1 + \alpha_{cu} * (T - 20))$$

$$S = \frac{\rho_{cu} * 2 * L}{u} P$$

Fuente: Autores

Tabla 4-8: Cálculo conductor regulador – batería

2. CONDUCTOR REGULADOR - BATERIA																																																						
ρ _{cu} : Resistividad del conductor de cobre	0,0172	Ωmm ² /m ²																																																				
α _{cu} : Coeficiente de variación con la temperatura de la resistencia a 20 °C	0,0039	°C-1																																																				
ρ _{cu} : Resistividad del conductor de cobre 90°C	0,0220	Ωmm ² /m ²																																																				
L: Longitud del conductor (m)	8	m																																																				
u: Caída de tensión máxima admisible en el conductor (V), (3%)	0,72	V																																																				
V: Tensión o voltaje de suministro (V)	24	V																																																				
P: Potencia de la carga o receptor eléctrico (W)	1900	W																																																				
cos φ	0,80																																																					
S: Sección transversal del conductor	38,68	mm²																																																				
I: Intensidad de corriente que pasará por el conductor (A)	98,96	A																																																				
Calibre conductor AWG	1/0	AWG																																																				
CABLE CENTELSA THW / THHW-LS 600V con aislamiento de PVC, 600 V, 75 °C/ 90°C, conductor de cobre suave																																																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tamaño o designación AWG/kcmil</th> <th rowspan="2">Área nominal de la sección transversal mm²</th> <th rowspan="2">Espesor nominal del aislamiento mm</th> <th rowspan="2">Diámetro exterior aproximado mm</th> <th rowspan="2">Peso total aproximado kg/100 m</th> <th colspan="3">Capacidad de conducción de corriente*</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Ampere</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th>60°C</th> <th>75°C</th> <th>90°C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>33,6</td> <td>1,52</td> <td>10,3</td> <td>37,2</td> <td>95</td> <td>115</td> <td>130</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>42,4</td> <td>2,03</td> <td>12,2</td> <td>49,0</td> <td>110</td> <td>130</td> <td>150</td> </tr> <tr style="border: 2px solid red;"> <td>1/0</td> <td>53,5</td> <td>2,03</td> <td>13,2</td> <td>59,9</td> <td>125</td> <td>150</td> <td>170</td> </tr> <tr> <td>2/0</td> <td>67,4</td> <td>2,03</td> <td>14,3</td> <td>73,7</td> <td>145</td> <td>175</td> <td>195</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño o designación AWG/kcmil	Área nominal de la sección transversal mm ²	Espesor nominal del aislamiento mm	Diámetro exterior aproximado mm	Peso total aproximado kg/100 m	Capacidad de conducción de corriente*			Ampere								60°C	75°C	90°C	2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130	1	42,4	2,03	12,2	49,0	110	130	150	1/0	53,5	2,03	13,2	59,9	125	150	170	2/0	67,4	2,03	14,3	73,7	145	175	195			
Tamaño o designación AWG/kcmil						Área nominal de la sección transversal mm ²	Espesor nominal del aislamiento mm	Diámetro exterior aproximado mm	Peso total aproximado kg/100 m	Capacidad de conducción de corriente*																																												
	Ampere																																																					
					60°C	75°C	90°C																																															
2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130																																															
1	42,4	2,03	12,2	49,0	110	130	150																																															
1/0	53,5	2,03	13,2	59,9	125	150	170																																															
2/0	67,4	2,03	14,3	73,7	145	175	195																																															
Se selecciona cable #1/0 AWG, por ser comercial, el cable #1 AWG es bajo fabricación																																																						

$$\rho_{cu}T^{\circ} = \rho_{cu}20^{\circ} * (1 + \alpha_{cu} * (T - 20))$$

$$S = \frac{\rho_{cu} * 2 * L}{u} P$$

Fuente: Autores

Tabla 4-9: Cálculo conductor regulador – inversor

3. CONDUCTOR REGULADOR - INVERSOR		
pcu: Resistividad del conductor de cobre	0,0172	Ωmm ² /m ²
αcu: Coeficiente de variación con la temperatura de la resistencia a 20 °C	0,0039	°C ⁻¹
pcu: Resistividad del conductor de cobre 90°C	0,0220	Ωmm ² /m ²
L: Longitud del conductor (m)	8	m
u: Caída de tensión máxima admisible en el conductor (V), (3%)	0,72	V
V: Tensión o voltaje de suministro (V)	24	V
P: Potencia de la carga o receptor eléctrico (W)		W
cos φ	0,80	
S: Sección transversal del conductor	13,788	mm²
I: Intensidad de corriente que pasará por el conductor (A)	35,279	A
Calibre conductor AWG	4	AWG

CABLE CENTELSA THW / THHW-LS 600V con aislamiento de PVC, 600 V, 75 °C/ 90°C, conductor de cobre suave							
Tamaño o designación	Área nominal de la sección transversal	Espesor nominal del aislamiento	Diámetro exterior aproximado	Peso total aproximado	Capacidad de conducción de corriente*		
					Ampere		
AWG/kcmil	mm ²	mm	mm	kg/100 m	60°C	75°C	90°C
14	2,08	0,76	3,4	2,9	20	20	25
12	3,31	0,76	3,9	4,2	25	25	30
10	5,26	0,76	4,5	6,2	30	35	40
8	8,37	1,14	5,9	10,4	40	50	55
6	13,3	1,52	7,6	16,8	55	65	75
4	21,2	1,52	8,8	24,8	70	85	95
2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130

$$\rho_{cu} T^{\circ} = \rho_{cu} 20^{\circ} * (1 + \alpha_{cu} * (T - 20))$$

$$S = \frac{\rho_{cu} * 2 * L}{u} I * \cos \phi$$

Fuente: Autores

Tabla 4-10: Cálculo conductor inversor - carga

4. CONDUCTOR INVERSOR - CARGA		
pcu: Resistividad del conductor de cobre	0,0172	Ωmm ² /m ²
αcu: Coeficiente de variación con la temperatura de la resistencia a 20 °C	0,0039	°C ⁻¹
pcu: Resistividad del conductor de cobre 90°C	0,0220	Ωmm ² /m ²
L: Longitud del conductor (m)	55	m
u: Caída de tensión máxima admisible en el conductor (V), (3%)	3	V
V: Tensión o voltaje de suministro (V)	110	V
P: Potencia de la carga o receptor eléctrico (W)		W
cos φ	1	
S: Sección transversal del conductor	20,682	mm²
I: Intensidad de corriente que pasará por el conductor (A)	35,279	A
Calibre conductor AWG	4	AWG

CABLE CENTELSA THW / THHW-LS 600V con aislamiento de PVC, 600 V, 75 °C/ 90°C, conductor de cobre suave							
Tamaño o designación	Área nominal de la sección transversal	Espesor nominal del aislamiento	Diámetro exterior aproximado	Peso total aproximado	Capacidad de conducción de corriente*		
					Ampere		
AWG/kcmil	mm ²	mm	mm	kg/100 m	60°C	75°C	90°C
14	2,08	0,76	3,4	2,9	20	20	25
12	3,31	0,76	3,9	4,2	25	25	30
10	5,26	0,76	4,5	6,2	30	35	40
8	8,37	1,14	5,9	10,4	40	50	55
6	13,3	1,52	7,6	16,8	55	65	75
4	21,2	1,52	8,8	24,8	70	85	95
2	33,6	1,52	10,3	37,2	95	115	130

$$\rho_{cu} T^{\circ} = \rho_{cu} 20^{\circ} * (1 + \alpha_{cu} * (T - 20))$$

$$S = \frac{\rho_{cu} * 2 * L}{u} I * \cos \phi$$

Fuente: Autores

4.4 Selección de componentes y especificaciones técnicas

Teniendo en cuenta los estudios y cálculos realizados, se realizó la selección y especificaciones técnicas de los componentes que conforman el sistema de generación de energía eólica.

4.4.1 Aerogenerador

Tabla 4-11: Especificaciones técnicas aerogenerador

ESPECIFICACIONES TECNICAS AEROGENERADOR	
	Marca: ENAIR-PRO
	Referencia: E30PRO
	Número de palas: 3
	Diámetro del rotor: 3,8 m
	Material palas: Fibra de vidrio con resinas y núcleo de poliuretano
	Generador: 2500 rpm nominales con imanes de neodimio
	Potencia: 3000W
	Potencia nominal: 1900W
	Tensión: 24V
	Velocidad nominal: 11m/s

Fuente: Autores

GRÁFICAS DE PRODUCCIÓN

$$C_p = 0.41$$

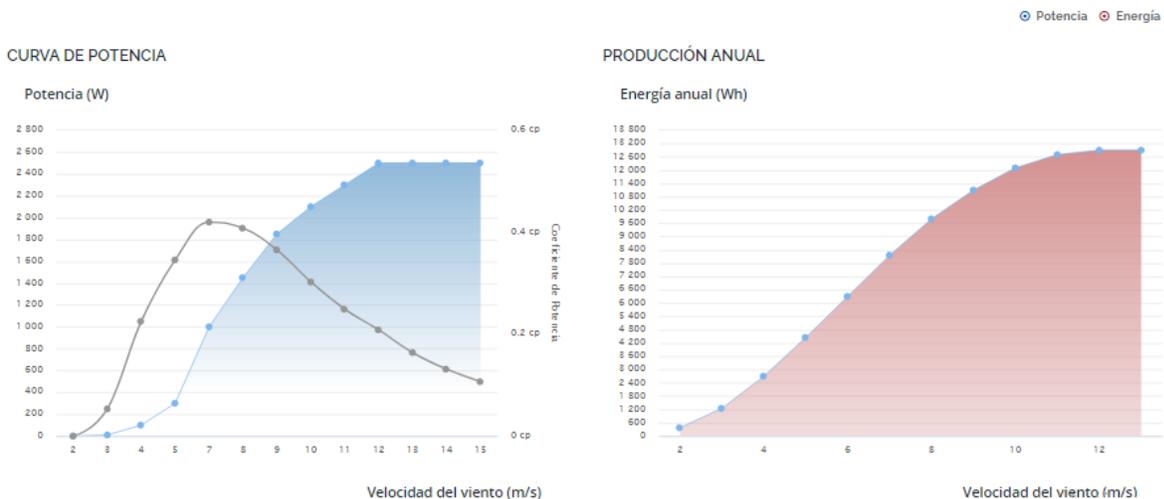


Figura 4-3: Graficas de producción aerogenerador E30PRO

Fuente: Autores

4.4.2 Banco de baterías

Se requieren para el sistema 2 baterías, con las siguientes especificaciones:

Tabla 4-12: Especificaciones técnicas baterías

ESPECIFICACIONES TECNICAS BATERÍAS	
	Marca: ULTRACELL
	Referencia: UZS600
	Voltaje: 12V
	Capacidad de la batería: 600Ah
	Numero de polos: 2
	Energía útil almacenada: 50%
	Tipo de terminal: Standard
	Max Discharge Current: 1300A (5s)

Fuente: Autores

4.4.3 Regulador de carga

Se requiere un regulador con control de carga de 120 A.

Tabla 4-13: Especificaciones técnicas regulador de carga

ESPECIFICACIONES TECNICAS REGULADOR DE CARGA	
	Marca: ENAIR-PRO
	Referencia: RCE-ENAIR-120
	Tensión: 24/48V
	Control de carga: 120A
	Precisión: $24V \leq 0.1\% \pm 50mV$
	Mínima tensión continua para operar: 9VDC
	Máxima tensión continua para operar: 68VDC
	Potencia de pulso: 7000W
Consumo en funcionamiento: 50 mA	

Fuente: Autores

4.4.4 Inversor

Tabla 4-14: Especificaciones técnicas inversor

ESPECIFICACIONES TECNICAS DEL INVERSOR	
	Marca: IPower serie
	Referencia: IP500-21
	Tensión de entrada: 24VDC
	Rango de tensión de entrada: 21.6-32VDC
	Tensión de salida: 120VAC (-10%±5%)
	Frecuencia de salida: 50/60 ± 0.1Hz
	Potencia máxima :1000W
	Max. Eficiencia: 91%
	Consumo sin carga: < 0.5 A

Fuente: Autores

4.4.5 Cableado

Los cables seleccionados para los elementos que conforman el sistema de generación de energía son:

- ✓ Aerogenerador – regulador: Acometida en cable 2x #1/0 AWG + 1#2 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.
- ✓ Regulador - batería, inversor: Acometida en cable 2x #1/0 AWG + 1#2 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.
- ✓ Regulador – inversor: Acometida en cable 2x #6 AWG + 1#8 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.
- ✓ Inversor – carga: Acometida en cable 2x #6 AWG + 1#8 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.

4.4.6 Conectividad y tomas corrientes

Tabla 4-15: Especificaciones técnicas equipo de conectividad

ESPECIFICACIONES TECNICAS EQUIPO DE CONECTIVIDAD	
	ROUTER:
	Marca: MELOM
	Referencia: R658N
	Estándar WiFi IEEE 802.11n 2.4GHz de largo alcance 2x2 300Mbps tecnología MIMO
	Mayor cobertura, Router de larga distancia, mejor rendimiento y mayor sensibilidad de recepción WiFi.
	Alimentación con adaptador corriente salida 12V - 1A
	ADAPTADOR WiFi USB:
	Marca: MELOM
	Referencia: AWUS036NHR
	CHIPSET REALTEK RTL8188RU compatible WiFislax y auditoria WiFi
	2000MW de potencia
	Conector RP-Sma para antenas WiFi externas
	1 metro de cable USB
	PARABÓLICA: WiFi de 24dbi alcance 5km
	Marca: MELOM
	Referencia: AGA2424T
	Frecuencia wifi estándar 2,4GHz.
	Construcción en Aluminio de alta calidad
Protección contra radiación UV y contra rayos	
Ganancia: 24dBi REALES	
Impedancia: 50 Ohm	

Fuente: Autores

Tabla 4-16: Especificaciones técnicas toma corriente

ESPECIFICACIONES TECNICAS TOMA CORRIENTE	
	Marca: LEVINTON
	Referencia: ICFT
	Tensión de entrada: 125 VAC
	Corriente: 20 A
	Indicación de estado: Verde (normal); Rojo (alerta), Sin indicación: no hay electricidad
	2 polos, 3 hilos
	NEMA 5-20 R
	Fuente: Autores

4.5 Elaboración de planos y CAD isométrico del aerogenerador

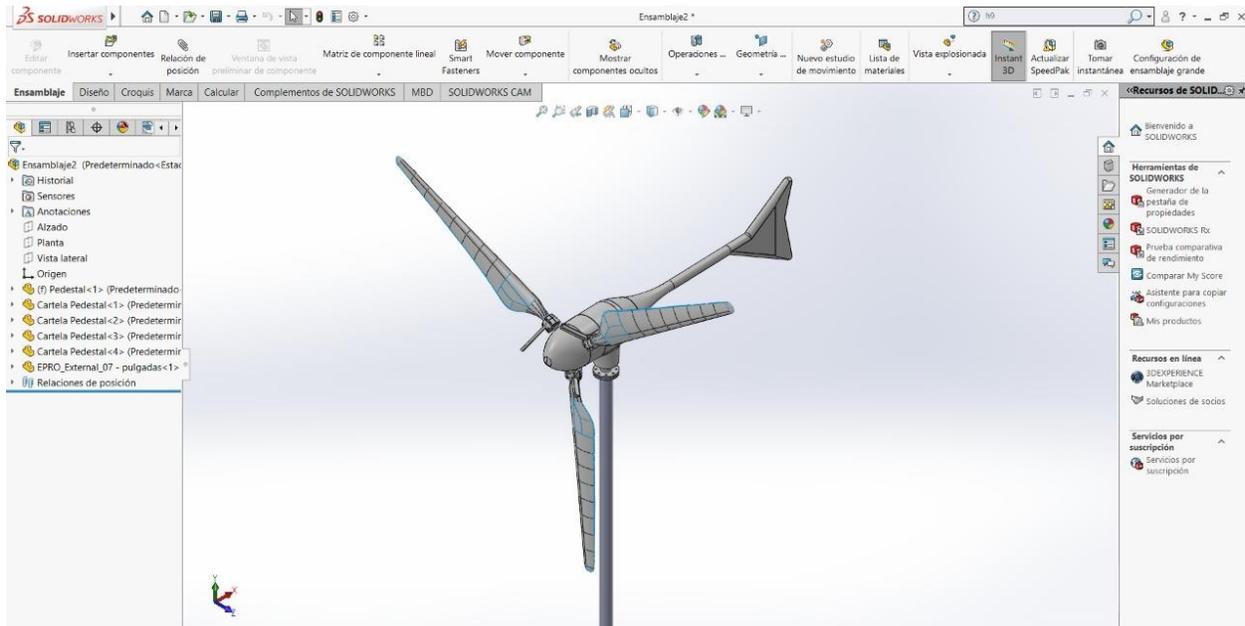


Figura 4-4: CAD isométrico del aerogenerador vista frontal
Fuente: Autores

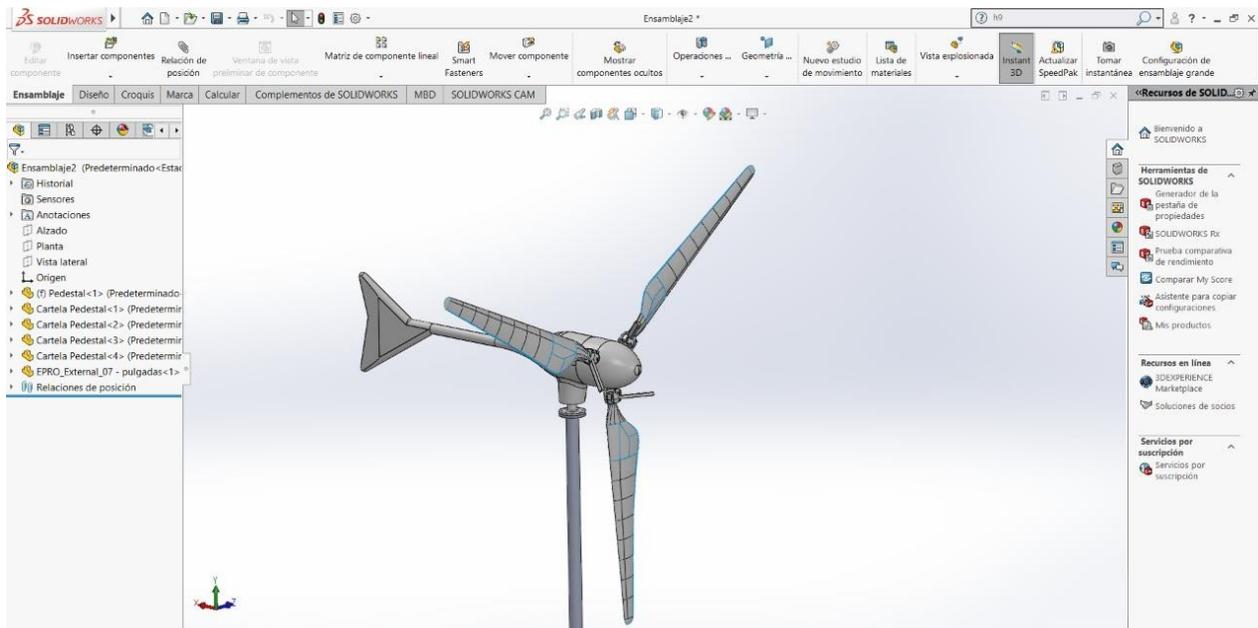


Figura 4-5: CAD isométrico del aerogenerador vista izquierda

Fuente: Autores

Ver anexos:

- ✓ Plano diagrama de conexiones sistema.
- ✓ Plano distribución de componentes tablero #1.
- ✓ Plano distribución de componentes tablero #2.

4.6 Listado de componentes

Tabla 4-17: Listado de componentes

LISTADO DE COMPONENTES			
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD
1	SISTEMA DE ILUMINACIÓN		
1.1	Proyector Led 50W IP66, Tensión: 100-240 VAC, Referencia: SYLVEO LED RGBW 50 W, Marca: SYLVANIA	6	Und
1.2	Soporte proyector Led en tubería 1-1/2" acero galvanizado	6	Und
1.3	Poste metálico en acero galvanizado 6 metros, para alumbrado Público	6	Und
1.4	Tubería PVC 1-1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	90	MI
1.5	Tubería IMC 1-1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	10	MI
1.6	Tubería IMC 1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	36	MI
1.7	Acometida en cable 2x #6 AWG + 1#8 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	110	MI
1.8	Acometida en cable 2x #12 AWG + 1#12 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	40	MI
2	SISTEMA DE CONECTIVIDAD Y TOMAS DE ALIMENTACIÓN ELECTRICA		
2.1	Router, Referencia: R658N, Marca: MELOM	1	Und
2.2	Adaptador WiFi USB, Referencia: AWUS036NHR, Marca: MELOM	1	Und
2.3	Parabólica WiFi de 24dbi alcance 5km, Referencia: AGA2424T, Marca: MELOM	1	Und
2.4	Toma corriente 125 VAC, 20A, Referencia: ICFT, Marca: LEVINTON	3	Und
2.5	Caja radwell 2x4, orificio 1/2", aluminio	3	Und
2.6	Tapa Toma Doble Plastica Para Intemperie Gris Fulgore Fu0155	3	Und
2.7	Tubería PVC 1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	10	MI
2.8	Tubería IMC 1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	8	MI
2.9	Acometida en cable 2x #12 AWG + 1#12 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	25	MI
3	SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA		
3.1	Aerogenerador 3000W, Referencia: E30PRO, Marca: ENAIR-PRO	1	Und
3.2	Soporte aerogenerador 3000W	1	Und
3.3	Batería 600Ah, Referencia: UZS600, Marca: ULTRACELL	2	Und
3.4	Regulador de carga, Referencia: RCE-ENAIR-120, Marca: ENAIR-PRO	1	Und
3.5	Inversor 1000W, Referencia: IP500-21, Marca: IPower serie	1	Und
3.6	Cofre Metalico 800X600X300 en Lámina Cold Rolled, Referencia: 1215E00355, Marca: PROELECTRICOS	2	Und
3.7	Soporte cofre metalico 800X600X300	2	Und
3.8	Interruptor Automático Fijo EasyPact TMD 125 A 2P2D, Referencia: EZC250H	1	Und
3.9	Interruptor Termomagnetico Easy9 Bipolar – 40A – Curva C – 4,5kA	1	Und
3.10	Interruptor Termomagnetico Easy9 Bipolar – 40A – Curva C – 4,5kA	1	Und
3.11	Acometida aerogenerador – regulador en cable 2x #1/0 AWG + 1#2 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	10	MI
3.12	Acometida regulador - batería en cable 2x #1/0 AWG + 1#2 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	8	MI
3.13	Acometida regulador – inversor en cable 2x #6 AWG + 1#8 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	8	MI
3.14	Tubería IMC 2" x 3 metros y accesorios de instalación	15	MI
3.15	Tubería IMC 1-1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	6	MI

Fuente: Autores

4.7 Simulación del funcionamiento del aerogenerador

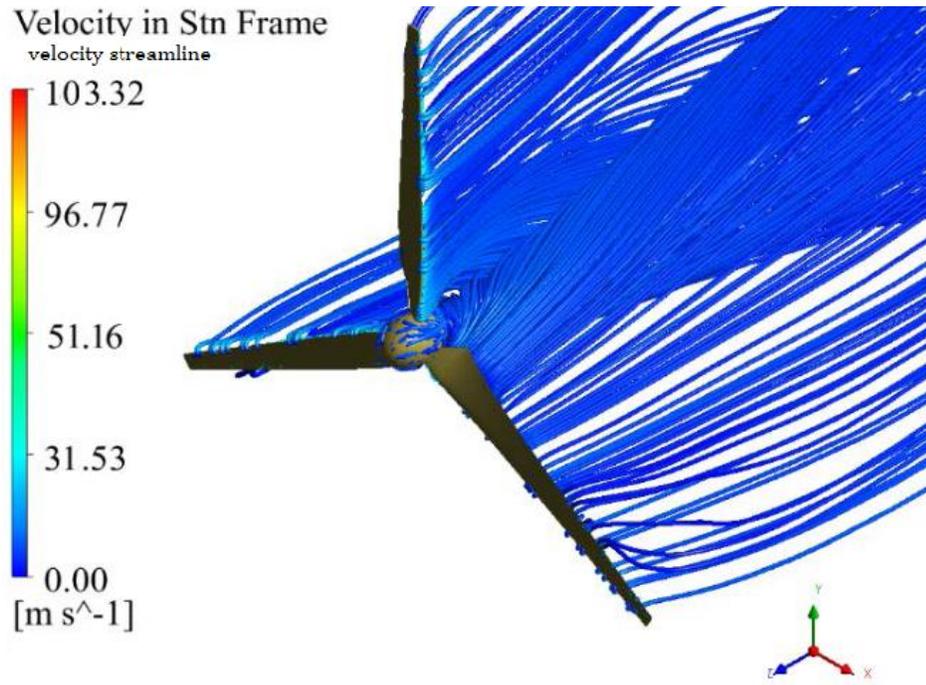


Figura 4-6: Simulación de flujo
Fuente: Autores

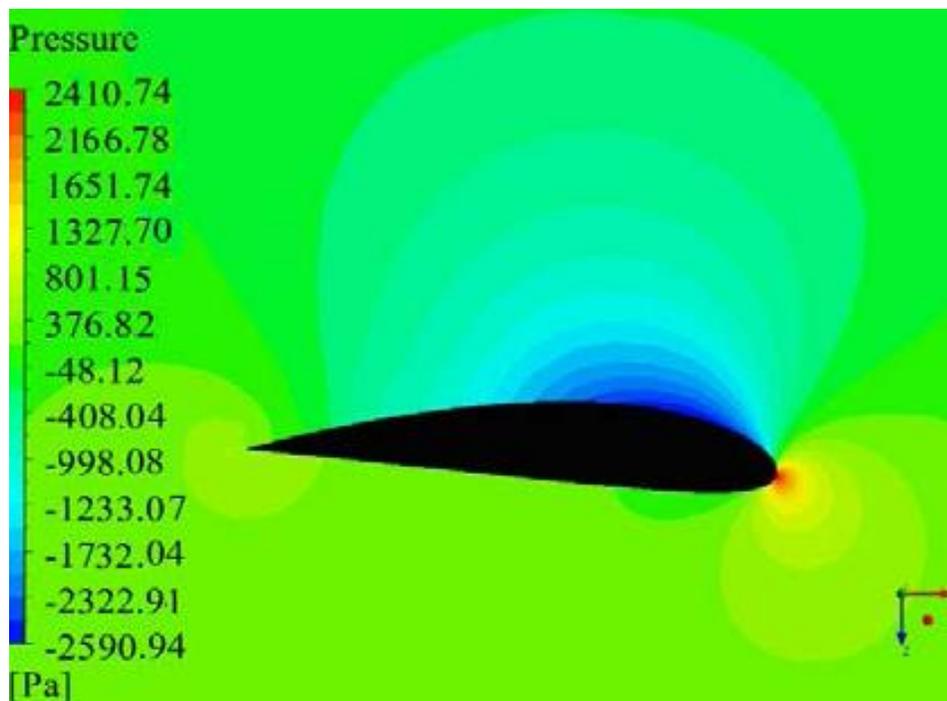


Figura 4-7: Simulación de presiones sobre una sección de un asa
Fuente: Autores

4.8 Presupuesto

Tabla 4-18: Presupuesto

PRESUPUESTO					
ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDAD	V. UNITARIO	V. TOTAL
1	SISTEMA DE ILUMINACIÓN				
1.1	Proyector Led 50W IP66, Tensión: 100-240 VAC, Referencia: SYLVEO LED RGBW 50 W, Marca: SYLVANIA	6	Und	\$ 385.000	\$ 2.310.000
1.2	SopORTE proyector Led en tubería 1-1/2" acero galvanizado	6	Und	\$ 38.000	\$ 228.000
1.3	Poste metálico en acero galvanizado 6 metros, para alumbrado Público	6	Und	\$ 425.000	\$ 2.550.000
1.4	Tubería PVC 1-1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	90	MI	\$ 8.360	\$ 752.400
1.5	Tubería IMC 1-1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	10	MI	\$ 34.939	\$ 349.392
1.6	Tubería IMC 1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	36	MI	\$ 12.257	\$ 441.259
1.7	Acometida en cable 2x #6 AWG + 1#8 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	110	MI	\$ 18.850	\$ 2.073.500
1.8	Acometida en cable 2x #12 AWG + 1#12 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	40	MI	\$ 6.300	\$ 252.000
1.9	Mano de obra	1	Glb	\$ 3.700.000	\$ 3.700.000
				TOTAL	\$ 12.656.551
2	SISTEMA DE CONECTIVIDAD Y TOMAS DE ALIMENTACIÓN ELECTRICA				
2.1	Router, Referencia: R658N, Marca: MELOM	1	Und	\$ 653.900	\$ 653.900
2.2	Adaptador WiFi USB, Referencia: AWUS036NHR, Marca: MELOM	1	Und	\$ 89.500	\$ 89.500
2.3	Parabólica WiFi de 24dbi alcance 5km, Referencia: AGA2424T, Marca: MELOM	1	Und	\$ 414.900	\$ 414.900
2.4	Toma corriente 125 VAC, 20A, Referencia: ICFT, Marca: LEVINTON	3	Und	\$ 43.250	\$ 129.750
2.5	Caja radwell 2x4, orificio 1/2", aluminio	3	Und	\$ 10.900	\$ 32.700
2.6	Tapa Toma Doble Plastica Para Intemperie Gris Fulgore Fu0155	3	Und	\$ 5.200	\$ 15.600
2.7	Tubería PVC 1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	10	MI	\$ 2.196	\$ 21.960
2.8	Tubería IMC 1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	8	MI	\$ 12.257	\$ 98.058
2.9	Acometida en cable 2x #12 AWG + 1#12 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	25	MI	\$ 6.300	\$ 157.500
2.10	Mano de obra	1	Glb	\$ 450.000	\$ 450.000
				TOTAL	\$ 2.063.868
3	SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGIA				
3.1	Aerogenerador 3000W, Referencia: E30PRO, Marca: ENAIR-PRO	1	Und	\$ 25.138.410	\$ 25.138.410
3.2	SopORTE aerogenerador 3000W	1	Und	\$ 3.800.000	\$ 3.800.000
3.3	Batería 600Ah, Referencia: UZS600, Marca: ULTRACELL	2	Und	\$ 3.953.040	\$ 7.906.079
3.4	Regulador de carga, Referencia: RCE-ENAIR-120, Marca: ENAIR-PRO	1	Und	\$ 10.844.020	\$ 10.844.020
3.5	Inversor 1000W, Referencia: IP500-21, Marca: IPower serie	1	Und	\$ 656.700	\$ 656.700
3.6	Cofre Metalico 800X600X300 en Lámina Cold Rolled, Referencia: 1215E00355, Marca: PROELECTRICOS	2	Und	\$ 632.250	\$ 1.264.500
3.7	SopORTE cofre metalico 800X600X300	2	Und	\$ 185.000	\$ 370.000
3.8	Interruptor Automático Fijo EasyPact TMD 125 A 2P2D, Referencia: EZC250H	1	Und	\$ 185.000	\$ 185.000
3.9	Interruptor Termomagnetico Easy9 Bipolar – 40A – Curva C – 4,5kA	1	Und	\$ 62.500	\$ 62.500
3.10	Interruptor Termomagnetico Easy9 Bipolar – 40A – Curva C – 4,5kA	1	Und	\$ 62.500	\$ 62.500
3.11	Acometida aerogenerador – regulador en cable 2x #1/0 AWG + 1#2 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	10	MI	\$ 71.300	\$ 713.000
3.12	Acometida regulador - batería en cable 2x #1/0 AWG + 1#2 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	8	MI	\$ 71.300	\$ 570.400
3.13	Acometida regulador – inversor en cable 2x #6 AWG + 1#8 T, THW/THHW-LS, 600 V, 90 °C.	8	MI	\$ 18.850	\$ 150.800
3.14	Tubería IMC 2" x 3 metros y accesorios de instalación	15	MI	\$ 50.939	\$ 764.088
3.15	Tubería IMC 1-1/2" x 3 metros y accesorios de instalación	6	MI	\$ 34.939	\$ 209.635
3.16	Mano de obra	1	Glb	\$ 4.350.000	\$ 4.350.000
				TOTAL	\$ 57.047.632
PRESUPUESTO TOTAL				\$	71.768.051

Fuente: Autores

5. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de grado permitió calcular y dimensionar las características técnicas y de consumo eléctrico de un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica. La consolidación de los objetivos propuestos al inicio del proyecto nos permitió obtener el objetivo general que teníamos planteado en la investigación: Diseñar un sistema de generación de electricidad a partir de la energía eólica disponible en el Parque de la 86 del barrio Las Flores de la ciudad de Barranquilla.

En relación al primer objetivo específico - *Caracterizar la energía eólica disponible en el barrio las flores que pueda abastecer el consumo eléctrico del parque*- se logró identificar las características del viento y sus velocidades las cuales fueron tomadas de la página del fabricante de aerogeneradores en España, <https://www.enair.es/>, en las coordenadas geográficas del parque, debido a que no se logró realizar las salidas de campo para realizar la medición de la velocidad del viento a varias horas del día mediante el uso del anemómetro que se encuentra en la universidad Antonio Nariño y cuál iba a ser usado para la práctica, por motivos de la pandemia y las medidas establecidas por el gobierno para mitigar los contagios por Covid 19.

Por otra parte, con relación a las herramientas de cálculo elaboradas (*Segundo objetivo específico: Calcular los parámetros operativos del aerogenerador de acuerdo a las necesidades energéticas del parque*- se realizó el análisis de la cantidad de luminarias necesarias para la iluminación cumpliendo con lo establecido en el Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público "Retilap", se realizó el dimensionamiento de carga de todos los elementos del sistema eléctrico, contemplando a su vez la potencia que requiere cada elemento para su funcionamiento. Se elaboró la memoria de cálculo del dimensionamiento de cada uno de los componentes requeridos en el sistema (aerogenerador, regulador, banco de baterías, inversor y cableado), comparándola con la herramienta App eCon del fabricante de aerogeneradores ENAIR.

Por último, el tercer objetivo específico: *Simular el funcionamiento del aerogenerador diseñado mediante herramientas CFD, el cual será de ayuda didáctica para el aprendizaje en la signatura de mecánica fluidos*- se realizó la importación del dibujo 3D en AutoCAD

del aerogenerador de 3Kw seleccionado de la página del fabricante a la herramienta de SolidWorks, ejecutando la simulación CFD del funcionamiento.

Finalmente, se destaca que este trabajo de grado nos mostró como se puede contribuir a la disminución de la contaminación global a través del uso de las energías renovables y como las comunidades de bajos recursos se pueden beneficiar de la energía eólica gracias a las ventajas geográficas de la ciudad de barranquilla.

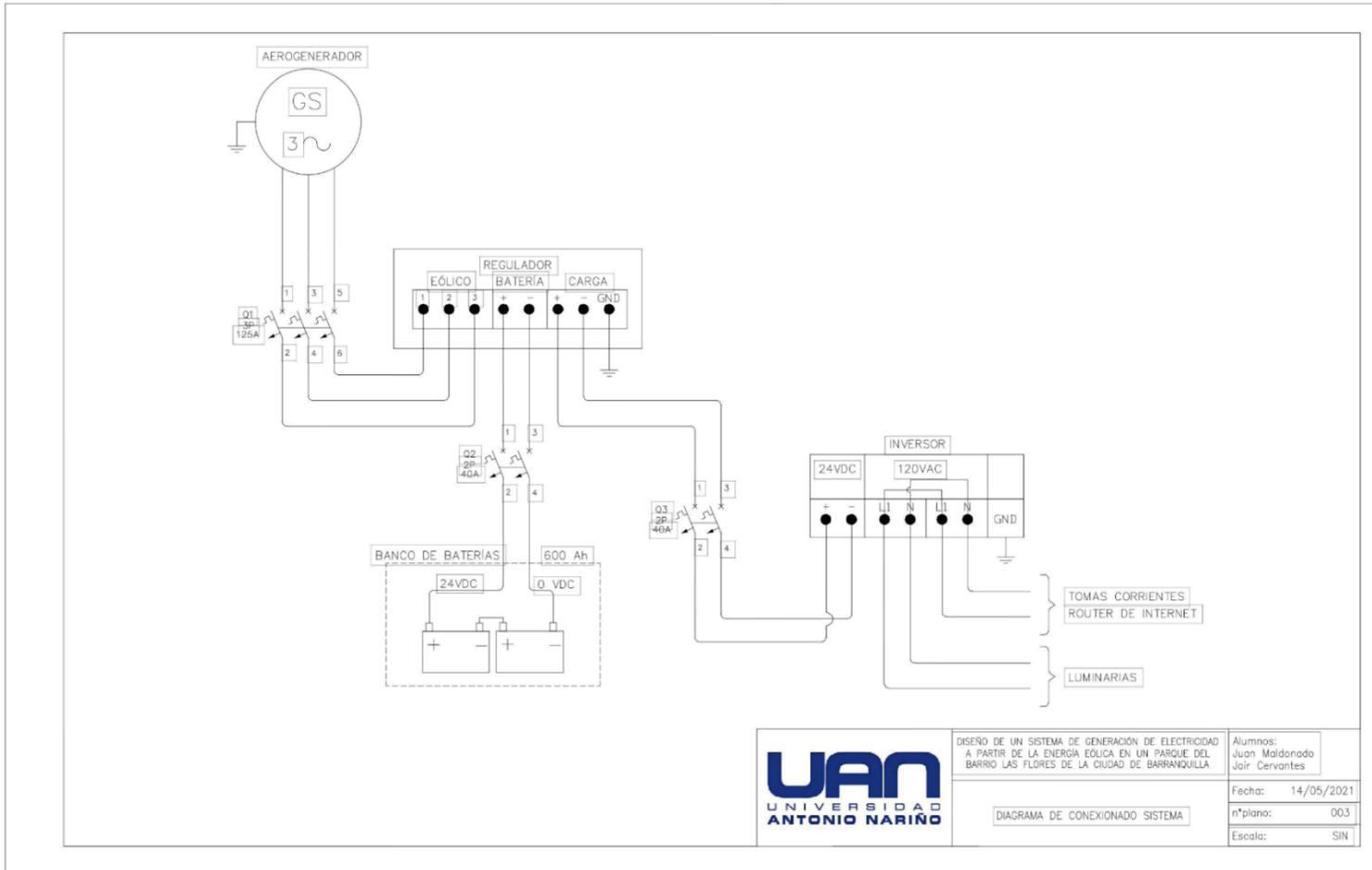
Para trabajos futuros, se recomienda, realizar el análisis de costos de fabricación de un aerogenerador con materiales de bajo costo y de fabricación local.

Bibliografía

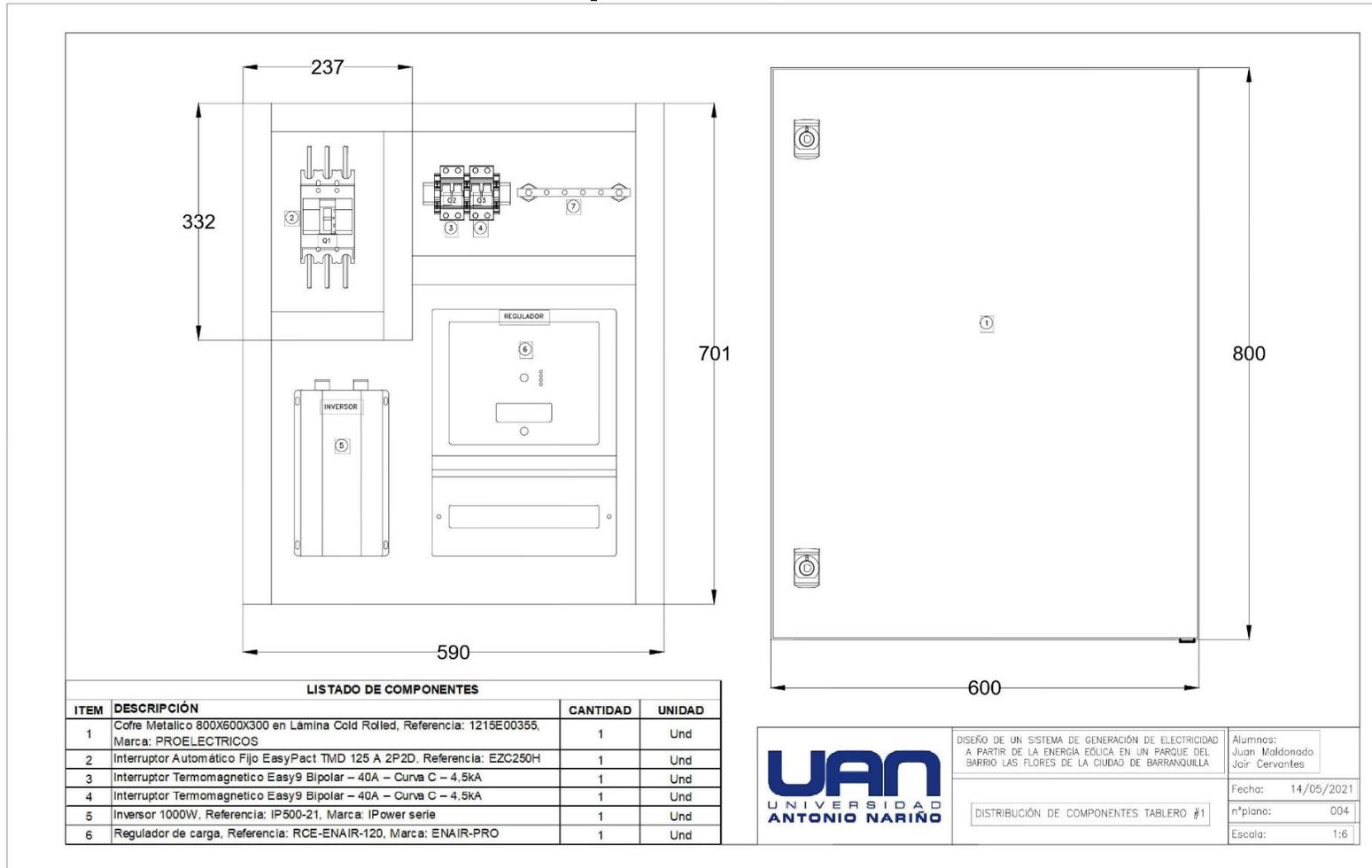
- [1] R. Catalina. (2018). Identificación de proyectos con potencial de generación de energía eólica como complemento a otras fuentes de generación eléctrica en el departamento de Boyacá. Universidad Nacional de Colombia.
- [2] L. Jiménez N, Acevedo, & M. Rojas. (2016). Valoración de opción real en proyectos de generación de energía eólica en Colombia. Revista Espacios, vol. 37 (N° 26), pp. 26.
- [3] D. Perdomo, M. Jaimes, & J. Almeida. (2014). La energía eólica como energía alternativa para el futuro de Colombia. Revista El Centauro, N° 9, Año 6.
- [4] E. Orozco. (2014). Comparación de herramientas de diseño para álabes de aerogeneradores eólicos de baja velocidad de viento. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- [5] J. Serrano. (2013). Comparación de métodos para determinar los parámetros de Weibull para la generación de energía eólica. Universidad de Pamplona.
- [6] J. Gimenez, & J. Gómez. (2011). Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia. Universidad Nacional de San Juan Argentina and Universidad Nacional de Rio Cuarto.
- [7] E. Escalante, R. Castellanos, & O. López. (2011). Diseño e implementación de un control de máxima potencia para un sistema de generación de energía. Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 16, (No.1).
- [8] M. Lopez, J. Vannier, & D. Sadarnac. (2007). Sistemas de conversión de energía eólica control y diseño. Association Chilienne de Controle Automatique.
- [9] Centro de investigaciones oceanográficas e hidrográficas Cartagena – Colombia. <https://www.cioh.org.co/meteorologia/Climatologia/ResumenBarranquilla4.php>.
- [10] F. Conrado. (2007). Fundamentos de la energía eólica. Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER).
- [11] J. Hernández. (2006). Diseño de un aerogenerador de baja potencia. Escuela Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- [12] J. Mur. Curso de energía eólica. Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Zaragoza.
- [13] C. Espitia, L. Puerto. (2012). Diseño y construcción de un mini aerogenerador de eje vertical. Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá.

- [14] Energías renovadas el motor del mundo. <https://energiasrenovadas.com/componentes-de-un-aerogenerador/>.
- [15] Estimación de producción eólica y solar. <https://www.enair.es/es/app/>.
- [16] Ministerio de Minas Energía (agosto de 2009). Reglamento técnico de iluminación y alumbrado público "Retilap".
- [17] J. Orjuela, S. Perdomo. (2018). Implementación de un generador eólico tipo Savonius helicoidal en la empresa Cygni Ingeniería SAS. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- [18] F. Medina, O. Alfredo. (2012). Simulación numérica del rotor de un aerogenerador de eje vertical, Universidad Nacional Autónoma de México.

Anexo A: Plano diagrama de conexiones sistema



Anexo B: Plano distribución de componentes tablero #1



Anexo C: Plano distribución de componentes tablero #2

