

**DISEÑO DE UNA MICRORRED HÍBRIDA SOPORTADA EN UN TRÁILER  
COMERCIAL PARA UNA VIVIENDA PROMEDIO EN LA ISLA DE  
PROVIDENCIA, COLOMBIA**

**DESIGN OF A HYBRID MICROGRID SUPPORTED ON A COMMERCIAL  
TRAILER FOR AN AVERAGE HOUSE ON THE ISLAND OF PROVIDENCIA,  
COLOMBIA**

Carlos Santiago Romero Montoya

Nicolas Caldas Vargas

carlos.romero@estudiantes.uamerica.edu.co

nicolas.caldas@estudiantes.uamerica.edu.co

**Director:** Luis Fernando Ruiz Pineda

luis.ruiz@profesores.uamerica.edu.co

Departamento de Ingeniería, Fundación Universitaria de América

**Resumen**

Este trabajo propone el diseño de una microrred móvil bajo fuentes renovables de energía (solar-fotovoltaica y eólica), que brinda una solución energética autónoma y eficiente para una vivienda promedio de la Isla de Providencia, perteneciente al Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, identificada como una Zona No Interconectada (ZNI) en Colombia. El problema que abarca esta investigación corresponde a la dependencia que tiene la isla con el diésel marino como combustible para las centrales de generación de energía eléctrica y los fletes involucrados para llevar dicho combustible desde la central de Cartagena, dada la imposibilidad de la isla para abastecerse del Sistema Interconectado Nacional; además del impacto ambiental que genera la quema del diésel. Sin embargo, la isla cuenta con un gran potencial solar y eólico. El propósito de este diseño es cubrir el 100 % del suministro de energía eléctrica para la vivienda promedio ubicada en cualquier parte de la isla, definiendo la curva de carga característica, seleccionando a través de un proceso iterativo, la configuración de componentes necesarios para cubrir las variaciones en el consumo eléctrico diario e identificar el tráiler apropiado como soporte y transporte de la microrred. Los resultados indican que la

microrred diseñada genera 25,51 KWh/día y cubre una demanda de 19,07 KWh/día, a través de 5 paneles solares de 453 W nominal, 2 turbinas eólicas de 1 KW nominal, 1 batería de ion litio 100 Ah, 1 inversor de onda 6 KW y 1 regulador de carga híbrido 4,8 KW; todos ellos soportados en un tráiler de 2 m x 6 m con capacidad de carga de 3451,8 Kg para un peso de la microrred de 783,75 Kg; distribuidos de tal manera que el punto del tráiler con mayor estado de esfuerzos presenta un valor de 11,7 MPa, el cual es menor al límite elástico de la estructura (315 MPa), asegurando la integridad estructural del tráiler.

**Palabras clave:** Microrred, Solar, Eólico, Tráiler, Isla de Providencia.

### **Abstract**

This work proposes the design of a mobile microgrid under renewable energy sources (solar-photovoltaic and wind), which provides an autonomous and efficient energy solution for an average house in Providencia Island, belonging to the Archipelago of San Andres, Providencia and Santa Catalina, identified as a Non-Interconnected Zone (ZNI) in Colombia. The problem covered by this research corresponds to the island's dependence on marine diesel as fuel for the electric power generation plants and the freight involved in transporting this fuel from the Cartagena plant, given the island's impossibility of obtaining its own supply from the National Interconnected System; in addition to the environmental impact generated by the burning of diesel. However, the island has great solar and wind potential. The purpose of this design is to cover 100% of the electricity supply for the average house located anywhere on the island, defining the characteristic load curve, selecting through an iterative process, the configuration of components needed to cover the variations in daily electricity consumption and identifying the appropriate trailer to support and transport the microgrid. The results indicate that the designed microgrid generates 25.51 KWh/day and covers a demand of 19.07 KWh/day, through 5 solar panels of 453 W nominal, 2 wind turbines of 1 KW nominal, 1 lithium ion battery 100 Ah, 1 wave inverter 6 KW and 1 hybrid charge regulator 4.8 KW; all of them supported on a 2 m x 6 m trailer with a load capacity of 3451.8 Kg for a microgrid weight of 783.75 Kg; distributed in such a way that the point of the trailer with the highest stress state presents a value of 11.7 MPa, which is lower than the elastic limit of the structure (315 MPa), ensuring the structural integrity of the trailer.

**Key words:** Microgrid, Solar, Wind, Trailer, Providence Island.

## Nomenclatura

A=Amperios

Ah=Amperios Hora

ASTM= American Society for Testing and Materials

AWG=*American Wire Gauge*

a y b= Constantes en función de las velocidades nominal y de corte de la turbina seleccionada

BID= Banco Interamericano de Desarrollo

CCP= Norma Colombiana de diseño de Puentes

Cbanco baterías = Capacidad nominal o instalada del banco de baterías

Cnominal batería = Capacidad nominal individual de las baterías

C bat (t)=Capacidad disponible del banco de baterías

C bat (t-1)= Capacidad del banco de baterías a hora evaluada anterior

COP=Peso Colombiano

DIN= *Deutsches Institut für Normung*

DOD =Profundidad de descarga de las baterías

EL(t)=Carga demandada

E PV(t)=Energía generada por el arreglo de paneles

E WG(t)= Energía generada por el arreglo de turbinas

EUR=Euro

e%=Caída de tensión

FEM=Método de Elementos Finitos

$f(v)$ =Probabilidad de Weibull para cada velocidad

HT =Promedio horario de Radiación Solar

I=Corriente del tramo evaluado

Icarga/descarga = Máxima corriente de trabajo en carga/descarga de la batería

Ifusible (PV-regulador)= Corriente admisible del fusible tramo paneles-regulador

Ifusible (WT-regulador)=Corriente admisible del fusible tramo aerogeneradores-regulador

Ifusible (batería-inver.)= Corriente admisible del fusible tramo batería-inversor

Ifusible (regul.-batería)= Corriente admisible del fusible tramo regulador-batería

Imax array PV=Corriente máxima del array de paneles solares

Imax array WT=Corriente máxima del array de aerogeneradores

Imax batería=Corriente máxima que pasa por la batería

Imax entrada inversor=Corriente máxima de entrada al inversor

Imax panel=Corriente máxima emitida por panel

Imax WT=Corriente máxima emitida por aerogenerador

IPSE=Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas

Isalida regulador=Corriente de salida del regulador

Isc=Corriente corto circuito del panel individual

ISO= *International Organization for Standardization*

k=Factor de forma

kA=Kilo Amperios

kV=Kilo Voltios

kWh=Kilo Watt Hora

kWh/día=Kilo Watt Hora por día

KWh/m<sup>2</sup>=Kilo Watt Hora por metro cuadrado

L=Longitud del tramo evaluado

MPa=Mega Pascales

m/s=Metro por segundo

N =Autonomía de las baterías

Nbat=Numero de baterías

Np= Baterías conectadas en paralelo

NPV =Número de paneles en el arreglo

$N_s$ =Baterías conectadas en serie

$N_{WT}$  =Número de turbinas eólicas en el arreglo

$P_{a/A}$ =Potencial eólico disponible

$P_{batería}$ =Potencia eléctrica de la batería

$P_{in}$  =Potencia de entrada al inversor

$P_{instalada}$  =Potencia instalada para generación solar y eólica

$P_{instalada PV}$  =Potencia instalada del arreglo de paneles solares

$P_{instalada WT}$  =Potencia instalada del arreglo de turbinas

$PPV$  =Potencia generada por el arreglo de paneles

$P_r$  =Potencia nominal de la turbina eólica

$P_v/A$ =Densidad de potencia a cada velocidad de viento

$P_{WT}$  =Potencia generada por el arreglo de turbinas

RETIE= Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas

USD=Dólar Estadounidense

URES=Desplazamiento Estático Máximo

$V$  =Velocidad del viento a la hora evaluada a 10 metros altura

$V_{batería}$ =Voltaje de trabajo de la batería

$V_{cut-in}$  =Velocidad de corte de la turbina eólica

VDC=Voltaje en Corriente Directa

$V_{fusible (batería-inversor)}$ = Voltaje admisible del fusible tramo batería-inversor

$V_{fusible (PV-regulador)}$ = Voltaje admisible del fusible tramo paneles-regulador

$V_{fusible (regulador-batería)}$ = Voltaje admisible del fusible tramo regulador-batería

$V_{fusible (WT-regulador)}$ = Voltaje admisible del fusible tramo aerogeneradores-regulador

$V_{inversor}$ =Voltaje de trabajo del inversor

$V_{nominal PV}$  =Voltaje nominal del arreglo de paneles

$V_{nominal WT}$ =Voltaje nominal del aerogenerador

$V_{oc}$ =Voltaje a circuito abierto del panel individual

$V_{prom}$ =Velocidad promedio del viento

$V_{rated}$  =Velocidad nominal de la turbina eólica

$V_{sistema}$ = Voltaje del sistema

$W$ =Watt

ZNI=Zona No Interconectada

$\Gamma$ =Función Gamma

$\rho_{aire}$ =Densidad del aire

$\eta$  =Eficiencia individual del panel

$\sigma$  =Tasa de autodescarga de las baterías

$\eta_{bat}$ =Eficiencia de la batería

$\eta_{inv}$ =Eficiencia del inversor

$\rho$  = Resistividad del cobre

## **1.Introducción**

Hoy por hoy, cobra gran importancia la diversificación de la matriz energética y una transición del esquema de generación convencional, como lo permiten las denominadas microrredes o *microgrids*, entendiéndose como sistemas de distribución de energía eléctrica que integran múltiples fuentes de generación de energía, como paneles solares, turbinas eólicas, baterías de almacenamiento, generadores diésel, etc., en un sistema localizado e interconectado. Estos sistemas pueden operar de forma autónoma o estar conectados a la red eléctrica principal de la zona en estudio. El concepto de microrredes ha existido desde hace mucho tiempo; sin embargo, ha tenido mayor relevancia en los últimos años debido a varios factores, entre ellos, la creciente demanda de energía, la necesidad de diversificar las fuentes de energía, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y la búsqueda de soluciones energéticas más sostenibles y eficientes. Adicionalmente, una microrred con fuentes de energía solar y eólica, por ejemplo, resulta muy provechosa y eficiente gracias a que dichas fuentes presentan una complementariedad energética por sus dinámicas de comportamiento [1], obteniendo energía de ambos recursos simultáneamente o de un recurso en ausencia de otro.

En línea con lo anteriormente expuesto, la isla de Providencia, según el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas (IPSE), hace parte de las localidades de las Zonas No Interconectadas (ZNI) con mayor radiación solar (4,0 a 5,5 kWh/m<sup>2</sup>) y velocidad del viento promedio anual de 6 a 9 m/s [2]. En contraste, debido a su ubicación, la isla presenta problemas de conectividad eléctrica tales como: largas distancias a centrales eléctricas, pobreza, alto costo del servicio de energía eléctrica por los elevados valores de fletes en el transporte de diésel marino para las centrales de generación, elevado consumo energético que se deriva del uso de dispositivos eléctricos antiguos e ineficientes, además de malas prácticas de consumo energético por parte de la población local, las cuales influyen en la contaminación ambiental producida por la quema del combustible [3].

Gracias a que las microrredes han sido ampliamente estudiadas, es relevante hablar de trabajos e investigaciones realizadas previamente para el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina. Inicialmente, para entender el contexto y las oportunidades energéticas de la zona de estudio, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) [4], en su publicación identificaron los obstáculos del Archipiélago en materia eléctrica tales como: los altos costos del servicio de energía eléctrica debido al origen de la generación con combustibles fósiles, emisiones asociadas a gases de efecto invernadero, el crecimiento poblacional y comercial en el Archipiélago y el continuo aumento en la demanda energética, la antigüedad, baja eficiencia y ausencia de políticas que incentiven el uso eficiente de aparatos eléctricos, sobredimensionamiento de equipos eléctricos existentes respecto al consumo real de los usuarios. A partir del estudio realizado, se delimitaron algunas alternativas renovables, que incluyen la propuesta de proyectos que propenden por el avance en la diversificación de la matriz eléctrica, como parques eólicos, programas solares y plantas de residuos sólidos urbanos. Así las cosas, se concluyó que, aprovechando la ubicación de la región en la zona del Caribe, la implementación de tecnologías de redes inteligentes en el Archipiélago permitiría la inserción de cualquier programa de energías renovables dadas las directrices de medición y monitoreo que garantizarían un correcto seguimiento y control [4].

Ahora bien, para abarcar diseños y propuestas de microrredes evaluadas en el Archipiélago, el trabajo de grado de Pinto Calderón [5], se enfocó en el desarrollo de una microrred basada en fuentes renovables de energía para contribuir a la sostenibilidad de las islas de Providencia y Santa Catalina en Colombia, a través de diferentes configuraciones para aplicaciones en hoteles y pequeñas centrales distribuidas; con el apoyo de la herramienta HOMER Pro para simular escenarios de radiación solar y velocidad de viento promedio. La autora determinó que las islas tienen un potencial apropiado para la implementación de proyectos de energía renovable,

especialmente para la generación solar y eólica. Por otro lado, en el trabajo de grado de Aragón Sotelo y Castiblanco Vargas [6], se presentó un sistema de gestión de energía para una microrred en la Isla de Providencia, con el objetivo de lograr un equilibrio económico en la generación y la demanda; además de reducir costos operativos en un 5% basado en perfiles de consumo de energía, radiación solar y velocidad del viento. La investigación concluyó que los sistemas de generación distribuida son útiles en Colombia, especialmente en Zonas No Interconectadas, debido a la disminución en las pérdidas técnicas de la red y en la emisión de gases de efecto invernadero, producto de la cercanía a los puntos de generación con las zonas de consumo [6].

Duque Fernández [7], en su proyecto de pregrado evaluó la viabilidad de implementar una microrred en la isla de San Andrés usando la herramienta digital HOMER Pro, para minimizar el uso de combustibles fósiles. El diseño de la microrred comprendió la evaluación de varios escenarios aprovechando el recurso eólico y solar, evaluando la conveniencia de incorporar en la microrred las baterías solares. A través de diferentes configuraciones simuladas en el software, se evidenció el ahorro de combustible de los generadores diésel instalados en la isla gracias a las simulaciones realizadas [7]. Adicionalmente, Pulgarín García [8], en su proyecto de posgrado, enfocó su trabajo en el dimensionamiento de un sistema híbrido fotovoltaico y eólico, analizando los parámetros meteorológicos en la Isla de Providencia, así como la viabilidad financiera del proyecto. Dicho estudio permitió evidenciar que los sistemas híbridos para las Zonas No Interconectadas de Colombia son una solución viable. Sin embargo, en el caso del archipiélago de San Andrés y Providencia, los costos de instalación son considerablemente superiores en comparación con un sistema propuesto en una ZNI costadentro [8].

Las investigaciones y trabajos anteriormente expuestos, presentaron como objetivo en común aportar a la sostenibilidad energética de las islas del Archipiélago a través de diferentes enfoques y metodologías. En conjunto, sugieren que las microrredes y los sistemas de generación distribuida pueden ser una solución eficaz para aportar a la independencia energética sostenible en zonas aisladas o remotas de Colombia. Si bien en la isla se han desarrollado procesos de diseño, implementación y monitoreo de sistemas solares fotovoltaicos y eólicos [5], hasta el momento no se ha planteado un sistema portátil o transportable para energizar una vivienda en la isla. Es precisamente allí donde cobra relevancia el presente trabajo, en términos de proponer el diseño de una microrred híbrida (solar fotovoltaica y eólica), soportada en un tráiler comercial para cubrir la totalidad de la demanda diaria de energía eléctrica en una vivienda promedio de la isla de Providencia; contribuyendo, de esta

manera, al desarrollo de la autonomía energética de las viviendas de la isla a través de un suministro de energía renovable, híbrido y sostenible. Se complementa lo anteriormente mencionado con la importancia que están cobrando los sistemas de generación de energía eléctrica portables. Por un lado, el trabajo de Edwin Ramírez *et al.* [9], resalta el alcance de contar con una microrred soportada en un tráiler para energizar un sistema de riego a partir de paneles solares fotovoltaicos y cubrir todas las áreas de cultivo que requieren el vital líquido en Tunja, Boyacá, Colombia. Por otro lado, Anita Shrestha [10], en su trabajo de grado destaca la labor que cumplen los sistemas de generación de energía portables, como es el caso de estudio de una microrred modelo híbrido de paneles solares y turbinas eólicas, en situaciones de emergencia como inundaciones, terremotos, deslizamientos de tierra, huracanes y demás eventualidades donde hay restricción en el acceso a la electricidad. Adicional a lo anteriormente mencionado, existen en el mercado fabricantes y proveedores de remolques con bancos de energía solar [11], donde sugieren su uso cuando se presenta agotamiento de combustible en zonas remotas que normalmente usan grupos electrógenos.

En síntesis, el valor agregado de la microrred móvil propuesta para la isla de Providencia, radica en los siguientes aspectos: por un lado, representar una alternativa de abastecimiento de energía a sectores específicos afectados por situaciones donde se restrinja el acceso a energía, por problemas de suministro del diésel marino desde la estación de Cartagena; por otro lado, energizar viviendas en eventos infortunados de desastres naturales como el huracán Iota en el año 2020. También, escalar el uso de la microrred para abastecer de energía los sistemas de bombeo de agua para realizar el riego adecuado de todas las áreas de tierra que lo requieran, teniendo en cuenta que en la isla se tienen cultivos o huertas caseras de cítricos, mangos, papaya, tomate, yuca y coco [12].

Los resultados indican que la microrred diseñada y propuesta en el presente trabajo genera 25,51 KWh/día con una potencia instalada de 4,265 KW y cubre una demanda de 19,07 KWh/día, a través de 5 paneles solares monocristalinos de 453 W nominales a una inclinación o ángulo óptimo de 14° orientados hacia el sur con un azimut de -13° [13], 2 turbinas eólicas de eje vertical de 1 KW nominal, 1 batería de ion litio 100 Ah , 1 inversor de onda de 6 KW potencia nominal y 1 regulador de carga híbrido 4,8 KW potencia nominal; todos ellos soportados en un tráiler de 2 m x 6 m con capacidad de carga de 3451,8 Kg para un peso total de la microrred de 783,75 Kg. Dichos componentes son distribuidos de tal manera que el punto del tráiler con mayor estado de esfuerzos presenta un valor de 11,7 MPa, y no supera el límite elástico de la estructura (315 MPa), asegurando la integridad estructural del tráiler.

Este trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección I se ha planteado la introducción al problema, antecedentes, contexto energético de la isla y propuesta de solución a la problemática, en la sección II se presenta el modelamiento aplicado para dimensionar los componentes de la microrred a través de la fundamentación matemática detrás del cálculo de la potencia generada para los paneles solares, turbinas eólicas y baterías, además del controlador de carga e inversor de onda que regulan el funcionamiento del sistema. Adicionalmente, se describen los parámetros que se tuvieron en cuenta para seleccionar el tráiler, en términos de definir un modelo comercial de tráiler con dimensiones y capacidad de carga adecuados. En la sección III se evidencian los resultados obtenidos a partir de cuatro apartados o enfoques; el apartado A evalúa el contraste entre las curvas de generación y demanda de energía, analizando las áreas bajo las curvas obtenidas de ambos casos y, a partir de ello, establecer dos criterios de diseño para evaluar diferentes configuraciones de microrredes. Posteriormente, al seleccionar los componentes cuyas especificaciones técnicas cumplen con los parámetros requeridos, en el apartado B, se procede a realizar una distribución espacial preliminar teniendo en cuenta las dimensiones de cada elemento según su ficha técnica. Adicionalmente, se identifica un tráiler cuyas dimensiones y capacidad de carga permiten el emplazamiento y soporte apropiados para la microrred propuesta. Para finalizar este apartado, se realiza el cálculo del circuito eléctrico, validación de la selección de los equipos de protección y distribución eléctrica. El apartado C consiste en evaluar, a través del módulo de Simulación por el Método de Elementos Finitos (F.E.M.) del software SOLIDWORKS, si la distribución seleccionada de la microrred en el tráiler compromete la integridad estructural del mismo, a través de la evaluación del esfuerzo de Von Mises comparado con el límite elástico del tráiler. El apartado D relaciona el reporte de costos asociados a la microrred móvil propuesta. Finalmente, la sección IV presenta las conclusiones del presente trabajo.

## **2. Modelamiento para dimensionar los componentes de la microrred y seleccionar el tráiler**

En este apartado se presenta el modelamiento aplicado para dimensionar los componentes de la microrred a través de la fundamentación matemática detrás de la obtención de la potencia generada para los paneles solares, turbinas eólicas y estado de carga de las baterías, además del regulador de carga e inversor de onda que regulan su funcionamiento; siguiendo la metodología propuesta por Anurag Chauhan *et al.* [14], bajo el enfoque iterativo sugerido dentro de las metodologías de *sizing* o dimensionamiento para sistemas integrados de generación de energías

renovables para aplicaciones autónomas; donde también se revisan diferentes configuraciones, opciones de almacenamiento de energía, estrategias de control y gestión energética de dichos sistemas; todo ello a partir de perfiles típicos de consumo, radiación solar y velocidad de viento para zonas rurales alrededor del mundo. Finalmente, se describen los parámetros que se tuvieron en cuenta para seleccionar el tráiler, en términos de definir una distribución preliminar y peso total de los componentes de la microrred, incluyendo elementos estructurales de soporte para los paneles solares y turbinas eólicas.

## 2.1. Panel solar fotovoltaico

### 2.1.1 Potencia de salida de un arreglo de paneles solares

Se propone el uso de paneles solares fotovoltaicos monocristalinos debido a que trabajan con mayores eficiencias (11-21%) respecto a los paneles de tipo policristalinos (8-14 %) y amorfos (6-8%) [15]. La Ecuación 1 permite calcular la potencia de salida de un arreglo de paneles solares fotovoltaicos [14].

$$P_{PV} = \eta \cdot H_T \cdot A \cdot N_{PV} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$P_{PV}$  =Potencia generada por el arreglo de paneles @ hora evaluada [W],

$\eta$  =Eficiencia individual del panel, de 21% para panel monocristalino,

$N_{PV}$  =Número de paneles en el arreglo,

$H_T$  =Promedio horario de Radiación Solar [ $W \cdot h / m^2$ ],

$A$  =Área del panel individual [ $m^2$ ].

Se tomó una eficiencia individual para el panel monocristalino de 21%, según [15].

Para determinar el promedio horario de radiación solar ( $H_T$ ), registro de la radiación solar o irradiancia global promedio, se consultó el Atlas Solar del IDEAM, en el cual se reportan los promedios horarios de radiación solar para el año 2015 [16], únicamente, en la estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto El Embrujo de la isla de Providencia, como se puede apreciar en la Tabla 1. Si bien el mencionado registro solar consultado en el IDEAM corresponde al comportamiento del año 2015 únicamente, resultó de vital importancia el hecho de contar con datos tomados *in situ* en la estación de medición del aeropuerto en la isla, esperando con ello un comportamiento más cercano a la realidad y con menor incertidumbre asociada a modelos de predicción que otras herramientas usan para sus estimaciones.

**Tabla 1.**

*Promedio horario de Radiación en la isla de Providencia*

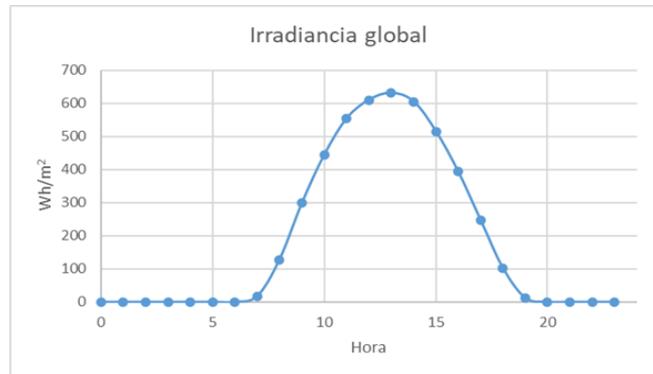
| ESTACION PROVIDENCIA-PROMEDIO HORARIO DE LA RADIACION (Wh/m <sup>2</sup> ) |        |         |        |        |        |        |        |        |            |         |           |           |
|--|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| HORA   | ENERO  | FEBRERO | MARZO  | ABRIL  | MAYO   | JUNIO  | JULIO  | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DICIEMBRE |
| 0-1  | 0.1    | 0       | 0      | 0.1    | 0      | 0      | 0.2    | 0.1    | 0          | 0       | 0         | 0         |
| 1-2  | 0      | 0.1     | 0.1    | 0      | 0.1    | 0.1    | 0.2    | 0      | 0          | 0       | 0         | 0         |
| 2-3  | 0.2    | 0.1     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0          | 0       | 0.1       | 0         |
| 3-4  | 0.1    | 0       | 0.1    | 0      | 0      | 0      | 0.1    | 0      | 0          | 0       | 0         | 0         |
| 4-5  | 0      | 0.1     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0.1    | 0          | 0       | 0.1       | 0         |
| 5-6  | 0      | 0.1     | 0.2    | 0      | 0.3    | 0.4    | 0.1    | 0.1    | 0.1        | 0.1     | 0         | 0.1       |
| 6-7  | 1.1    | 1.8     | 8.3    | 22.7   | 35.5   | 37     | 27.5   | 21.6   | 20.8       | 17.9    | 11.6      | 3.5       |
| 7-8  | 51.3   | 53.7    | 120.5  | 177.8  | 188.2  | 174.5  | 159    | 149.9  | 159.3      | 130.2   | 97.7      | 73.8      |
| 8-9  | 220.9  | 248.2   | 320    | 372.6  | 352.2  | 329.5  | 321.1  | 319.8  | 335.5      | 282.4   | 240.8     | 238       |
| 9-10   | 371.3  | 417.8   | 493.2  | 546.2  | 487.8  | 462.4  | 464    | 458.9  | 482        | 408.7   | 357.7     | 378.4     |
| 10-11  | 487.7  | 543.6   | 632.7  | 674.5  | 595.9  | 560.6  | 557    | 582.5  | 546.1      | 515.7   | 456.8     | 491.8     |
| 11-12  | 565.7  | 640.2   | 719.5  | 745.5  | 630.9  | 550.4  | 621.8  | 647.2  | 615.4      | 555.6   | 474.9     | 552.7     |
| 12-13  | 582.2  | 670.9   | 746.7  | 772.6  | 683.4  | 617.9  | 630.2  | 660.7  | 603.9      | 554.2   | 481.9     | 566.2     |
| 13-14  | 567.7  | 658.8   | 729.7  | 759.6  | 661.6  | 622    | 634.6  | 602.1  | 551.8      | 510.9   | 451.4     | 511.2     |
| 14-15  | 476.7  | 579.8   | 635.3  | 658.5  | 567.5  | 533.7  | 559.8  | 524.3  | 466.7      | 402.4   | 359.1     | 417.2     |
| 15-16  | 366.8  | 447.2   | 495.3  | 514    | 436.5  | 419.3  | 448.5  | 404.3  | 345.4      | 288.4   | 242.1     | 307.4     |
| 16-17  | 215.5  | 274.4   | 326.1  | 343    | 284.2  | 280.8  | 293.6  | 268.2  | 223.5      | 169.8   | 124.4     | 161       |
| 17-18  | 76.6   | 113     | 136.5  | 153.2  | 125.4  | 135.8  | 147.1  | 125.2  | 90         | 49.9    | 26.5      | 44.6      |
| 18-19  | 3.7    | 9.6     | 14.6   | 17.8   | 18.7   | 25.6   | 28     | 20.5   | 6.1        | 0.8     | 0.1       | 0.4       |
| 19-20  | 0      | 0       | 0.1    | 0      | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1    | 0.1        | 0       | 0         | 0         |
| 20-21  | 0.3    | 0       | 0      | 0      | 0.1    | 0      | 0      | 0.1    | 0          | 0       | 0.1       | 0         |
| 21-22  | 0.1    | 0       | 0      | 0      | 0.1    | 0.1    | 0      | 0.1    | 0          | 0       | 0         | 0         |
| 22-23  | 0.1    | 0.1     | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0          | 0       | 0         | 0         |
| 23-0   | 0      | 0       | 0      | 0.1    | 0      | 0.1    | 0      | 0      | 0          | 0.1     | 0         | 0         |
| Acumulado diario   | 3988.1 | 4659.5  | 5378.9 | 5758.2 | 5068.5 | 4750.3 | 4892.9 | 4785.8 | 4446.7     | 3887.1  | 3325.3    | 3746.3    |

**Nota.** Se indican los promedios horarios de radiación solar para el año 2015. Modificado de: “Atlas Interactivo - Radiación IDEAM”. IDEAM. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

A partir de la información obtenida por la base de datos del IDEAM anteriormente mencionada, se generó la curva representativa de la irradiancia diaria promedio a lo largo del año 2015, como se puede apreciar en la Figura 1.

**Figura 1.**

*Registro de irradiancia global promedio horario anual en la isla de Providencia.*



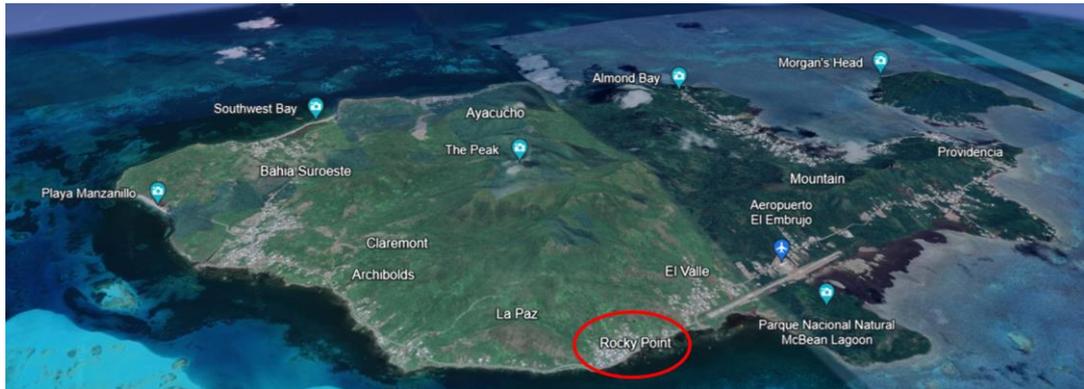
**Nota.** La imagen muestra la curva representativa de la irradiancia promedio horario anual a lo largo del año 2015. Modificado de: “Atlas Interactivo - Radiación IDEAM”. IDEAM. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

### ***2.1.2. Inclinación y azimut de los paneles solares***

Para conocer la inclinación y azimut óptimos para la instalación de los paneles solares y maximizar la producción de energía solar, se hizo uso de la herramienta PVGIS, del Sistema de Información Geográfico Fotovoltaico de la Comisión Europea [13]. Esta herramienta cuenta con una base de datos disponible desde el año 2005 al 2020 y solicita como dato de entrada, la ubicación de estudio en la tierra con sus respectivas coordenadas geográficas. Por ello, se eligió la zona conocida como Rocky Point, dado que es un centro poblado rural de la isla [5], que cuenta con vías de acceso, según [17], favoreciendo así el transporte de la microrred. Sin embargo, se podría seleccionar otro de los 10 centros poblados ubicados en la periferia de la isla [5], los cuales se pueden observar en la Figura 2.

**Figura 2.**

*Centros poblados rurales alrededor de la isla de Providencia, Colombia*

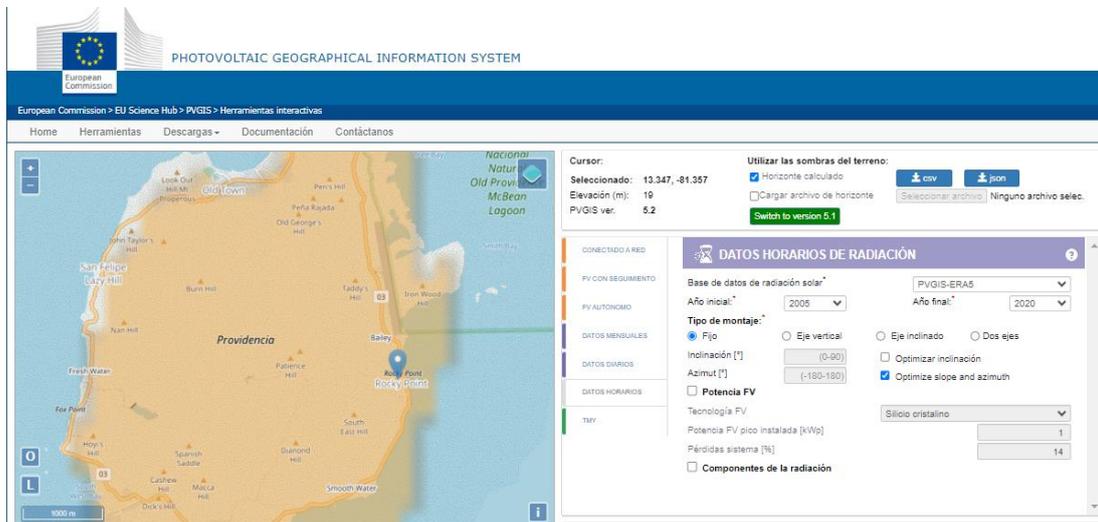


**Nota.** Se indican 10 centros poblados ubicados en la periferia de la isla. Tomado de: Google Earth. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>

La Figura 3 presenta la interfaz de la herramienta con la ubicación de Rocky Point en la isla, donde se selecciona un montaje fijo para los paneles dado que este proyecto no contempla la instalación de un sistema de seguimiento solar; finalmente, se indican valores de potencia fotovoltaica y pérdidas del sistema, predeterminados por la herramienta.

**Figura 3.**

*Configuración de datos de entrada en la herramienta PVGIS*



**Nota.** Presenta la interfaz de la herramienta con la ubicación de Rocky Point en la isla. Tomado de: European Commission. "Herramientas interactivas-PVGIS". JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/)

**Tabla 2.**

*Resumen de resultados obtenidos para inclinación y azimut óptimo*

|                                    |                |
|------------------------------------|----------------|
| <b>Latitude (decimal degrees)</b>  | 13.347         |
| <b>Longitude (decimal degrees)</b> | -81.357        |
| <b>Elevation (m)</b>               | 19             |
| <b>Radiation database</b>          | PVGIS-ERA5     |
| <b>Slope</b>                       | 14 ° (optimum) |
| <b>Azimuth</b>                     | -13 °(optimum) |

**Nota.** Información para la inclinación y azimut óptimo de los paneles solares. Modificado de: European Commission. “Herramientas interactivas-PVGIS”. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/)

Según la Tabla 2, se recomienda instalar los paneles con una inclinación óptima de 14° y con un azimut óptimo de -13° [13]; orientados hacia el sur, dado que la isla se ubica en el hemisferio norte de la Tierra [5].

## 2.2. Turbina eólica

### 2.2.1. Potencia de salida de un arreglo de turbinas eólicas

Se plantea el uso de turbinas eólicas de eje vertical tipo Savonius, ya que es posible hacer un emplazamiento o arreglo de varias turbinas de este tipo sin que una afecte el área de barrido de la otra. Lo anterior se ha evidenciado a través de estudios que indican que las turbinas eólicas de eje vertical pueden operar instaladas a menor distancia entre rotores que las turbinas eólicas de eje horizontal, lo que permite disponer de un mayor número de turbinas en una misma área de emplazamiento [18]; esto resulta beneficioso cuando se tiene una limitación de espacio. Las Ecuaciones 2 y 3 se usan para calcular la potencia de salida de un arreglo de turbinas eólicas [14].

$$P_{WT} = (aV^3 + bP_r) \cdot N_{WT} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$a = \frac{P_r}{V^3_{rated} - V^3_{cut-in}} ; b = \frac{V^3_{cut-in}}{V^3_{rated} - V^3_{cut-in}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$P_{WT}$  =Potencia generada por el arreglo de turbinas @ hora evaluada [W],

$P_r$  =Potencia nominal de la turbina eólica [W],

$N_{WT}$  =Número de turbinas eólicas en el arreglo,

$V$  =Velocidad del viento a la hora evaluada @ 10 metros altura [m/s],

$V_{rated}$  = Velocidad nominal de la turbina eólica [m/s],

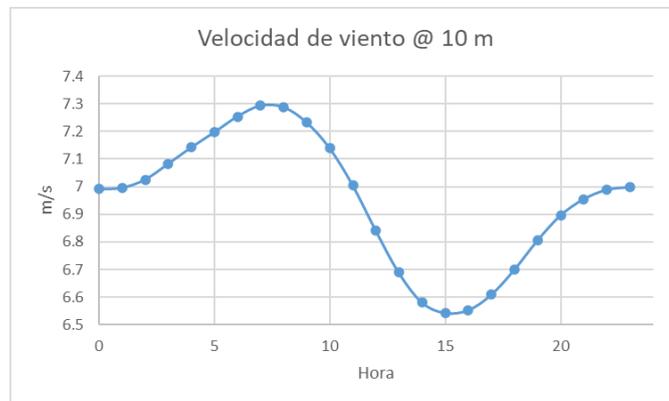
$V_{cut-in}$  = Velocidad de corte de la turbina eólica [m/s],

a y b = Constantes en función de las velocidades nominal y de corte de la turbina seleccionada.

El registro del recurso eólico se tomó a partir del promedio horario de la velocidad de viento a 10 metros de altura en la isla, a través del Power Data Access Viewer de la NASA para un promedio histórico entre los años 2013 y 2023 [19]. A partir de la información obtenida por dicha base de datos, se generó la curva de la velocidad de viento diaria promedio a 10 metros de altura, como se puede evidenciar en la Figura 4.

**Figura 4.**

*Velocidad de viento promedio horario anual a 10 metros de altura en la isla de Providencia.*



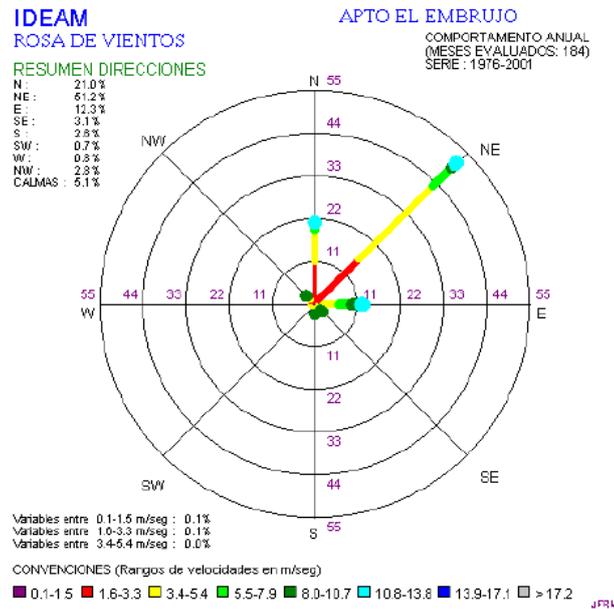
**Nota.** Se presenta la curva de la velocidad de viento promedio horario anual a 10 metros de altura, para un promedio histórico entre los años 2013 y 2023. Modificado de: NASA. “NASA POWER | Data Access Viewer”. NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

### 2.2.2. Rosa de los vientos

Por otro lado, la Figura 5 presenta la rosa de los vientos que indica la dirección predominante del movimiento del viento en la isla de Providencia anualmente. De allí se destacan intensidades de viento de 5 m/s en horas de la tarde a lo largo de 1 año entre las 11 de la mañana y 3 de la tarde, a excepción de los meses de septiembre y octubre cuando el viento pierde intensidad. La dirección predominante de donde sopla el viento es del noreste [20].

**Figura 5.**

*Rosa de vientos en la isla de Providencia*



**Nota.** Presenta la rosa de los vientos que indica la dirección predominante del movimiento del viento en la isla de Providencia anualmente. Tomado de: IDEAM. “Distribución horaria de la velocidad del viento en zonas con mayor aprovechamiento de potencial eólico”. Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21125/Capitulo4.pdf/3648f6d2-2350-40b4-bf35-a54611253612>

### 2.2.3. Distribución de Weibull

Adicionalmente, se evaluó la Distribución de Weibull, la cual indica la probabilidad de que se presenten velocidades de viento a determinadas velocidades dentro de un registro de datos evaluado [5]. Dado que este es un estudio estadístico, es importante entender la frecuencia absoluta como la frecuencia de ocurrencia de la velocidad del viento o la repetitividad de cada dato en toda la matriz evaluada a través del Power Data Access Viewer de la NASA [19]. El cociente entre la frecuencia absoluta y la cantidad total de datos corresponde a la frecuencia relativa [5]. Las Ecuaciones 4 y 5 indican la Distribución de Weibull [5]:

$$f(v) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp \left[ -\left(\frac{v}{A}\right)^k \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

$$A = \frac{V_{prom}}{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$f(v)$ =Probabilidad de Weibull para cada velocidad,

$k$ =Factor de forma (inicialmente se toma como 2),

$A$ =Factor de escala (m/s),

V=Velocidad del viento (m/s),

$V_{prom}$ =Velocidad promedio del viento (m/s),

$\Gamma$ =Función Gamma.

La Ecuación 6 indica el cálculo de la densidad de potencia eólica:

$$\frac{P_v}{A} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot V^3 \cdot f(v) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$\frac{P_v}{A}$ =Densidad de potencia a cada velocidad de viento (W/m<sup>2</sup>),

$\rho_{aire}$ =Densidad del aire (Kg/m<sup>3</sup>).

Finalmente, la densidad de potencia eólica total disponible se calcula mediante la Ecuación 7 como la sumatoria de todas las densidades de potencia eólica, según la Ecuación 6.

$$\frac{P_a}{A} = \sum_{v=0}^k \frac{P_v}{A} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\frac{P_a}{A}$ =Potencial eólico disponible (W/m<sup>2</sup>).

Se indica, según la Ecuación 7, que los límites de la sumatoria comprenden una velocidad mínima de 0 m/s hasta un máximo definido por cada analista.

La Tabla 3 indica un resumen de los parámetros evaluados para obtener la distribución de Weibull, obtenidos a partir del registro de velocidades de viento como un promedio histórico entre los años 2013 y 2023 [19], y de los procedimientos y ecuaciones relacionadas previamente [5].

**Tabla 3.**

*Parámetros evaluados para obtener la distribución de Weibull.*

|   |         |
|---|---------|
| Cantidad de datos (n)                                 | 87672   |
| Rango de velocidad de viento evaluado (m/s)           | 0-22    |
| Velocidad de viento promedio (m/s)                    | 6.9501  |
| k (inicial)   | 2       |
| k (ajustado)  | 3.786   |
| A (m/s)   | 7.692   |
| Densidad de potencia eólica total (W/m <sup>2</sup> ) | 274.893 |

**Nota.** Resumen de los parámetros evaluados para obtener la distribución de Weibull.

Por otro lado, la Tabla 4 relaciona los parámetros calculados para el rango de velocidad evaluado.

**Tabla 4.**

*Parámetros evaluados para obtener la distribución de Weibull.*

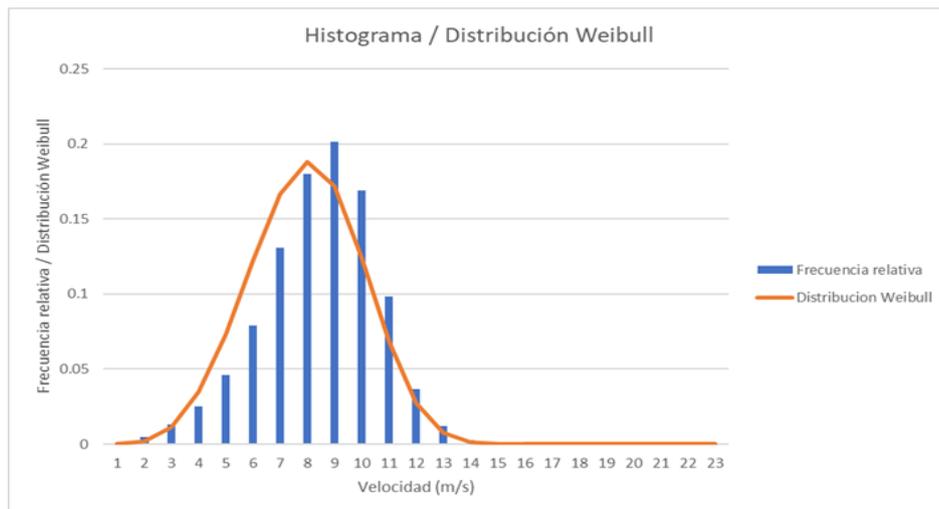
| Rangos de velocidad (m/s) | Frecuencia absoluta | Frecuencia relativa | Frecuencia relativa (%) | Distribución Weibull | Densidad de potencia Weibull (W/m <sup>2</sup> ) |
|---------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|--|
| 0                         | 0                   | 0.000               | 0.000                   | 0.000                | 0.000  |
| 1                         | 398                 | 0.005               | 0.454                   | 0.002                | 0.001  |
| 2                         | 1140                | 0.013               | 1.300                   | 0.011                | 0.060  |
| 3                         | 2209                | 0.025               | 2.520                   | 0.035                | 0.610  |
| 4                         | 4055                | 0.046               | 4.625                   | 0.073                | 3.046  |
| 5                         | 6942                | 0.079               | 7.918                   | 0.122                | 9.905  |
| 6                         | 11486               | 0.131               | 13.101                  | 0.167                | 23.411   |
| 7                         | 15780               | 0.180               | 17.999                  | 0.188                | 41.913   |
| 8                         | 17664               | 0.201               | 20.148                  | 0.172                | 57.265   |
| 9                         | 14803               | 0.169               | 16.885                  | 0.124                | 58.974   |
| 10                        | 8618                | 0.098               | 9.830                   | 0.069                | 44.625   |
| 11                        | 3217                | 0.037               | 3.669                   | 0.028                | 23.955   |
| 12                        | 1049                | 0.012               | 1.197                   | 0.008                | 8.741  |
| 13                        | 217                 | 0.002               | 0.248                   | 0.001                | 2.064  |
| 14                        | 39                  | 0.000               | 0.044                   | 0.000                | 0.299  |
| 15                        | 14                  | 0.000               | 0.016                   | 0.000                | 0.025  |
| 16                        | 8                   | 0.000               | 0.009                   | 0.000                | 0.001  |
| 17                        | 4                   | 0.000               | 0.005                   | 0.000                | 0.000  |
| 18                        | 8                   | 0.000               | 0.009                   | 0.000                | 0.000  |
| 19                        | 6                   | 0.000               | 0.007                   | 0.000                | 0.000  |
| 20                        | 5                   | 0.000               | 0.006                   | 0.000                | 0.000  |
| 21                        | 3                   | 0.000               | 0.003                   | 0.000                | 0.000  |
| 22                        | 7                   | 0.000               | 0.008                   | 0.000                | 0.000  |

**Nota.** Parámetros calculados para los rangos de velocidad evaluados.

A partir de la Tabla 4, se presentan las Figuras 6 y 7 para el histograma de frecuencias, la distribución de Weibull y el porcentaje de frecuencia relativa, para las velocidades evaluadas.

**Figura 6.**

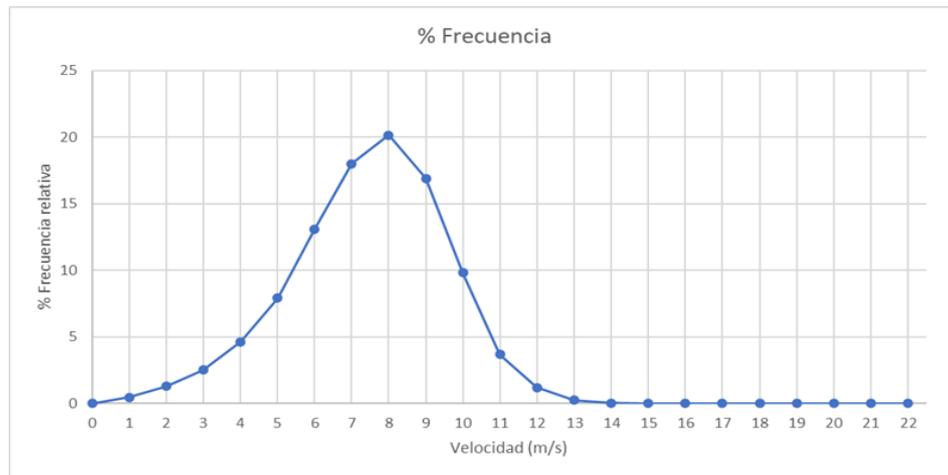
*Histograma de frecuencias y distribución de Weibull para las velocidades evaluadas*



**Nota.** Se muestra el histograma de frecuencias y la distribución de Weibull para velocidades entre 0 y 23 m/s.

**Figura 7.**

*Porcentaje de frecuencias relativas para las velocidades de viento evaluadas*



**Nota.** Se muestra el porcentaje de frecuencia relativa para velocidades entre 0 y 23 m/s.

De la Figura 6 se indica que la distribución de Weibull se ajusta adecuadamente al histograma de frecuencias generado, dado que a partir de la Ecuación 7, se ajustó el factor de forma (con valor inicial de 2) hasta un valor de 3,786 para cumplir la igualdad de dicha ecuación. Por otro lado, se valida el rango de velocidades de viento de 6,5 - 7,3 m/s, obtenido a partir del promedio horario histórico 2013-2023 [19], dado que este rango se encuentra dentro de los valores de velocidad de viento con mayor probabilidad de ocurrencia, es decir, de 6 a 9 m/s, para una probabilidad de ocurrencia del 13 al 20%, según la Tabla 4 y el histograma de frecuencias. Finalmente, lo anterior es coherente con lo reportado por el IPSE-IDEAM en su reporte de potenciales energéticos para la isla de Providencia [2].

## **2.3. Sistema de almacenamiento de energía**

### **2.3.1. Estado de carga de un array o banco de baterías**

Para la microrred propuesta, se plantea el uso de baterías ciclo profundo de Ion-Litio debido a su reducido peso y a que se permite trabajar con ellas a una profundidad mayor de descarga respecto a sus homólogas, como las baterías de plomo ácido (80% respecto a 50%, respectivamente) [21]. Las ecuaciones para calcular el estado de carga de un banco de baterías a una determinada hora, se presentan en las Ecuaciones 8 y 9, para los casos en los que se tenga una generación de energía mayor o menor a la demanda, respectivamente; con base en la metodología propuesta por S. Diaf *et al.* [22], indicando que en cualquier momento el estado de carga de la batería está relacionado con el anterior estado de carga, la producción de energía

y situación de consumo del sistema durante un día. Adicionalmente, el artículo de Jing Li *et al.* [23], complementa la metodología anteriormente expuesta en términos de definir la capacidad del banco de baterías de acuerdo con la variación de la diferencia entre la potencia generada tanto por los aerogeneradores como por los paneles fotovoltaicos y las demandas de carga en un ciclo. Por otro lado, es importante definir el voltaje del sistema con base en la potencia instalada de la microrred, según la Tabla 5. Puesto que preliminarmente no se conoce la potencia demandada por las cargas, se trabaja con un voltaje de 48V, según recomendación de expertos en el área.

**Tabla 5.**

*Rangos recomendados para la tensión del sistema*

| Potencia demanda por las cargas [W] | Tension del sistema [V] |
|-------------------------------------|-------------------------|
| < 1500                              | 12                      |
| 1500 - 5000                         | 24 - 48                 |
| > 5000                              | 48 - 120                |

**Nota.** Tensión recomendada según la potencia del sistema. Modificado de: M. d. I. A. Pinto Calderón. “Propuesta y evaluación de una microrred para las Islas de Providencia y Santa Catalina, Colombia”. Repositorio Institucional | Universidad Autónoma de Bucaramanga - UNAB. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/1500?show=full>

### Estado de carga en proceso de carga (Potencia generada es mayor a la Carga)

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t - 1)(1 - \sigma) + \left[ E_{PV}(t) + E_{WG}(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} \right] \cdot \eta_{bat} \quad \text{Ecuación 8}$$

### Estado de carga en proceso de descarga (Potencia generada es menor a la Carga)

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(t - 1)(1 - \sigma) - \left[ \frac{E_L(t)}{\eta_{inv}} - E_{PV}(t) - E_{WG}(t) \right] \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$C_{bat}(t)$ =Capacidad disponible del banco de baterías @hora evaluada [Wh],

$C_{bat}(t - 1)$ = Capacidad del banco de baterías @hora evaluada anterior [Wh],

$\sigma$  =Tasa de autodescarga de las baterías (0,14% por día),

$E_L(t)$ =Carga demandada @ hora evaluada [Wh],

$E_{PV}(t)$ =Energía generada por el arreglo de paneles @hora evaluada [W],

$E_{WG}(t)$ = Energía generada por el arreglo de turbinas @hora evaluada [W],

$\eta_{inv}$ =Eficiencia del inversor (comercialmente es de 85%),

$\eta_{bat}$ =Eficiencia individual de las baterías (comercialmente es de 80%).

Los valores de tasa de autodescarga, eficiencia del inversor y batería se ingresan con base en las recomendaciones realizadas en [22].

### 2.3.2. Capacidad de carga del banco de baterías

Se presenta en la Ecuación 10, el cálculo de la capacidad de carga que debería cubrir el banco de baterías propuesto para la microrred en cuestión [5].

$$C_{array} = \frac{(P_{instalada PV} \cdot N_{PV} + P_{instalada WT} \cdot N_{WT}) \cdot N}{V_{sistema} \cdot DOD} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$P_{instalada PV}$  =Potencia instalada del arreglo de paneles solares [W],

$P_{instalada WT}$  =Potencia instalada del arreglo de turbinas [W],

$N_{PV}$  =Cantidad de paneles solares en el arreglo,

$N_{WT}$  =Cantidad de turbinas eólicas en el arreglo,

$N$  =Autonomía de las baterías (1 hora, en un escenario conservador para reducir la cantidad de baterías requeridas),

$V_{sistema}$  = 48 V,

$DOD$  =Profundidad de descarga de las baterías (80 %, para baterías de litio).

### 2.3.3. Cantidad de baterías requeridas ( $N_{bat}$ )

El cálculo del número de baterías requerido en la microrred para cumplir los requerimientos presentados en la Ecuación 10, se lleva a cabo empleando las Ecuaciones 11, 12 y 13.

#### Numero de baterías conectadas en serie ( $N_s$ )

A continuación, se presenta el cálculo del número de baterías realizando una conexión en serie [24].

$$N_s = \frac{V_{nominal PV}}{V_{sistema}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$V_{nominal PV}$  =Voltaje nominal del arreglo de paneles [V].

#### Numero de baterías conectadas en paralelo ( $N_p$ )

A continuación, se presenta el cálculo del número de baterías realizando una conexión en paralelo [24].

$$N_p = \frac{C_{banco\ baterias}}{C_{nominal\ bateria}} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

$C_{banco\ baterias}$  = Capacidad nominal o instalada del banco de baterías [A·h],

$C_{nominal\ bateria}$  = Capacidad nominal individual de las baterías [A·h].

Luego entonces, se obtiene el número de baterías que conforman el banco o *array* [24].

$$N_{bat} = N_s \cdot N_p \quad \text{Ecuación 13}$$

#### 2.4. Regulador de carga

La selección del regulador de carga se basó en los modelos que comercialmente se ofrecen en el mercado, teniendo en cuenta, por un lado, que el equipo esté en la capacidad de admitir la potencia instalada en la microrred propuesta para la generación solar y eólica, según la Ecuación 14; por otro lado, que presente la característica de ser híbrido y permitir el control de carga para ambas fuentes de energía en un solo equipo.

$$P_{instalada} = P_{instalada\ PV} \cdot N_{PV} + P_{instalada\ WT} \cdot N_{WT} \quad \text{Ecuación 14}$$

#### 2.5. Inversor

Según la Ecuación 15, la selección del inversor de onda se realizó teniendo en cuenta la potencia de entrada que el equipo debería admitir [5].

$$P_{in} = \frac{1,2 \cdot P_{instalada}}{\eta_{inv}} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

$P_{in}$  =Potencia de entrada al inversor [W],

$P_{instalada}$  =Potencia instalada para generación solar y eólica [W],

$\eta_{inv}$  =Eficiencia del inversor (comercialmente es de 85%, como se mencionó anteriormente).

#### 2.6. Tráiler

Se propuso la selección del tráiler con base en la oferta comercial del mismo, bajo 2 criterios:

1. Realizar una distribución preliminar de los componentes de la microrred y, a partir de allí, evaluar las dimensiones del espacio de carga de diferentes modelos comerciales de tráiler.

2. Calcular el peso total de los componentes y contrastar dicho valor con la capacidad de carga del tráiler seleccionado bajo el criterio 1 y basado en la ficha técnica de cada componente de la microrred y del tráiler.

### **3. Resultados**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el diseño de la microrred móvil a partir de cuatro enfoques: el primero es comparar las curvas de generación y demanda de energía, evaluando las áreas bajo las curvas de ambos casos y, a partir de ello, establecer un criterio de diseño para evaluar diferentes alternativas o configuraciones de microrredes que cubran la demanda de carga en función de obtener una mayor área bajo la curva de generación, respecto a la curva de carga. A partir de ello, se seleccionan los componentes cuyas especificaciones técnicas cumplen con los parámetros requeridos. Adicionalmente, se calcula el circuito eléctrico que valide la selección de los equipos de protección y distribución eléctrica mencionados anteriormente, incluyendo los elementos conductores eléctricos y de protección ante descargas atmosféricas. Para abarcar el segundo enfoque, se realiza una distribución espacial preliminar con las dimensiones y peso de cada elemento como otro criterio de selección del tráiler. Un tercer enfoque evalúa, a través del módulo de Simulación por el Método de Elementos Finitos del software SOLIDWORKS, si la distribución de la microrred en el tráiler seleccionado compromete la integridad estructural del mismo, a través de la evaluación del esfuerzo de Von Mises en contraste con el límite elástico del tráiler; además del análisis del Desplazamiento Estático Máximo (URES). Finalmente, en un cuarto enfoque se reportan los costos asociados a la microrred móvil propuesta.

#### **3.1. Resultados comparando las curvas de carga y generación**

##### ***3.1.1. Curva de carga de una vivienda promedio en la isla***

Inicialmente, para caracterizar el comportamiento de consumo en un día, se analiza la información solicitada y enviada por el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para Zonas No Interconectadas (IPSE), correspondiente a la matriz de datos para generar la curva de carga de toda la isla de Providencia en el mes de Enero de 2023 [25]. Dado que la matriz presenta el valor de consumo en potencia por cada hora en los 31 días del mes en cuestión, resulta más práctico calcular un consumo horario promedio para todo el mes; luego entonces, se divide cada dato de consumo de carga entre las 1842 viviendas registradas en la

isla según el Censo realizado en el 2019 [26]. De esta forma, se obtiene la curva de carga para una vivienda promedio en la isla, representada en la Figura 8.

**Figura 8.**

*Curva de carga para una vivienda promedio en la isla de Providencia*



**Nota.** Se presenta la curva de carga para una vivienda promedio para el mes de enero de 2023. Modificado de: IPSE. “Informe Mensuales Telemetría – IPSE-CNM”. IPSE-CNM-Informes Mensuales de Telemetría. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://ipse.gov.co/cnm/informe-mensuales-telemetria/>

### 3.1.2. Análisis de generación respecto a consumo energético

A partir de allí, se planteó cuantificar la energía generada por las fuentes renovables de la microrred propuesta tomando como primer criterio de diseño, que el área bajo la curva de generación fuese mayor al área bajo la curva de carga, para asegurar espacios del día con excesos de generación de energía que se reflejan en la carga de las baterías.

El cálculo del área bajo las curvas de carga y generación corresponde a la sumatoria de las potencias registradas cada hora del día, según las Ecuaciones 16 y 17. Adicionalmente, se entiende como la energía acumulada por día, ya sea consumida o generada.

#### Consumo

$$\sum_{t=0}^{t=24} \text{Potencia de Carga, Consumo o Demanda} \quad \text{Ecuación 16}$$

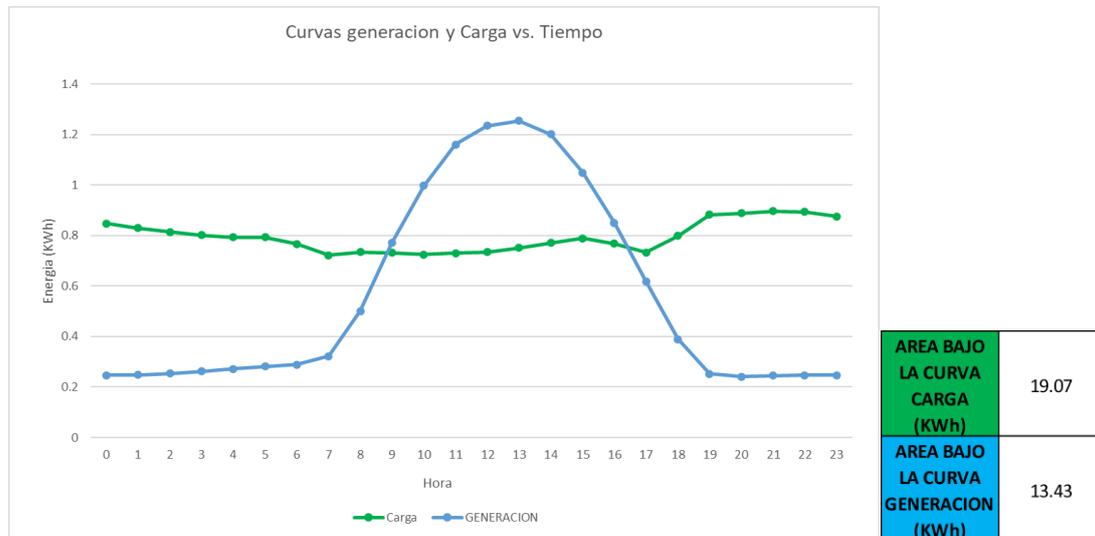
#### Generación

$$\sum_{t=0}^{t=24} \text{Potencia (Eólica + Solar)} = \sum_{t=0}^{t=24} (P_{PV} \cdot N_{PV} + P_{WT} \cdot N_{WT}) \quad \text{Ecuación 17}$$

Se ejecutó un proceso de cálculo iterativo en el cual, inicialmente, se planteó una microrred sugerida por expertos en el área y compuesta por 4 paneles solares-fotovoltaicos 300 W y 1 turbina eólica 1 KW, en la cual se obtuvo los resultados expuestos en la Figura 9.

**Figura 9.**

*Curvas de carga y generación para la microrred inicial*



**Nota.** Se presenta la curva de carga y generación para una microrred con 4 paneles solares-fotovoltaicos 300 W y 1 turbina eólica 1 KW.

A partir de dichos resultados, se evidencia que la microrred propuesta no satisface el criterio de diseño en cuanto a generación de energía respecto a la demanda. Debido a ello, se presenta en la Tabla 6 el resumen de los resultados de las iteraciones posteriores realizadas hasta llegar al dimensionamiento que cumpliera dicho criterio de diseño.

**Tabla 6.**

*Resumen de resultados de iteraciones realizadas*

| Microrred | $P_{PV}$ (W) | $N_{PV}$ | $P_{WT}$ (w) | $N_{WT}$ | Area bajo la curva de carga (KWh) | Area bajo la curva de generación (KWh) |
|-----------|--------------|----------|--------------|----------|-----------------------------------|--|
| 1         | 453          | 2        | 1000         | 1        | 19.07                             | 11.40                                  |
| 2         | 453          | 2        | 1000         | 2        | 19.07                             | 17.37                                  |
| 3         | 453          | 3        | 1000         | 2        | 19.07                             | 20.08                                  |
| 4         | 453          | 4        | 1000         | 2        | 19.07                             | 22.79                                  |
| 5         | 453          | 5        | 1000         | 2        | 19.07                             | 25.51                                  |

**Nota.** Iteraciones realizadas para cumplir el primer criterio de diseño.

### 3.1.3. Análisis de estado de carga de baterías

Se observa que las microrredes resaltadas 3, 4 y 5 cumplen dicho criterio de diseño. A partir de ello, se incorpora en la curva Potencia-Hora, el estado de carga de las baterías cada hora, como se puede apreciar en la Figura 10. Previo proceso, se determinó el número de baterías y su capacidad de carga que debería cubrir el banco de baterías propuesto, según la Tabla 7.

**Tabla 7.**

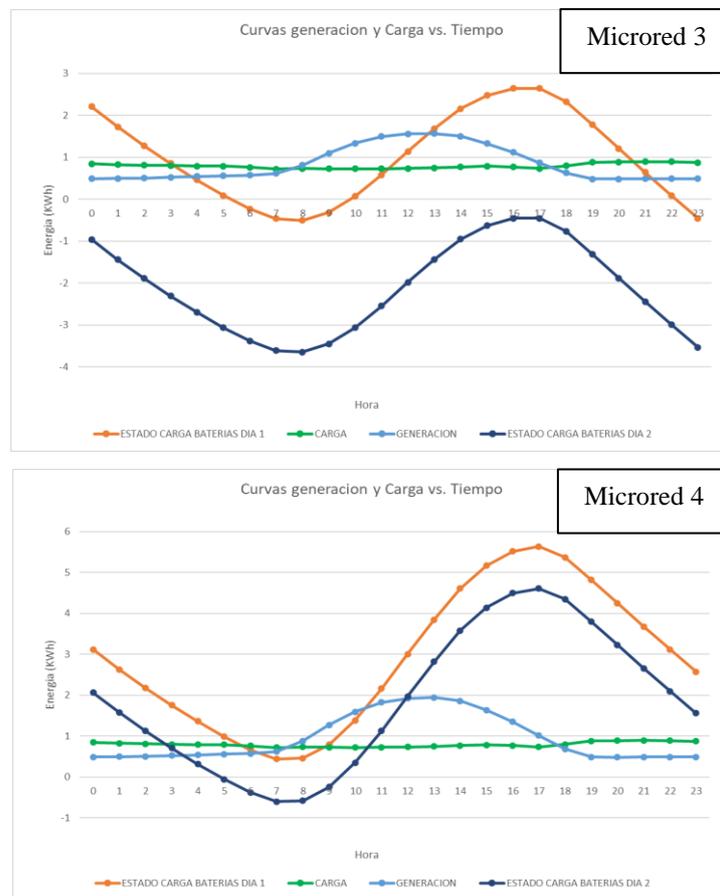
Capacidades de carga para los arreglos de baterías de las microrredes 3,4,5.

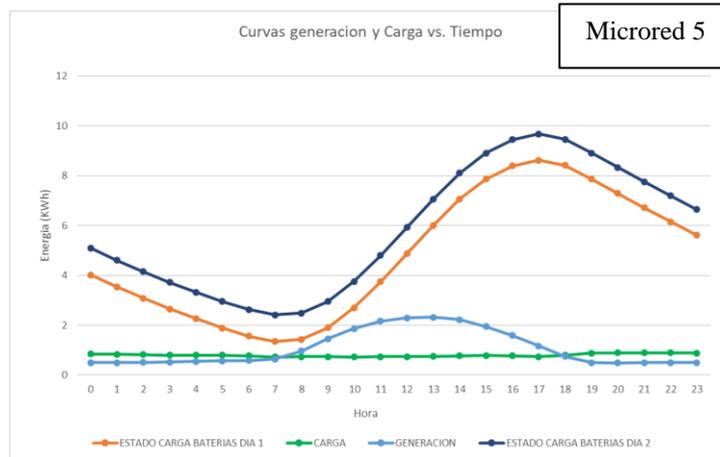
| Microred | $N_s$ | $N_p$ | $N_{bat}$ | $C_{array}$ (Ah) |
|----------|-------|-------|-----------|------------------|
| 3        | 1.00  | 1.00  | 1         | 35.44            |
| 4        | 1.00  | 1.00  | 1         | 47.24            |
| 5        | 1.00  | 1.00  | 1         | 59.04            |

**Nota.** Se presenta el número de baterías y la capacidad de carga que debería cubrir el banco de baterías para las microrredes 3,4 y 5.

**Figura 10.**

Curva de demanda, generación y estado de carga de la batería para las microrredes 3,4,5.



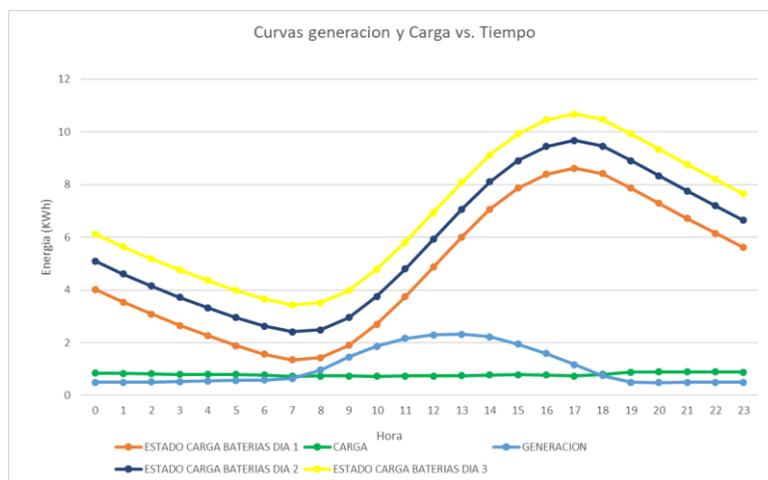


**Nota.** Se presentan las curvas de demanda, generación y estado de carga de la batería para las microrredes 3,4 y 5 para el primer y segundo día de operación.

Considerando las 3 opciones evaluadas anteriormente, se seleccionó la microrred 5 ya que el estado de carga de la batería al final del primer día de operación es mayor que al inicio del mismo; condición que no se presenta en las microrredes 3 y 4. Dicho comportamiento asegura que la batería no se descargue en mayor proporción con el pasar de los días de operación de la microrred, tal y como se puede observar en la Figura 11, para los primeros 3 días.

**Figura 11.**

*Curva de demanda, generación y estado de carga de la batería para la microrred 5.*



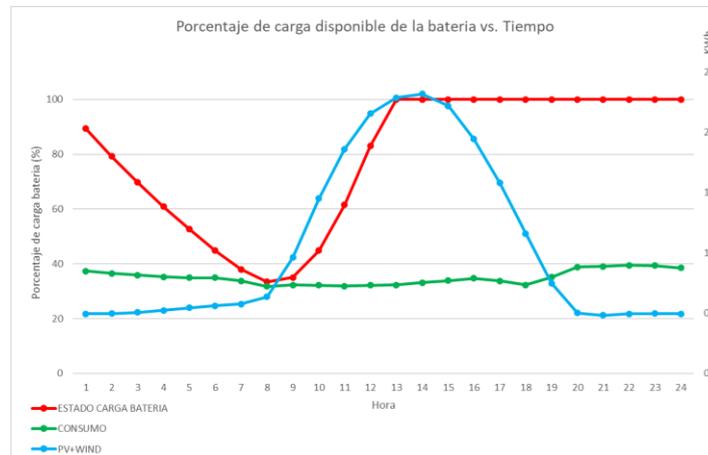
**Nota.** Se destaca el estado de carga de la microrred 5 para los días de operación 1, 2 y 3.

Por otro lado, la Figura 12 representa el porcentaje de carga disponible en la batería para la microrred 5. Este porcentaje indica, a determinada hora, cuál es el estado de carga de la batería respecto a su capacidad nominal. Cabe resaltar que la batería inicia operación con carga al 100 % y que, basado en la Ecuación 10, se definió una profundidad de descarga del 80%, dado que

se propone el uso de una batería de litio. En ese sentido, la energía disponible de la batería está enmarcada dentro de un rango de porcentaje de carga óptimo entre el 20 y 100 %.

**Figura 12.**

*Porcentaje de carga disponible en la batería de la microrred 5.*



**Nota.** Se observa el porcentaje de carga disponible en la batería con la microrred 5 a lo largo de 1 día de operación.

De la Figura 12, se concluye, por un lado, entre las 0 y 8 horas, la batería suministra energía para complementar la cobertura de la demanda de carga o consumo; entre las 8:30 y 12:30 horas, la batería se carga en su totalidad dadas las condiciones de sobre generación de energía eólica y solar (PV+WIND). Después de las 12:30 horas, se cuenta con un 100% de carga de reserva en la batería disponible para el siguiente día de operación de la microrred 5; gracias a la sobre generación evidenciada entre las 8 y 19 horas.

Adicionalmente, para determinar el comportamiento del estado de carga del *array* o banco de baterías en los días 2 y 3 de operación de la microrred, se realizó el mismo procedimiento llevado a cabo en el día 1 y tomando como estado inicial de carga, el estado de carga del array de baterías al final del día anterior, es decir, a las 24 horas.

### 3.1.4. Potencia instalada

Para determinar la potencia instalada de generación solar y eólica, se tiene la Ecuación 14, relacionada previamente:

$$P_{instalada} = P_{PV} \cdot N_{PV} + P_{WT} \cdot N_{WT}$$

$$P_{instalada} = 453 W \cdot 5 + 1000 W \cdot 2 = 2265 W + 2000W = 4265 W$$

De la potencia instalada calculada, según la Tabla 5, se define y confirma el voltaje o tensión del sistema de 48V. Por otro lado, la selección del regulador de carga se basó, preliminarmente,

en los modelos que comercialmente se ofrecen en el mercado, teniendo en cuenta, por un lado, las potencias instaladas en la microrred seleccionada para la generación solar (2265 W) y eólica (2000W), según (14); por otro lado, la característica de ser híbrido y permitir el control de carga para ambas fuentes de energía en un solo equipo.

Basado en la Ecuación 15, preliminarmente, la selección del inversor de onda se realizó con base en la potencia de entrada que debería admitir el equipo para un voltaje de 48V, como se definió previamente para el sistema [5].

$$P_{in} = \frac{1,2 \cdot P_{instalada}}{\eta_{inv}} = \frac{1,2 \cdot (4265 W)}{0,85} = 6021 W$$

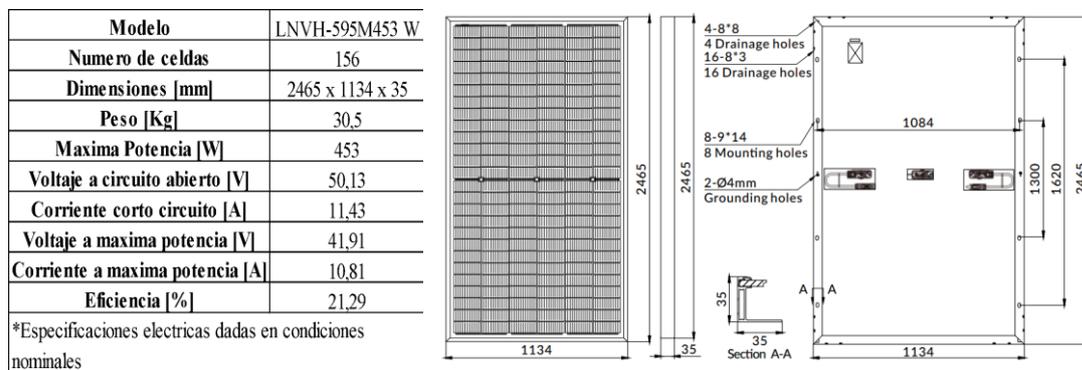
### 3.1.5. Componentes seleccionados

Dicho lo anterior, la microrred seleccionada se compone de los siguientes componentes:

**5 paneles solares-fotovoltaicos monocristalinos LNVH-595M453 W (nominal) c/u, cuya ficha técnica se puede apreciar en la Figura 13.**

**Figura 13.**

*Ficha técnica del panel solar LNVH-595M453 W*



**Nota.** Se presenta la ficha técnica y dimensiones del panel fotovoltaico seleccionado. Modificado de: “LUXPOWER Mono I 575 - 595W”. Paneles Solares Solartex Colombia. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.solartex.co/tienda/wp-content/uploads/2022/01/LUXEN-SERIES-5-182-156cells-LNVH-575-595w-MONOFACIAL.pdf>

**2 turbinas eólicas eje vertical FS-1000, 1000 W (nominal) c/u, cuya ficha técnica se puede apreciar en la Tabla 8.**

**Tabla 8.**

*Ficha técnica de la turbina eólica modelo FS-1000*

|  |            |   |
|--|------------|---|
| <b>Modelo</b>                                  | FS-1000    |  |
| <b>Velocidad de viento para arranque [m/s]</b> | 1,5        |   |
| <b>Velocidad de corte de viento [m/s]</b>      | 3          |   |
| <b>Velocidad nominal de viento [m/s]</b>       | 11         |   |
| <b>Voltaje nominal [V]</b>                     | 24V/48V    |   |
| <b>Potencia nominal [W]</b>                    | 1000       |   |
| <b>Diametro de rotor [m]</b>                   | 0,67       |   |
| <b>Altura de las hojas [m]</b>                 | 1,5        |   |
| <b>Peso [Kg]</b>                               | Menor a 40 |   |

**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen de turbina seleccionada. Modificado de: “Turbina eólica Vertical para el hogar, molino de viento de bajo ruido de 4000W, 6000W, 10000W, 20000W, CA trifásica, 10kW, 12V, 24V, 48V, 96V, 2kW”. aliexpress.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/WpuFhD>

## **1 Batería De Litio 48V - 100Ah, cuya ficha técnica se puede apreciar en la Figura 14.**

**Figura 14.**

*Ficha técnica de la batería de Litio 48V - 100 Ah*

|  |  |
|--|--|
| <b>Modelo</b>                            | 48 V 100 Ah                            |
| <b>Voltaje nominal</b>                   | 48                                     |
| <b>Capacidad nominal (Wh)</b>            | 4800                                   |
| <b>Capacidad de uso (Wh)</b>             | 3840 Wh/ 80% DOD                       |
| <b>Vida</b>                              | 10+(25°C/77T)                          |
| <b>Dimensiones (mm)</b>                  | 482*400*178                            |
| <b>Peso (Kg)</b>                         | 45                                     |
| <b>Ciclo de vida</b>                     | >6000,25°C                             |
| <b>Voltaje de descarga (V)</b>           | 37,5-54,7                              |
| <b>Voltaje de carga (V)</b>              | 48-54,7                                |
| <b>Corriente de carga y descarga (A)</b> | 50 A (recomendado)<br>y 100 A (maximo) |
| <b>Resistencia interna (Ω)</b>           | ≤30                                    |



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen de la batería seleccionada. Modificado de: “Batería De Litio 48v 100ah GreenPoint”. SOLPHOWER. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://solphower.co/es/productos/bateria-de-litio-48v-100ah/attached/33917542-4adc-4233-8f0b-4da17023605f>

## **1 regulador de carga híbrido (2KW Wind & 2,8KW SOLAR), 4800 W, 48V, cuyas características técnicas se presentan en la Figura 15.**

**Figura 15.**

*Regulador de carga híbrido 2KW Wind & 2,8 KW Solar*

|   |   | Parámetro del sistema |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
|---|---|-----------------------|----------|----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Modelo                                    |   | 500W                  | 1000W    | 1400W    | 1000W       | 2000W     | 2400W     | 2800W     | 2000W     | 2800W     | 4000W     | 4800W     |
| Voltaje nominal del sistema               |   | 12V                   |          |          | 24V         |           |           |           | 48V       |           |           |           |
| Módulo aerogenerador                      | MPPT(Boost Up)  | 7VAC                  |          |          | 17VAC       |           |           |           | 34VAC     |           |           |           |
|   | Corriente máxima  | 20.8A                 | 41.6A    | 58.3A    | 20.8A       | 41.6A     | 41.6A     | 58.3A     | 20.8A     | 29.1A     | 41.6A     | 41.6A     |
|   | Potencia funcional  | 0 ~ 250W              | 0 ~ 500W | 0 ~ 700W | 0 ~ 500W    | 0 ~ 1000W | 0 ~ 1000W | 0 ~ 1400W | 0 ~ 1000W | 0 ~ 1400W | 0 ~ 2000W | 0 ~ 2000W |
|   | AC Rectificar DC  | 16.8 VDC              |          |          | 33.6 VCC    |           |           |           | 67.2VDC   |           |           |           |
| Módulo solar                              | VOC   | <80V                  |          |          |             |           |           |           | <130V     |           |           |           |
|   | VMP   | 15V ~ 22VDC           |          |          | 30V ~ 44VDC |           |           |           |           |           |           |           |
|   | Corriente de carga máxima   | 20.8A                 | 41.6A    | 58.3A    | 20.8A       | 41.6A     | 58.3A     | 58.3A     | 20.8A     | 29.1A     | 41.6A     | 58A       |
|   | Potencia funcional  | 0 ~ 250W              | 0 ~ 500W | 0 ~ 700W | 0 ~ 500W    | 0 ~ 1000W | 0 ~ 1400W | 0 ~ 1400W | 0 ~ 1000W | 0 ~ 1400W | 0 ~ 2000W | 0 ~ 2800W |
| Carga DC                                  | Potencia de salida  | 0 ~ 120W              |          |          | 0 ~ 240W    |           |           |           | 0 ~ 480W  |           |           |           |
|   | Tensión nominal   | 12VDC                 |          |          | 24VDC       |           |           |           | 48VDC     |           |           |           |
|   | Corriente máxima  | 10A                   |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Descarga de carga                         | Carga de descarga externa   |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Corriente sin carga (CC)                  | ≤ 0.06A   |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Comunicación                              | Bluetooth (controlador integrado)   |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Protección                                | Protección de carga invertida solar, protección de circuito abierto de batería, antireversa de batería        |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
|   | Protección de conexión, protección contra sobrecorriente y sobretensión, protección contra frenos automáticos |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
|   | Protección contra sobrecarga, etc.  |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Modo enfriamiento                         | Ventilador de refrigeración y autoenfriamiento  |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| GW (Controlador + dumpload)               | 4,25Kg  |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Tamaño del controlador/tamaño del paquete | 260*194*97,33mm / 390*320*155mm   |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |
| Tamaño de la carga                        | 210*70*130mm  |                       |          |          |             |           |           |           |           |           |           |           |



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen del regulador de carga híbrido seleccionado. Modificado de: “Controlador de carga de sistema de energía Solar eólica híbrida, regulador de Panel Solar de turbina eólica con WIFI, 4800W, 12V, 24V, 48V”. aliexpress.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/CUxI0c>

## 1 Inversor GreenPoint 6000W 48VDC MPPT 80A 110/220VAC, cuyas características técnicas se presentan en la Figura 16.

Figura 16.

*Inversor GreenPoint 6000W 48VDC Mppt 80A 110/220VAC*

| Especificaciones del equipo  |                  |
|--|------------------|
| Voltaje del banco de baterías (V)                                  | 48 VDC           |
| Potencia pico (W)  | 18000            |
| Potencia nominal (W)   | 6000             |
| Forma de onda  | sinusoidal pura  |
| Eficiencia pico del inversor (%)                                   | 85               |
| Tensión de salida (V)  | 100-220 VAC      |
| Rango de frecuencia (Hz)   | 50/60            |
| Potencia máxima fotovoltaica (W)                                   | 4800             |
| MPPT (A)   | 80               |
| Máxima corriente de carga AC (A)                                   | 50               |
| Rango tensión de entrada solar (V)                                 | 160 VDC          |
| Baterías   | AGM, gel y litio |
| Protección de corto circuito, sobrecargas, descargar, temperatura. |                  |
| Dimensiones (mm)   | 560*380*280      |
| Peso neto (Kg)   | 16               |



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen del inversor seleccionado. Modificado de: “Inversor GreenPoint 6000W 48Vdc Mppt 80A 110/220Vac |”. Emergente Energía Sostenible. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.emergente.com.co/blog/producto/inversor-greenpoint-6000w-48vdc-mppt-80a-110-220vac/>

### 3.1.6. Cálculo del circuito eléctrico, validación de la selección de los equipos de protección y distribución eléctrica.

Se presenta a continuación el procedimiento llevado a cabo para el cálculo de la potencia eléctrica, voltaje y corriente en cada tramo o conexión de la microrred propuesta, vista como un circuito eléctrico. Mediante dicho procedimiento, se valida la selección de los equipos seleccionados para que estos se encuentren dentro de las ventanas de operación segura de intensidad de corriente, principalmente. Finalmente, se procedió a realizar el cálculo del calibre de los conductores eléctricos asociados a los tramos paneles-regulador, turbinas-regulador, regulador-batería, batería-inversor y los elementos de protección ante cortocircuitos y sobretensiones por descargas atmosféricas, dado que la instalación estará en una zona aislada, expuesta a la intemperie y sin altas estructuras alrededor, dada la ubicación rural seleccionada.

#### 3.1.6.1. Escenarios críticos de generación de energía

Inicialmente, dado que se tienen dos fuentes generadoras de energía, se presenta la posibilidad de tener intensidad de operación máxima y mínima. En ese sentido, establecer cuál es la combinación crítica permite determinar cuáles con las condiciones límites de la operación y, por lo tanto, diseñar adecuadamente el circuito eléctrico. Las combinaciones evaluadas son:

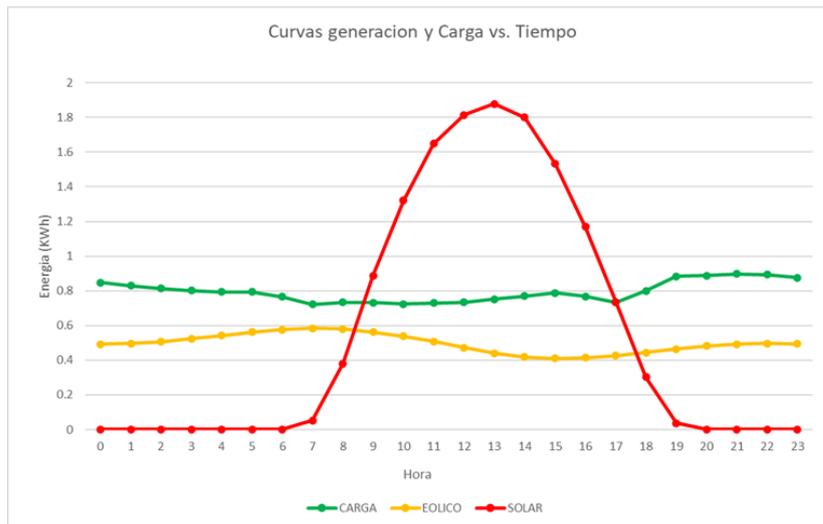
1. Sol y viento a máxima potencia
2. Sol y viento a mínima potencia
3. Sol a máxima potencia y viento en mínima potencia

#### 4. Sol a mínima potencia y viento a máxima potencia

La Figura 17 presenta las curvas de generación solar y eólica por hora y para la microrred propuesta; a partir de ello, la Tabla 9 presenta un resumen de los casos o escenarios de generación de potencia previamente mencionados, mostrando el dato de máxima y mínima potencia generada por los paneles solares y las turbinas eólicas.

**Figura 17.**

*Curvas de generación solar y eólica para la microrred propuesta*



**Nota.** Presenta las curvas de generación solar y eólica por hora y para la microrred propuesta, además del consumo o carga.

**Tabla 9.**

*Máxima y mínima generación de potencia para recurso solar y eólico en la microrred propuesta*

| Escenario/Recurso                         | Sol     | Viento  |
|---|---------|---------|
| <b>Maxima generacion de energia (KWh)</b> | 1.87746 | 0.58411 |
| <b>Minima generacion de energia (KWh)</b> | 0.00005 | 0.41034 |

**Nota.** Resumen de los casos o escenarios de generación de energía.

Realizando el respectivo cruce de escenarios de máxima y mínima generación, se concluye a partir de la Tabla 10 que el escenario crítico de diseño es de viento y sol a máxima potencia, como el total de la potencia generada en ambos casos de máxima generación.

**Tabla 10.**

*Combinaciones para escenarios de máxima y mínima generación de potencia para recurso solar y eólico en la microrred propuesta*

|   |         |
|---|---------|
| Viento y sol a máxima potencia (KWh)          | 2.46157 |
| Viento y sol a mínima potencia (KWh)          | 0.41039 |
| Viento a máxima y sol a mínima potencia (KWh) | 0.58416 |
| Viento a mínima y sol a máxima potencia (KWh) | 2.28780 |

**Nota.** El escenario crítico de diseño es de viento y sol a máxima potencia.

### 3.1.6.2. Cálculo de potencia, voltaje e intensidad de corriente

Posteriormente, se procedió a calcular y definir las variables de potencia eléctrica, voltaje y corriente en cada tramo de la microrred con base en el escenario crítico de máxima generación de energía, definido previamente.

#### Paneles solares fotovoltaicos

Inicialmente, se requiere conocer el tipo de conexión de los paneles solares [24], a través de las Ecuaciones 18 y 19.

$$\text{Conexión serie} = N_S = \frac{V_{\text{sistema}}}{V_{\text{nominal PV}}} = \frac{48 \text{ V}}{41,91 \text{ V}} = 1,14 \sim 1 \text{ panel} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\text{Conexión paralelo} = N_P = \frac{N_{PV}}{N_S} = \frac{5}{1} = 5 \text{ paneles} \quad \text{Ecuación 19}$$

De la Tabla 9, se sabe que la máxima generación solar es de 1,877 KWh, o lo que es igual a 1,877 KW, dado que se analizó el promedio de generación de energía en intervalos de tiempo de 1 hora, según la Figura 8. Por lo tanto, se evidencia lo anterior en la Ecuación 20:

$$\text{Potencia por panel} = \frac{\text{Potencia a máxima generación}}{N_{PV}} = \frac{1877 \text{ W}}{5} = 375,4 \text{ W} \quad \text{Ecuación 20}$$

De allí se obtiene, a través de la Ecuación 21, la corriente máxima emitida por cada panel:

$$I_{\text{max panel}} = \frac{\text{Potencia generada por panel}}{V_{\text{nominal PV}}} = \frac{375,4 \text{ W}}{41,91 \text{ V}} = 8,957 \text{ A} \quad \text{Ecuación 21}$$

Y se calcula, a través de la Ecuación 22, la corriente máxima del *array* de paneles solares, como la suma de las corrientes máximas individuales de los paneles:

$$I_{max\ array\ PV} = I_{max\ panel} \cdot 5 = 8,957\ A \cdot 5 = 44,79\ A \quad \text{Ecuación 22}$$

### **Aerogeneradores**

Inicialmente, se propone conectar en paralelo los 2 aerogeneradores. Dado que cada turbina cuenta con un generador AC síncrono de imanes permanentes, según ficha técnica indicada en la Tabla 8, es necesaria la incorporación de un rectificador por cada aerogenerador para obtener corriente continua; lo anterior se debe a que todo el circuito trabaja en corriente continua hasta la entrada del inversor, dado que inevitablemente equipos como los paneles solares y las baterías trabajan con este tipo de corriente. De la Tabla 9, se sabe que la máxima generación eólica es de 0,584 KWh, o lo que es igual a 0,584 KW, dado que se analizó el promedio de generación de energía en intervalos de tiempo de 1 hora, según la Figura 8. Por lo tanto, se evidencia lo anterior en la Ecuación 23:

$$Potencia\ por\ turbina = \frac{Potencia\ a\ máxima\ generación}{N_{WT}} = \frac{584\ W}{2} = 292\ W \quad \text{Ecuación 23}$$

De allí se obtiene, a través de la Ecuación 24, la corriente máxima emitida por cada aerogenerador:

$$I_{max\ WT} = \frac{Potencia\ generada\ por\ aerogenerador}{V_{nominal\ WT}} = \frac{292\ W}{48\ V} = 6,08\ A \quad \text{Ecuación 24}$$

Se calcula, a través de la Ecuación 25, la corriente máxima del *array* de aerogeneradores, como la suma de las corrientes máximas individuales de los mismos:

$$I_{max\ array\ WT} = I_{max\ WT} \cdot 2 = 6,08\ A \cdot 2 = 12,17\ A \quad \text{Ecuación 25}$$

### **Regulador híbrido**

Para validar la selección del equipo, de la Figura 15, se observa que el modelo preseleccionado 4800 W - 48 V, cuenta con un paso máximo de corriente para módulo solar y aerogenerador de 58 A y 41,6 A, respectivamente. Por ello, se siguió el procedimiento sugerido por Steluta Nedelcu [32], para realizar la elección de un regulador de carga:

**Máxima corriente que permite el equipo, la cual debe ser un 20% superior a la máxima corriente admisible por módulo de generación [32].**

De las Ecuaciones 22 y 25, se conocen las corrientes máximas del *array* de paneles solares y de los aerogeneradores, por lo tanto, las Ecuaciones 26 y 27 presentan el cálculo de las corrientes máximas por generación solar y eólica con el factor de seguridad del 20% sugerido previamente:

$$\text{Corriente a max. generación solar (+20\%)} = 44,79 \text{ A} \cdot 1,2 = 53,75 \text{ A} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$\text{Corriente a máx. generación eólica (+20\%)} = 24,3 \text{ A} \cdot 1,2 = 29,16 \text{ A} \quad \text{Ecuación 27}$$

Se observa que las corrientes calculadas son menores a las corrientes máximas admisibles según la ficha técnica del regulador seleccionado, validando la selección del equipo en términos de intensidad de corriente.

**Tensión de trabajo igual a la tensión de los acumuladores o baterías [32].**

De la ficha técnica de la batería seleccionada en la Figura 14, se observa que el voltaje de trabajo de este acumulador es de 48V, lo cual está alineado con el voltaje de trabajo del modelo de regulador seleccionado, por lo tanto, se valida la selección del equipo en términos de tensión o voltaje de trabajo.

Finalmente, de la Ecuación 28 se obtiene la corriente de salida del regulador como la suma de las corrientes máximas producidas por la generación solar y eólica:

$$I_{\text{salida regulador}} = 44,79 \text{ A} + 24,3 \text{ A} = 69,09 \text{ A} \quad \text{Ecuación 28}$$

### **Batería**

De la Figura 14, se observa, de la ficha técnica de la batería seleccionada, el parámetro de corriente de carga y descarga recomendada y máxima de 50 y 100 A, respectivamente. De la Ecuación 28, previamente se calculó la corriente de salida del regulador y, por ende, la corriente de entrada a la batería de 69,09 A, la cual se encuentra dentro del rango de intensidad de corriente indicado anteriormente. Por otro lado, a través de la Ecuación 29, se calcula la máxima potencia eléctrica que la batería estaría en la capacidad de suministrar:

$$P_{\text{batería}} = V_{\text{batería}} \cdot I_{\text{max batería}} = 48 \text{ V} \cdot 100 \text{ A} = 4800 \text{ W} \quad \text{Ecuación 29}$$

Por lo cual, dicha potencia cubre en su totalidad la potencia instalada de la microrred seleccionada de 4265 W. Además, la batería seleccionada cuenta con una capacidad de carga

de 100 Ah, cubriendo de esta forma la capacidad de carga requerida de 59,04 Ah, para la microrred 5, según la Tabla 7. De esta forma, se valida la selección de la batería en términos de potencia, voltaje, corriente y capacidad de carga.

### **Inversor**

A través de la Ecuación 30, se calcula la corriente máxima permisible por el inversor seleccionado, a partir de potencia máxima de entrada obtenida con la Ecuación 15, de 6021 W y el voltaje de trabajo del equipo de 48 V, según la ficha técnica indicada en la Figura 16.

$$I_{max\ entrada\ inversor} = \frac{P_{in}}{V_{inversor}} = \frac{6021\ W}{48\ V} = 125\ A \quad \text{Ecuación 30}$$

Dicho valor de intensidad de corriente cubre el valor de corriente esperado a la entrada del equipo de 69,09 A, según la Ecuación 28; validando de esta forma la selección del inversor en términos de potencia, voltaje y corriente. Es importante mencionar que la Ecuación 30 es válida, dadas las condiciones de trabajo en corriente directa a la entrada del inversor, diferente a las condiciones de corriente alterna a la salida del equipo.

### **3.1.6.3. Cálculo del sistema de protección eléctrica**

Se procede a definir el sistema de protección eléctrica ante cortocircuitos y sobretensiones por descargas atmosféricas.

#### **Selección de fusible de protección paneles solares-regulador**

Basado en el procedimiento y ecuaciones propuestas por la guía de aplicaciones fotovoltaicas de la serie Bussmann de EATON [33], se definen inicialmente la corriente de cortocircuito y voltaje a circuito abierto del *array* de paneles solares como parámetros o criterios de selección del fusible a implementar, ver las Ecuaciones 31 y 32. Según [33], se recomienda usar los factores de seguridad de 1,56 para corriente y 1,2 para tensión durante la selección del fusible, dado que estos abarcan la mayoría de variaciones generadas en una instalación.

$$I_{fusible\ (PV-regulador)} = 1,56 \cdot I_{sc} \cdot N_{PV} = 1,56 \cdot 11,43\ A \cdot 5 = 89,154\ A \quad \text{Ecuación 31}$$

$$V_{fusible\ (PV-regulador)} = 1,2 \cdot V_{oc} = 1,2 \cdot 50,13\ V = 60,156\ V \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

$I_{sc}$ =Corriente corto circuito del panel individual (A), según ficha técnica [27],

$V_{oc}$ =Voltaje a circuito abierto del panel individual (V), según ficha técnica [27].

Se selecciona un fusible NH-1 GPV [34], el cual cuenta con un rango nominal de corrientes de 40-630 A y una tensión en corriente continua de 1000 V, según la Figura 18; y cubre los márgenes de corriente y tensión obtenidos por las Ecuaciones 31 y 32, protegiendo así los 5 paneles solares.

**Figura 18.**

*Fusible NH-1 GPV*



**Nota.** Ficha técnica de fusible seleccionado. Tomado de: “Fusible NH-1 de 100A (1000 VDC). Clase gPV | NH-1 de 100A gPV”. temper. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.grupotemper.com/producto/nh-1-de-100a-gpv>

### Selección de fusible de protección aerogeneradores-regulador

Para definir el voltaje y corriente que debe admitir el fusible en el caso de los aerogeneradores, se tomó el valor de máxima corriente de trabajo producida por los mismos, según la Ecuación 25, y el voltaje de trabajo 48V o el mismo voltaje del sistema, según las Ecuaciones 33 y 34, aplicando los respectivos factores de seguridad, se obtiene:

$$I_{fusible (WT-regulador)} = 1,56 \cdot I_{max WT} \cdot N_{WT} = 1,56 \cdot 12,17 A \cdot 2 = 37,97 A \quad \text{Ecuación 33}$$

$$V_{fusible (WT-regulador)} = 1,2 \cdot V_{nominal WT} = 1,2 \cdot 48 V = 57,6 V \quad \text{Ecuación 34}$$

Se selecciona un fusible NH-1 GPV [34], dado que según la Figura 18, el elemento cubre los márgenes de corriente y tensión obtenidos por las Ecuaciones 33 y 34.

### **Selección de fusible de protección regulador-batería**

Para definir el voltaje y corriente que debe admitir el fusible en el caso del tramo regulador-batería, se tomó el valor de máxima corriente de trabajo producida por el regulador bajo condiciones de máxima generación, a partir de la Ecuación 28, y el voltaje de trabajo 48V o el mismo voltaje del sistema, según las Ecuaciones 35 y 36, aplicando los respectivos factores de seguridad, se obtiene:

$$I_{fusible (regul.-batería)} = 1,56 \cdot I_{salida\ regulador} = 1,56 \cdot 69,09\ A = 107,78\ A \quad \text{Ecuación 35}$$

$$V_{fusible (regul.-batería)} = 1,2 \cdot V_{sistema} = 1,2 \cdot 48\ V = 57,6\ V \quad \text{Ecuación 36}$$

Se selecciona un fusible NH-1 GPV [34], dado que según la Figura 18, el elemento cubre los márgenes de corriente y tensión obtenidos por Ecuaciones 35 y 36.

### **Selección de fusible de protección batería-inversor**

Para definir el voltaje y corriente que debe admitir el fusible en el caso del tramo batería-inversor, se tomó el valor de máxima corriente de trabajo en carga/descarga de la batería bajo condiciones de máxima operación, y el voltaje de trabajo 48V o el mismo voltaje del sistema, según las Ecuaciones 37 y 38, aplicando los respectivos factores de seguridad, se obtiene:

$$I_{fusible (batería-inver.)} = 1,56 \cdot I_{carga/descarga} = 1,56 \cdot 69,09\ A = 107,78\ A \quad \text{Ecuación 37}$$

$$V_{fusible (batería-inver.)} = 1,2 \cdot V_{sistema} = 1,2 \cdot 48\ V = 57,6\ V \quad \text{Ecuación 38}$$

Se selecciona un fusible NH-1 GPV [34], dado que según la Figura 18, el elemento cubre los márgenes de corriente y tensión obtenidos por las Ecuaciones 37 y 38.

Posteriormente, se requieren 2 cajas principales de protección para los tramos paneles solares-regulador híbrido y aerogeneradores-regulador híbrido. Estas cajas deben contener los siguientes componentes de protección: fusibles, breaker y sistema DPS para descargas atmosféricas.

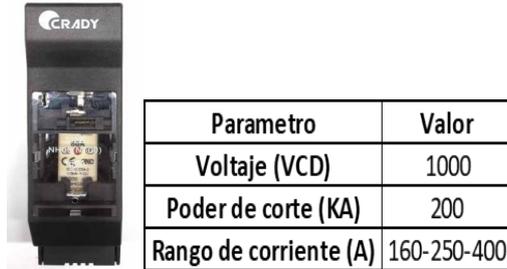
### **Caja de protección principal paneles solares-regulador híbrido**

Se compone de 2 fusibles (1 para la línea positiva y 1 para la línea negativa) según la Figura 18 [34], 2 portafusibles tipo BUC para fusibles de cuchilla tipo NH, que se presentan en la Figura 19 [35], un sistema DPS dipolo de 40 kA - 630 VDC, sugerido por el fabricante GEYA, según la Figura 20 [36] y un breaker bipolo de 100 A, 250-500 VDC [37], que se indica en la

Figura 21; dado que se tiene una corriente en cortocircuito para el array de paneles de 89,154 A, según la Ecuación 31. En síntesis, la Figura 22 presenta una caja principal modelo del fabricante GEYA, para instalar en el tramo mencionado [36].

**Figura 19.**

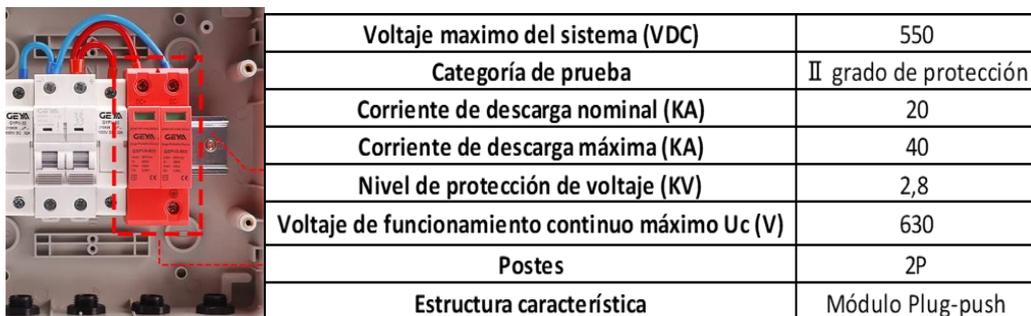
*Portafusible tipo BUC para fusibles de cuchilla*



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen del portafusible seleccionado. Modificado de: “Portafusibles BUC para Fusibles de Cuchilla NH00 y NH000 | Coelectrix.com”. Coelectrix. Accedido el 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://coelectrix.com/producto/portafusibles-buc-para-fusibles-nh00>

**Figura 20.**

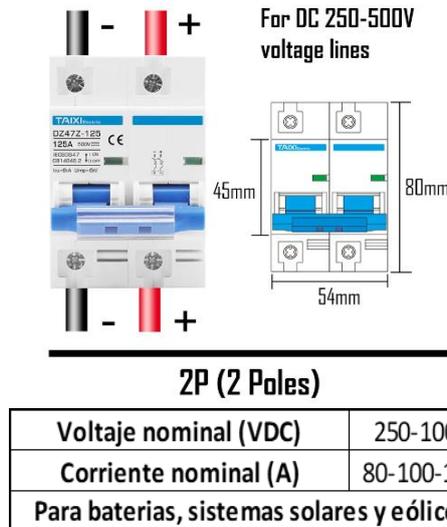
*Sistema DPS dipolo de 40 kA - 630 VDC, fabricante GEYA*



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen del sistema DPS dipolo seleccionado. Modificado de: “GEYA interruptor de circuito para Panel Solar, caja combinadora de plástico GYPV/1 1, 550V, 15A, 1 cuerda, 550VDC, 1 en 1”. aliexpress.com. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/Y5DoIY>

**Figura 21.**

*Breaker bipolo de 100 A, 250-500 VDC*



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen del breaker bipolo de 100 A seleccionado. Modificado de: “Disyuntor de energía Solar PV DC 1000V/500V 125A MCB 1P 2P 4 polos 80 Amp 100A”. AliExpress. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/qigOzp>

**Figura 22.**

*Caja principal modelo, del fabricante GEYA*



|  |  |
|--|--|
| Voltaje CC máximo del sistema (VDC)              | 550  |
| Corriente máxima de entrada para cada cuerda (A) | 15   |
| Cadenas de entrada máxima                        | 1  |
| Corriente máxima del interruptor de salida (A)   | 16   |
| Número de inversor MPPT                          | 1  |
| Número de cadenas de salida                      | 1  |
| Categoría de prueba                              | II grado de protección contra rayos                                    |
| Corriente de descarga nominal (KA)               | 20   |
| Corriente de descarga máxima (KA)                | 40   |
| Nivel de protección de voltaje (KV)              | 2,8  |
| Voltaje de funcionamiento continuo máximo Uc (V) | 630  |
| Postes   | 2  |
| Estructura característica                        | Módulo Plug-push   |
| Grado de protección                              | IP65   |
| Interruptor de salida                            | Interruptor de aislamiento de CC (estándar)/Disyuntor de CC (opcional) |
| Conectores impermeables MC4R                     | Estándar   |
| Fusible PV DC                                    | Estándar   |
| Protector contra sobretensiones PV               | Estándar   |
| Módulo de monitoreo                              | Opcional   |
| Diodo preventivo                                 | Opcional   |
| Material de caja                                 | PVC  |
| Método de instalación                            | Tipo de montaje en pared   |
| Temperatura de funcionamiento                    | -25 °C ~ + 55 °C   |
| Ancho x Alto x Profundidad (mm)                  | 208*213*116  |

**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen de la caja principal modelo propuesta. Modificado de: “GEYA interruptor de circuito para Panel Solar, caja combinadora de plástico GYPV/1 1, 550V, 15A, 1 cuerda, 550VDC, 1 en 1”. aliexpress.com. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/Y5DoIY>

De acuerdo a la Figura 22, el equipo cuenta con un grado de protección IP 65, bajo la norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI) y la CEI 60529, la cual se refiere a la resistencia de los dispositivos para su uso en interiores y exteriores [38]. Basado en ello, un

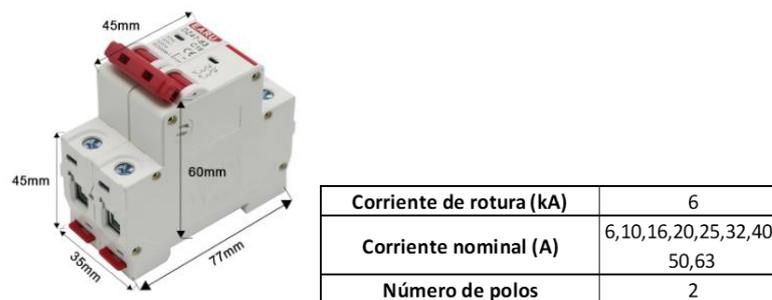
grado 65 indica que la caja se encuentra totalmente protegida contra el polvo y contra chorros de agua en todas las direcciones.

### Caja de protección principal aerogeneradores-regulador híbrido

Se compone de 2 fusibles (1 para la línea positiva y 1 para la línea negativa), 2 portafusible tipo BUC para fusibles de cuchilla [35], un sistema DPS dipolo de 20-40 KA sugerido por el fabricante GEYA [36] y un breaker bipolo de 40 A [39], dado que se tiene una corriente máxima en los aerogeneradores de 37,97 A, según (33); este breaker se puede observar la Figura 23. En síntesis, se instala en una caja principal del mismo modelo presentado en la Figura 22.

**Figura 23.**

*Breaker bipolo de 40 A*



**Nota.** Se presenta ficha técnica e imagen del breaker bipolo de 40 A seleccionado. Modificado de: “C45N 2 polos 3A/6A/10A/16A/20A/32A/40A/50A/63A 400V ~ C tipo Mini disyuntor Mcb montaje 35mm carril Din capacidad de rotura 6KA[Fusibles de interruptor de circuito]”. aliexpress.com. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/hneRQ6>

#### 3.1.6.4. Cálculo de conductores eléctricos

Para el cálculo de los conductores eléctricos necesarios para el cableado de la microrred, se siguió el procedimiento y ecuaciones propuestas en el artículo de Leonardo Bohorquez [40], bajo la Ecuación 39 para el cálculo del calibre requerido de los conductores en cada tramo de la microrred:

$$A = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot 0,85}{V \cdot e\%} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

A= Área o sección del cable conductor [mm<sup>2</sup>],

$\rho$ = Resistividad del cobre [0.01785  $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m],

L=Longitud del tramo evaluado,

I=Corriente del tramo evaluado,

V=Voltaje del sistema,

e%=Caída de tensión en el tramo evaluado,

0,85 es el factor de ajuste para conductores expuestos a la radiación solar, sugerido por el autor [40].

Adicionalmente, Neidaly Sanchez en su trabajo de grado [41], relaciona las caídas máximas de tensión sugeridas para sistemas de energía solar autónoma, los cuales se pueden evidenciar en la Tabla 11.

**Tabla 11.**

*Caídas máximas de tensión según tramo evaluado*

| Circuito o tramo evaluado | Caída máxima de tensión |
|---------------------------|-------------------------|
| Modulo solar-Regulador    | < 3 %                   |
| Regulador-Bateria         | < 1 %                   |
| Regulador-Cargas DC       | < 5 %                   |
| Bateria-Inversor          | < 1 %                   |
| Inversor-Cargas AC        | < 5 %                   |

**Nota.** Se indican las caídas máximas de tensión sugeridas para sistemas de energía solar autónoma. Modificado de: N. Sanchez Gallego. “DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO SOLAR PARA EL BOMBEO DE AGUA”. Repositorio académico Universidad Tecnológica de Pereira. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/71399232.pdf>

### Tramo paneles solares-regulador

$$A = \frac{2 \cdot 0,01785 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}^2 \cdot 1,834 \text{ m} \cdot 89,154 \text{ A} \cdot 0,85}{48 \text{ V} \cdot 0,03} = 3,44 \text{ mm}^2$$

Según el estándar para construcciones de conductores americanas tabla de AWG, para una sección real en mm<sup>2</sup> y resistencia de conductores, relacionada en el sitio web del fabricante SAB Bröckskes [42], para la sección de conductor calculada, se tiene un calibre AWG de 11.

### Tramo aerogeneradores-regulador

$$A = \frac{2 \cdot 0,01785 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}^2 \cdot 1,194 \text{ m} \cdot 37,97 \text{ A} \cdot 0,85}{48 \text{ V} \cdot 0,03} = 0,95 \text{ mm}^2$$

Para la sección de conductor calculada, se tiene un calibre AWG de 17 [42].

### Tramo regulador-batería

$$A = \frac{2 \cdot 0,01785 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}^2 \cdot 0,5 \text{ m} \cdot 107,78 \text{ A} \cdot 0,85}{48 \text{ V} \cdot 0,01} = 3,41 \text{ mm}^2$$

Para la sección de conductor calculada, se tiene un calibre AWG de 11 [42].

### Tramo batería-inversor

$$A = \frac{2 \cdot 0,01785 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}^2 \cdot 1 \text{ m} \cdot 107,78 \text{ A} \cdot 0,85}{48 \text{ V} \cdot 0,01} = 6,81 \text{ mm}^2$$

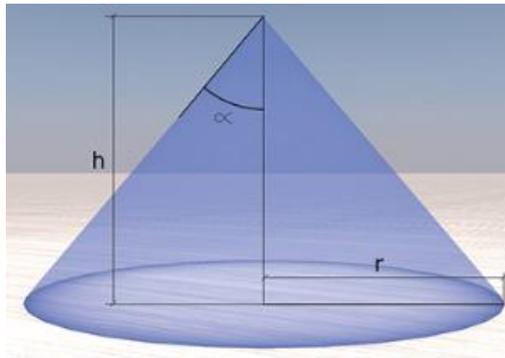
Para la sección de conductor calculada, se tiene un calibre AWG de 8 [42].

### 3.1.6.5. Cálculo del sistema de pararrayos

Para la selección del sistema pararrayos para protección ante descargas atmosféricas, se propone una punta captadora tipo Franklin, dado que son las más comerciales, económicas en su mantenimiento y no contaminantes [43]; además, el trabajo de Carlos Bravo *et al.* [44], presenta un ejemplo de aplicación de una punta captadora tipo Franklin en un sistema fotovoltaico aislado. Este autor también indica los elementos que componen un sistema contra rayos, como son un captor (pararrayos), un conductor bajante y un sistema de puesta a tierra. Inicialmente, se determina el campo de protección del pararrayos como un cono con base circular, el cual presenta las características presentadas en la Figura 24.

**Figura 24.**

*Representación geométrica del campo de protección del pararrayos*



**Nota.** Se representa el campo de protección del pararrayos como un cono con base circular. Tomado de: “Puntas captadoras”. INGESCO Lightning Solutions. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ingesco.com/es/productos/puntas-captadoras>

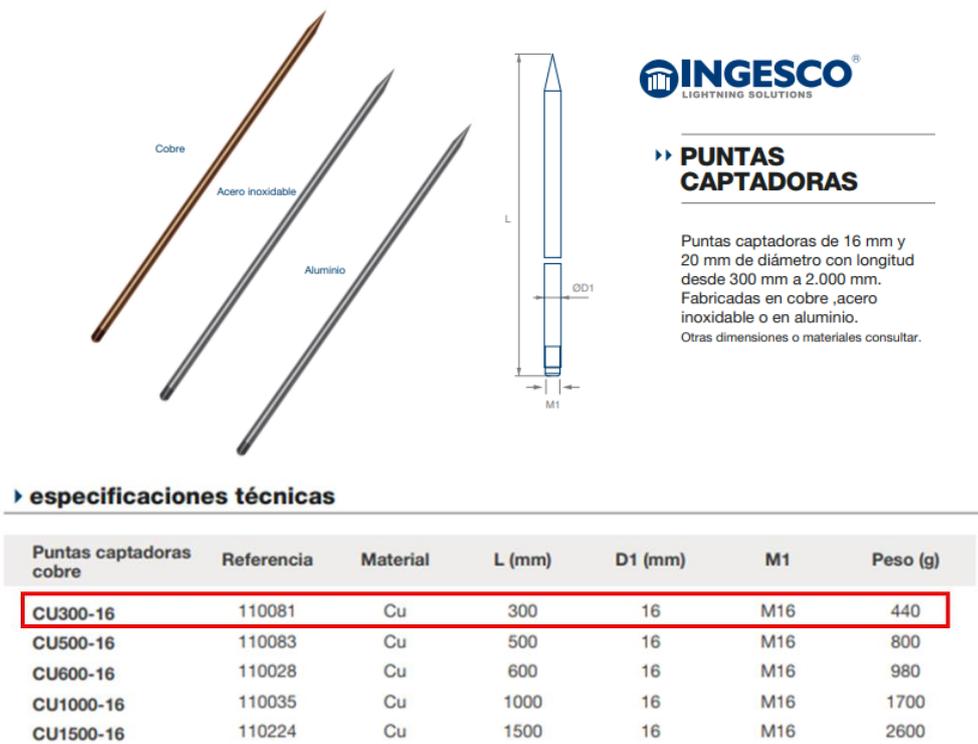
Un sistema de pararrayos tipo Franklin puede brindar un ángulo de protección de aproximadamente de 45 a 60 grados, dado que estadísticamente se ha comprobado, según lo indicado por el mismo autor, que el campo de protección se debe calcular aproximadamente con un radio igual a su altura [44]. En ese sentido, dado que se proyecta izar la turbina hasta

los 10 metros de altura respecto a la base del tráiler, el pararrayos se ubica a 12 metros respecto a la misma referencia, con un ángulo de protección de 45°, según [44].

En línea con lo anteriormente definido, se propone el uso de una punta captadora simple en cobre tipo Franklin del fabricante INGESCO [45], para la referencia CU300-16, como se evidencia en la ficha técnica de la Figura 25. Es importante indicar que el sistema seleccionado cumple con la norma IEC 62305 de protección contra rayos [46], según ficha técnica; esta norma indica que estos sistemas deben diseñarse para valores máximos de corriente de rayo, los cuales se aplican en el diseño de dispositivos como componentes de protección contra rayos y dispositivos de protección contra sobretensiones (SPD).

**Figura 25.**

*Punta captadora tipo Franklin CU300-16*



**Nota.** Se presenta la ficha técnica e imagen de la punta captadora simple en cobre tipo Franklin seleccionada. Tomada de: “Puntas captadoras”. INGESCO Lightning Solutions. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ingesco.com/es/productos/puntas-captadoras>

La punta captadora se acopla a uno de los mástiles de los aerogeneradores para aprovechar la estructura ya existente, a través de una estructura en “L”. Por un lado, la conexión de la punta captadora se hace a través de rosca métrica M16, como lo indica la Figura 25; a la cual le corresponde un agujero de 14 mm y para un paso de 2 mm, según el estándar de rosca métrica ISO DIN 13 [47], como se indica en la Figura 26.

**Figura 26.**

Rosca métrica paso normal M16 x 2

| Rosca<br>Thread | Paso<br>Pitch | Ø Broca<br>Ø Drill |
|-----------------|---------------|--------------------|
| M 12            | 1,75          | 10,2               |
| M 14            | 2             | 12                 |
| M 16            | 2             | 14                 |

**Nota.** Se muestra el paso y diámetro de hueco para una rosca M16. Tomado de: “Tabla de roscas normalizadas”. Tornillera aragonesa. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [http://www.tornillera.com/archivos/info\\_tecnica/esp/tabla\\_roscas.pdf](http://www.tornillera.com/archivos/info_tecnica/esp/tabla_roscas.pdf)

Se propone implementar tubería mecánica redonda 5/8” de espesor 0,90 mm, con recubrimiento galvanizado, con un diámetro interno de 14,08 mm, según el catálogo del proveedor Agofer para tubería mecánica redonda IPAC [48], indicado en la Figura 27, lo cual se ajusta al diámetro de agujero de 14 mm indicado en la Figura 26, para realizar la rosca interna a través de un machuelo de rosca métrica.

**Figura 27.**

Tubería mecánica redonda 5/8” seleccionada

Tubería Mecánica  
Redonda IPAC





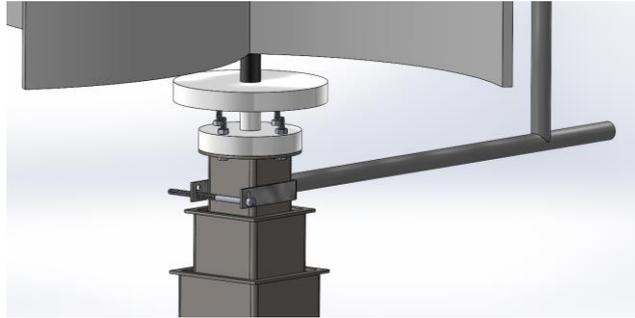
| Designaciones     |         | Área | Peso | Propiedades Estáticas |                       |               |      |
|-------------------|---------|------|------|-----------------------|-----------------------|---------------|------|
| Diámetro Exterior | Espesor |      |      | Momento de Inercia    | Módulo de resistencia | Radio de giro |      |
| D                 | e       | A    | P    | I                     | W                     | i             |      |
| pulg.             | mm      | cm²  | kg/m | cm⁴                   | cm³                   | cm            |      |
| 1/2               | 12,70   | 0,60 | 0,23 | 0,18                  | 0,04                  | 0,07          | 0,43 |
|                   |         | 0,75 | 0,28 | 0,22                  | 0,05                  | 0,08          | 0,42 |
|                   |         | 0,90 | 0,33 | 0,26                  | 0,06                  | 0,09          | 0,42 |
|                   |         | 1,10 | 0,40 | 0,31                  | 0,07                  | 0,11          | 0,41 |
| 5/8               | 15,88   | 0,60 | 0,29 | 0,23                  | 0,08                  | 0,11          | 0,54 |
|                   |         | 0,75 | 0,36 | 0,28                  | 0,10                  | 0,13          | 0,54 |
|                   |         | 0,90 | 0,42 | 0,33                  | 0,12                  | 0,15          | 0,53 |
|                   |         | 1,00 | 0,47 | 0,37                  | 0,13                  | 0,16          | 0,53 |
|                   |         | 1,10 | 0,51 | 0,40                  | 0,14                  | 0,18          | 0,52 |

**Nota.** Se presentan los parámetros para tubería mecánica de 5/8 de pulgada. Tomado de: “Tubería Mecánica IPAC”. AGOFER DITH Group. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/9fec2152/files/uploaded/22.Tubería-mecánica-redonda-IPAC-de%20acero-para-muebles-CR-Agofer.pdf>

Por otro lado, para unir la estructura al mástil telescópico, se propone un sistema tipo abrazadera, con sistema de sujeción tornillo-tuerca, con lámina pregalvanizada de 2 mm de espesor, como se evidencia en la Figura 28.

**Figura 28.**

*Sistema de sujeción estructura en “L”-mástil telescópico*

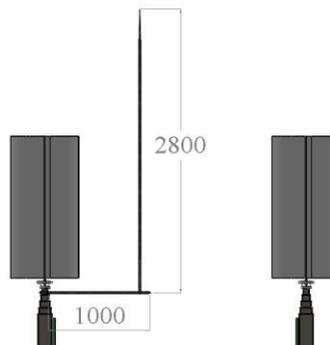


**Nota.** Se observa el sistema para fijar la estructura de la punta captadora con el mástil, diseñado en el software SOLIDWORKS®.

De esta manera, la Figura 29 presenta un esquema del montaje propuesto.

**Figura 29.**

*Montaje del sistema de pararrayos en el mástil telescópico*



**Nota.** Se presentan las dimensiones en milímetros del sistema de fijación del pararrayos diseñado en el software SOLIDWORKS®.

Posteriormente, para definir el conductor bajante, se consultaron cables de cobre pararrayos disponibles en el mercado, donde se revisó las referencias del fabricante ARGOS, el cual sugiere su uso para bajadas y varillas de tierra en los sistemas de pararrayos de edificios y construcciones en general [49]. La Figura 30 presenta la ficha técnica del conductor en cuestión.

**Figura 30.**

Cable de cobre para pararrayos, fabricante ARGOS

argoselectrica.com

# ARGOS

Cable de cobre para pararrayos

Conductores 2.21

**Características técnicas**

- Conductor de cobre en temple suave formado en pares y cableado ente sí.
- Alambres de cobre de alta pureza con un contenido mínimo de 99.9%
- Su construcción permite un rápido enfriamiento o disipación de calor.
- Por su alta conductividad, fácilmente da paso a descargas atmosféricas.
- Su construcción flexible permite seguir el contorno de techos y aristas durante su instalación.
- Alta resistencia a la corrosión.

**Cable de cobre para pararrayos**

| Código  | Designación<br>(mm <sup>2</sup> ) | Clase | Número de alambres<br>(mm) | Díámetro del alambre<br>(mm) | Díámetro total aprox.<br>(mm) | Peso<br>(kg/km) |
|---------|-----------------------------------|-------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------|
| 1812814 | 58                                | I     | 28                         | 1.62                         | 13.5                          | 550             |
| 1813217 | 33                                | II    | 32                         | 1.14                         | 10.1                          | 313             |

**Nota.** Se presenta la ficha técnica e imagen del cable de cobre seleccionado para el pararrayos. Tomado de: “Cable de cobre para pararrayos”. ARGOS. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://argoselectrica.com/fichastecnicas/conductores/cable-de-cobre-para-pararrayos.pdf>

Se selecciona la referencia Clase I dado que dicha clasificación aplica para construcciones con alturas menores a 23 m, según lo sugerido por demás fabricantes y distribuidores de este tipo de cables [50]. En ese sentido, según el estándar para construcciones de conductores americanas tabla de AWG, para una sección real en mm<sup>2</sup> y resistencia del conductor, relacionada en el sitio web del fabricante SAB Bröckskes [42], tomando la referencia 1812814 de 58 mm<sup>2</sup>, se tiene un calibre AWG de 2/0, como lo indica la Figura 31.

**Figura 31.**

*Calibre AWG seleccionado para conductor del pararrayos*

### Construcciones de conductores americanas tabla de AWG

**AWG = sección real en mm<sup>2</sup> y resistencia de conductores**

AWG es el valor exacto en mm<sup>2</sup> + E en mm.

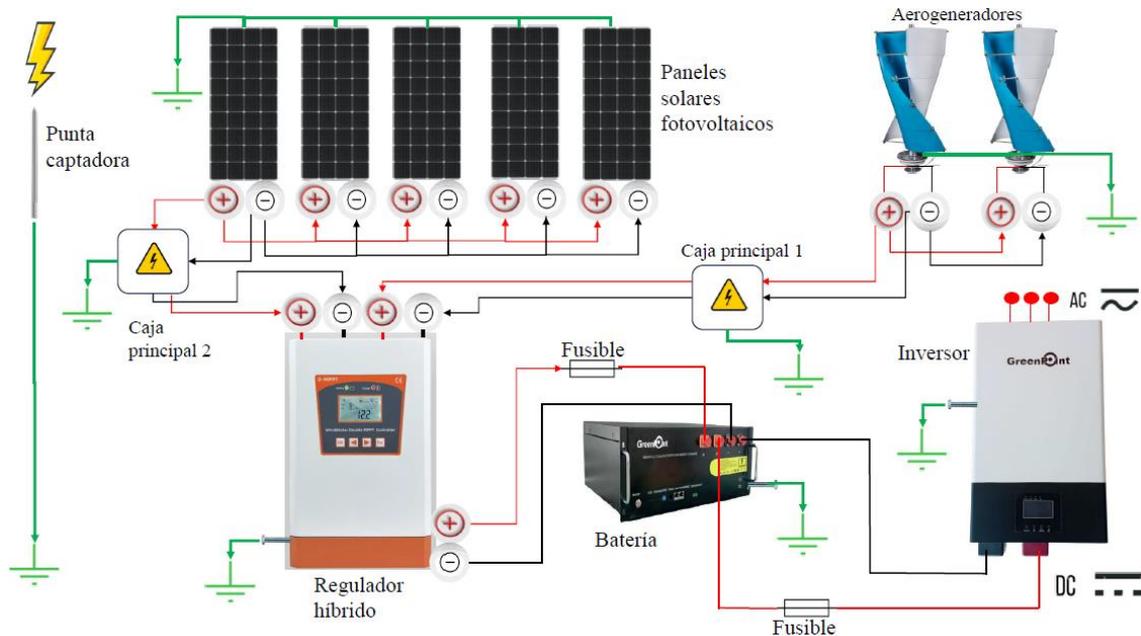
| N° AWG   | Sección del cable mm <sup>2</sup> | Diámetro del cable Ø mm | Resistencia cond. en Ω/km |
|----------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1000 MCM | 507                               | 29,3                    | 0,036                     |
| 900      | 456                               | 27,8                    | 0,04                      |
| 750      | 380                               | 25,4                    | 0,048                     |
| 600      | 304                               | 22,7                    | 0,061                     |
| 550      | 279                               | 21,7                    | 0,066                     |
| 500      | 253                               | 20,7                    | 0,07                      |
| 450      | 228                               | 19,6                    | 0,08                      |
| 400      | 203                               | 18,5                    | 0,09                      |
| 350      | 177                               | 17,3                    | 0,10                      |
| 300      | 152                               | 16,0                    | 0,12                      |
| 250      | 127                               | 14,6                    | 0,14                      |
| 4/0      | 107,2                             | 11,68                   | 0,18                      |
| 3/0      | 85,0                              | 10,40                   | 0,23                      |
| 2/0      | 67,4                              | 9,27                    | 0,29                      |
| 0        | 53,4                              | 8,25                    | 0,37                      |

**Nota.** Se observan dimensiones y propiedades para el calibre seleccionado del conductor del pararrayos. Tomado de: “Construcciones de conductores americanas”. SAB Bröckskes. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible:<https://www.sab-cables.eu/productos/datos-tecnicos/cables-electricos/construccionesdevenasamericanas.html>

Finalmente, el sistema de puesta a tierra se compone de 2 varillas Copperweld, como electrodos a tierra, enterradas a 3 metros de distancia de la instalación, por recomendación de expertos en el área; por un lado, a 1 electrodo le corresponde la tierra común o el punto en el que confluyen las puestas a tierra de cada uno de los elementos de la microrred (paneles solares, aerogeneradores, regulador, batería, inversor). Por otro lado, el segundo electrodo independiente corresponde al sistema de pararrayos conectado a través del conductor bajante. Bajo la Resolución 180398 de 2004 del Ministerio de Minas y Energía, la cual expide el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE [51], se indica que el electrodo tipo varilla o tubo debe tener mínimo 2,4 metros de longitud. Además, la Resolución indica la correcta instalación del sistema de puesta a tierra. La Figura 32 indica el diagrama que representa las conexiones eléctricas de la microrred propuesta con sus respectivos elementos de protección para tensiones de paso, de contacto y transferidas.

**Figura 32.**

*Representación esquemática de conexiones eléctricas de la microrred diseñada.*

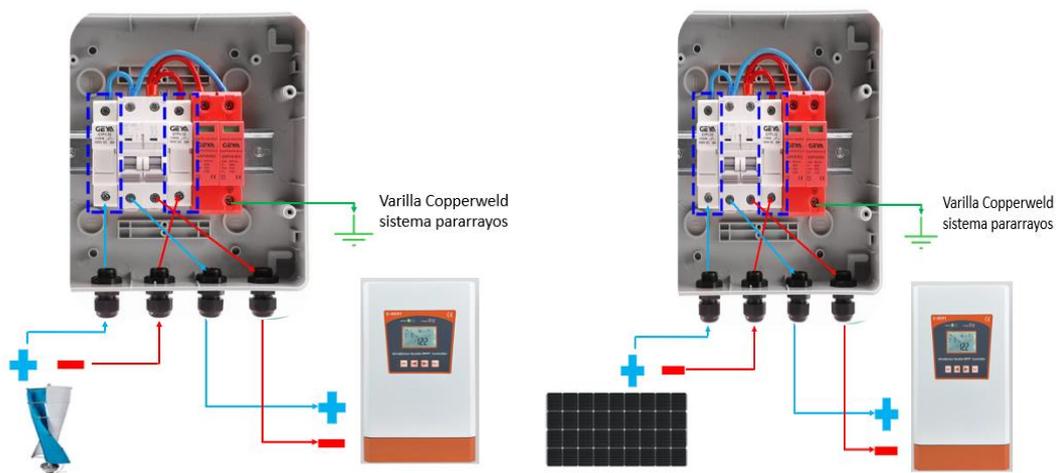


**Nota.** Se ilustra las conexiones eléctricas de la microrred diseñada.

La Figura 33 presenta el detalle de las conexiones de las cajas principales 1 y 2, basado en la conexión sugerida por el fabricante GEYA [36].

**Figura 33.**

*Conexiones caja principal de protección 1 (izquierda) y 2 (derecha)*



**Nota.** Representación de las conexiones de las cajas principales de protección.

### 3.2. Selección del tráiler

En esta sección, se describe la metodología utilizada para seleccionar el tráiler de carga que soporta la microrred propuesta. La selección se basó en dos criterios: la distribución preliminar

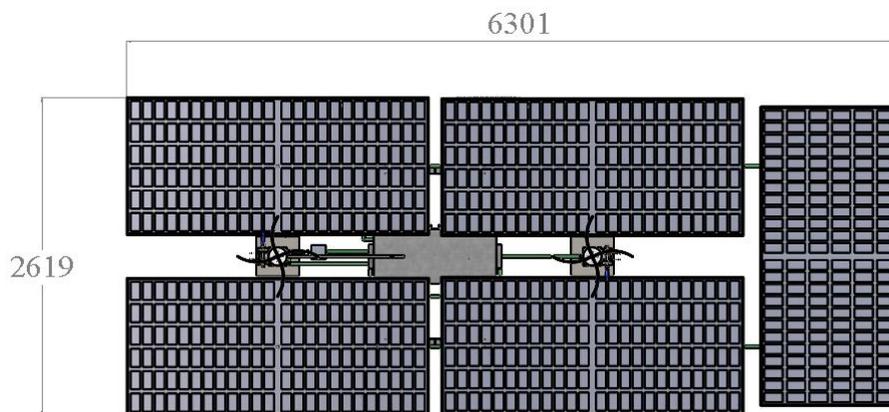
de los componentes de la microrred y una revisión de las dimensiones de los trailers disponibles comercialmente. Además, se calculó el peso total de los componentes y se contrastó dicho valor con la capacidad de carga del tráiler seleccionado preliminarmente, según las fichas técnicas de cada componente.

### 3.2.1. Distribución espacial preliminar de la microrred

En la Figura 34 se puede observar la distribución preliminar de la microrred propuesta con sus respectivas dimensiones según las fichas técnicas de cada componente; se indican dimensiones de 6,301 m de largo y 2,619 m de ancho para un área aproximada de 17 m<sup>2</sup>.

**Figura 34.**

*Distribución espacial preliminar de la microrred propuesta*



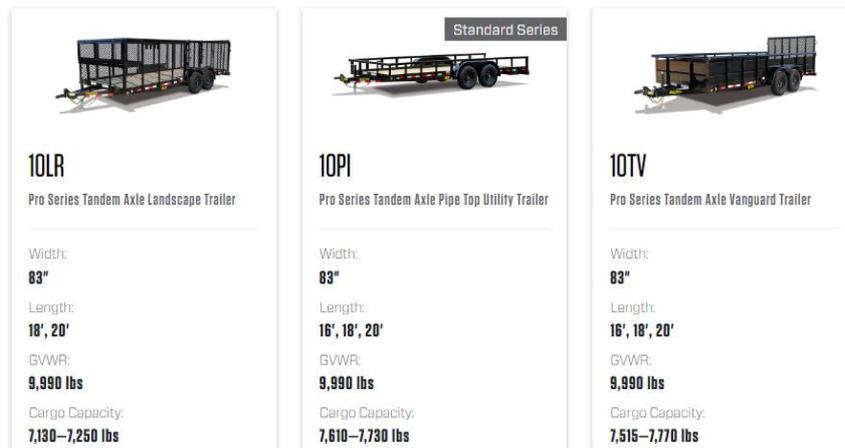
**Nota.** En la imagen se observa una vista de planta de la distribución de la microrred propuesta con dimensiones en milímetros y diseñada en el software SOLIDWORKS®.

### 3.2.2. Dimensiones del tráiler

Se consultó el sitio web del fabricante BigTex trailers para examinar los modelos estándar de *utility trailer*. Los 3 modelos presentados en la Figura 35 presentan dimensiones de 2 m de ancho y 4,9 - 6 m de largo, en consecuencia, son áreas de 9,8 m<sup>2</sup> a 12 m<sup>2</sup>. Se selecciona el modelo *10PI Pro Series Tandem Axle Pipe Top Utility Trailer* debido a que su estructura lateral permite el giro libre de los paneles al inclinarse verticalmente para efectos de transporte. Adicionalmente, cabe resaltar que el tráiler seleccionado cuenta con suspensión de múltiples hojas con ecualizador [52]. La Figura 36 presenta la microrred instalada en un tráiler cuyo diseño está basado e inspirado en el tráiler seleccionado [53].

**Figura 35.**

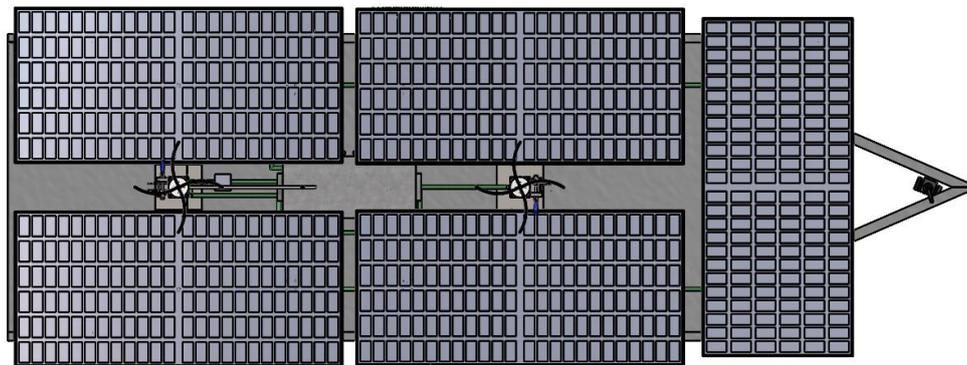
*Modelos Pro de utility trailer*



**Nota.** Se observan los modelos Pro de utility tráiler del fabricante BigTex. Tomado de: “FEATURED 2021 BIG TEX 10PI 20' - 6181”. Silverline Trailers. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.silverlinetrailer.com/inventory/2021-big-tex-10pi-20-6181/>

**Figura 36.**

*Microrred propuesta distribuida en el tráiler seleccionado*



**Nota.** En la imagen se observa una vista de planta de la microrred propuesta acoplada sobre el tráiler seleccionado, se simuló en el software SOLIDWORKS®.

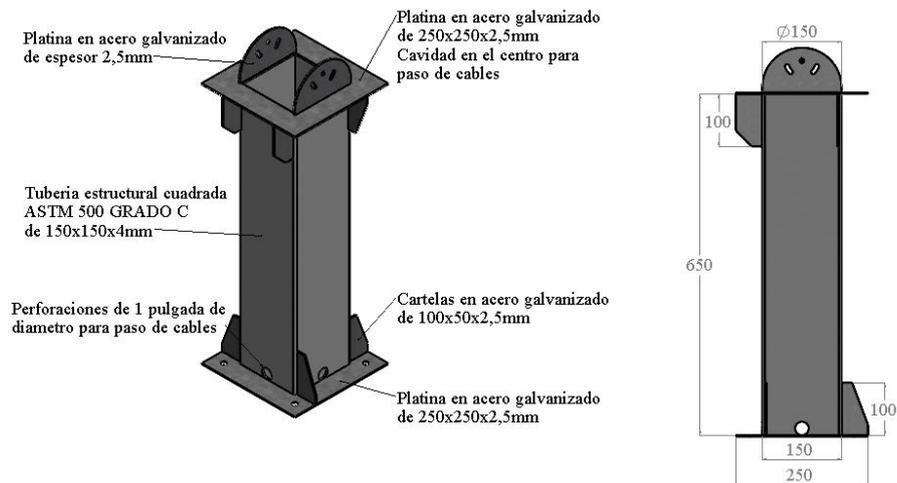
### **3.2.3. Peso y distribución de los componentes de la microrred en el tráiler**

Complementando lo anteriormente expuesto, como parte de la microrred, se definen los componentes de soporte o estructuras para los paneles solares y las turbinas eólicas. Para los paneles, se propone una platina en acero galvanizado de 2,5 mm de espesor y 250 x 250 mm como base del soporte de los paneles, con tubo estructural ASTM 500 GRADO C [54], soldado de perfil cuadrado de 150 x 150 mm de 4 mm de espesor. Los soportes cuentan con un sistema de graduación semicircular con ranuras para soportar y permitir el giro del arreglo de paneles,

fijando la inclinación para generación de energía (14°) o para transporte (90°); las bases de los soportes pesan 15 Kg cada una y se pueden observar a detalle constructivo en la Figura 37, con dimensiones en milímetros. Además, este sistema se suplementa con una pieza para permitir la graduación de la misma, se puede observar en la Figura 38.

**Figura 37.**

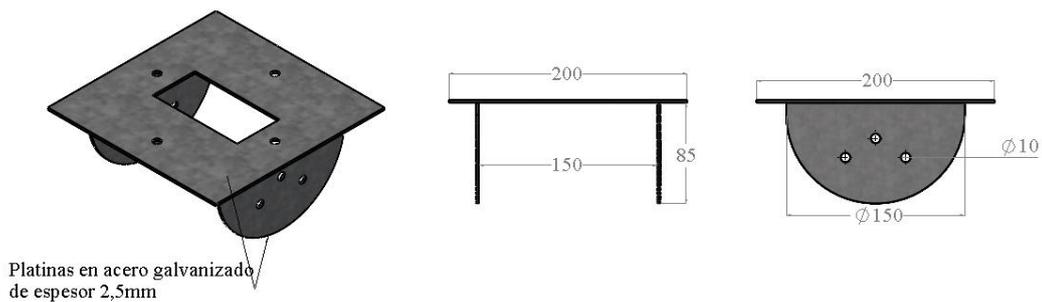
*Base del soporte de los paneles solares*



**Nota.** En la imagen se observa una vista isométrica (izquierda) y lateral (derecha) de la base del soporte de los paneles solares, se describen los componentes constructivos y sus dimensiones en milímetros, modelado en el software SOLIDWORKS®.

**Figura 38.**

*Pieza complementaria para inclinación del soporte*



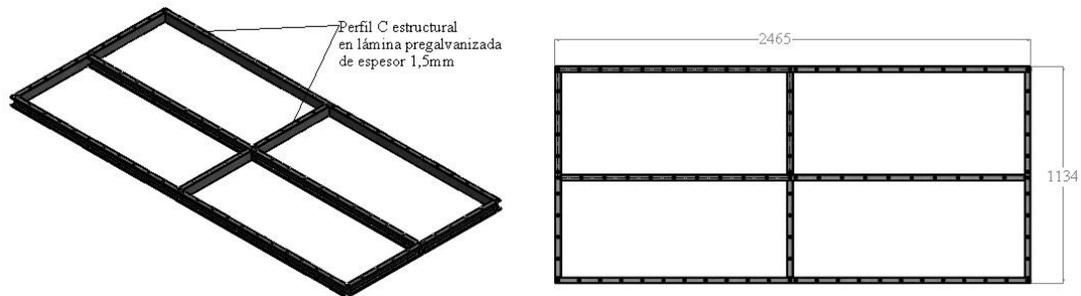
**Nota.** En la imagen se observa una vista isométrica (izquierda), frontal y lateral (derecha) de la pieza complementaria de la base para la inclinación de los paneles solares, con dimensiones en milímetros, modelado en el software SOLIDWORKS®.

Se propone el soporte para cada panel en perfil C estructural, en lámina pregalvanizada de espesor 1,5mm [55], con un peso de 16 kg. Este soporte se presenta en la Figura 39, con

dimensiones en milímetros. Adicionalmente, se puede observar en la Figura 40 la vista explosionada del soporte para cada panel solar.

**Figura 39.**

*Soporte para cada panel solar*



**Nota.** En la imagen se observa una vista isométrica (izquierda) y de planta (derecha), de la pieza para soportar y sujetar cada panel solar, con dimensiones en milímetros y modelado en el software SOLIDWORKS®.

**Figura 40.**

*Vista explosionada del soporte para cada panel solar*



**Nota.** Se observa una vista isométrica explosionada del montaje, con sus respectivas piezas modeladas en el software SOLIDWORKS®.

Por otro lado, se seleccionaron mástiles telescópicos para soportar las turbinas eólicas, los cuales pueden elongarse para izar las turbinas y generar energía, o bien retraerse para facilitar el transporte; esto mediante un cabrestante mecánico, cuyo mecanismo utiliza un cable de acero que se enrolla manualmente mediante una palanca y una polea, logrando elevar o contraer las secciones; este sistema hace parte del mástil y facilita la tracción o elevación del mismo. Estos mástiles telescópicos se seleccionaron cumpliendo 2 criterios: el primero fue la altura máxima de elongación de 10 metros, guardando coherencia con el registro eólico que se tiene en la isla para la velocidad de viento evaluada. El segundo fue la máxima carga o peso que puede soportar en un izaje cada mástil. Se seleccionó el modelo relacionado en la Figura 41.

**Figura 41.**

*Ficha técnica del soporte telescópico para las turbinas eólicas*

|  |           |
|--|-----------|
| Cabestrante Manual con autobloqueo [Lbs] | 1200/1800 |
| Cable espiral [m]                        | 9         |
| Velocidad nominal del viento [kph]       | 120       |
| Tamaño del tubo superior [mm]            | 60 x 60   |
| Tamaño del segundo tubo [mm]             | 80 x 80   |
| Tamaño del tercer tubo [mm]              | 100 x 100 |
| Tamaño del cuarto tubo [mm]              | 120 x 120 |
| Tamaño del tubo base [mm]                | 140 x 140 |
| Altura de cada sección [mm]              | 2000      |
| Numero de secciones                      | 5         |
| Altura extendida [m]                     | 9         |
| Altura retraída [m]                      | 2,24      |
| Maxima carga [kg]                        | 50        |
| Peso [kg]                                | 121       |



**Nota.** Se presenta la ficha técnica e imagen del mástil telescópico seleccionado para izar la turbina eólica a 10 metros de altura. Modificado de: “Telescopic Mast Pole”. OkSolar.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.oksolar.com/lion/Item/8088/telescopic-mast-pole>

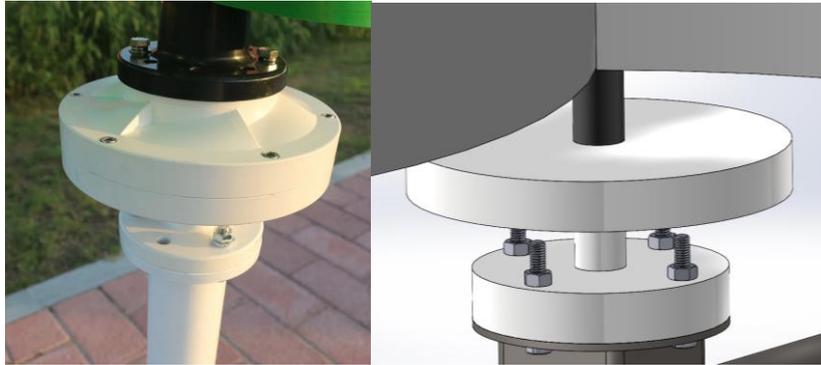
Se seleccionó este modelo porque cuenta con 5 secciones de 2 metros cada una, para lograr una altura extendida de 9 metros, lo cual es coherente con la altura a la cual se tienen los registros de velocidad de viento en la isla; además, tiene una capacidad de carga máxima de 50 Kg, para una turbina eólica como la seleccionada que pesa 40 Kg, según ficha técnica (Ver Tabla 8). Por otro lado, para el transporte de la microrred, se propone desinstalar las turbinas de los mástiles, y de esta manera, se cuenta con una altura de 2,24 metros, medida desde el espacio de carga del tráiler hasta la altura del mástil plegado o contraído.

La desinstalación de las turbinas se puede realizar con dos personas debido al peso del componente y se realiza desatornillando el soporte de fijación. En la Figura 42 se puede observar la instalación comercial [28] y el ensamble simulado en el software SolidWorks. En conjunto con el tráiler seleccionado, para el transporte de la microrred se tiene una altura desde el terreno hasta la altura del mástil plegado o contraído de 2,9 m, un ancho de 2,6 m y una longitud de 7,3 m; estas dimensiones se pueden apreciar en la Figura 47. La altura de la microrred para efectos de transporte (2,9 m) cumple con la altura máxima de 4,2 m para un remolque o tráiler que circule por el territorio nacional, según la norma 1015 del Ministerio de Transporte [57]. Por otro lado, respecto a la interferencia de las líneas de tensión aéreas con la altura de carga de la microrred en transporte, se cumple el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), para distancias mínimas de seguridad en diferentes lugares y situaciones, indica: “la distancia mínima al suelo en cruces con carreteras, calles, callejones, zonas peatonales, áreas sujetas a tráfico vehicular debe estar entre 5 y 8,6 metros para tensiones nominales entre fases de 1 y 500 kV” [51]. Adicionalmente, respecto a la interferencia con

estructuras de paso vehicular, se cumple la norma colombiana de diseño de puentes CCP14, en la sección 2, especifica que el gálibo vertical de las estructuras sobre carreteras debe tener una altura libre mínima de 5 metros [58].

**Figura 42.**

*Fijación de la turbina al mástil telescópico*

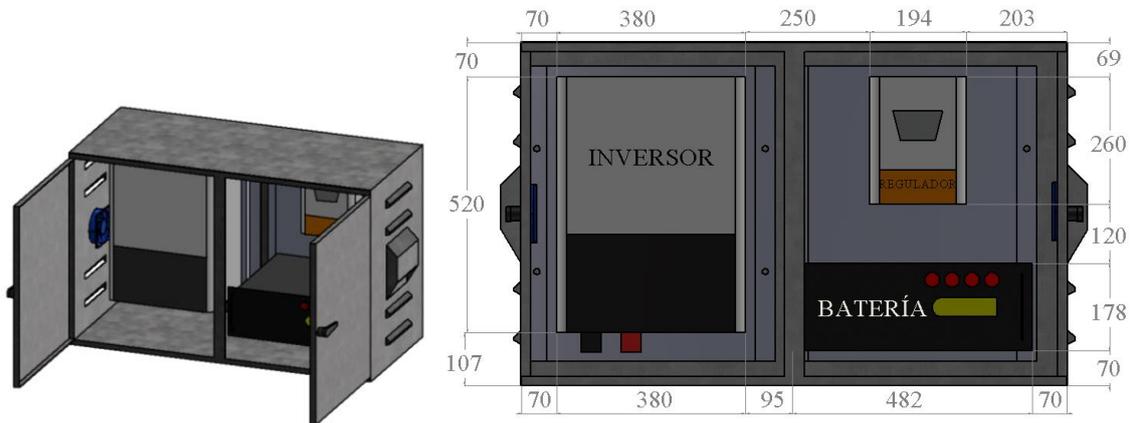


**Nota.** En la imagen se presenta la pieza de fijación original de la turbina (izquierda) y la pieza ajustada al mástil modelada en SolidWorks (derecha). Tomado de: “Turbina eólica Vertical para el hogar, molino de viento de bajo ruido de 4000W, 6000W, 10000W, 20000W, CA trifásica, 10kW, 12V, 24V, 48V, 96V, 2kW”. aliexpress.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/WpuFhD>

Para almacenar el inversor, regulador y batería, se propone utilizar un cofre tipo intemperie en lámina galvanizada calibre 16 con un grado de protección IP44, de 1.100 mm de ancho, con una altura de 700 mm y un largo de 500 mm. Este cofre tipo gabinete cuenta con dos ventiladores de 24 V alimentados por el regulador híbrido, un ventilador para permitir el ingreso de aire y el otro para permitir la salida del mismo dentro del cofre; de esta manera se logra un flujo continuo de aire dentro del cofre. Estos ventiladores cuentan con unas celosías para impedir el paso de agua, además de los ventiladores, cuenta con 4 celosías a cada costado lateral, para disipar el calor. El cofre consta de doble fondo, el cual se fija al cofre mediante cuatro tornillos en sus laterales; este permite realizar perforaciones sin afectar el cofre y permite fijar los componentes ya que estos cuentan con agujeros para su fijación; además, dos puertas abisagradas con sellantes en poliuretano y chapa. En la Figura 43 se puede observar la distribución representada, a través del software SolidWorks, de los componentes al interior del cofre, en donde se mantiene una distancia apropiada entre cada componente y entre las paredes del cofre, para asegurar espacios de circulación del aire, según recomendación de expertos en el área.

**Figura 43.**

*Distribución del inversor, regulador y batería en el cofre*



**Nota.** Se observa una vista isométrica (izquierda) y frontal del cofre (derecha) con la distribución de la batería, inversor y regulador al interior, las dimensiones están en milímetros y se realizó el diseño en el software SOLIDWORKS®.

A continuación, se presenta en la Tabla 12 un reporte del peso de cada componente y peso total de la microrred tomados de las fichas técnicas de cada componente en cuestión.

**Tabla 12.**

*Reporte de peso total de la microrred*

| Componente                                      | Cantidad | Peso unitario (Kg) | Peso total (Kg) |
|---|----------|--------------------|-----------------|
| Panel Solar                                     | 5        | 30.5               | 152.5           |
| Turbina Eolica                                  | 2        | 40                 | 80              |
| Bateria   | 1        | 45                 | 45              |
| Regulador                                       | 1        | 4.25               | 4.25            |
| Inversor  | 1        | 16                 | 16              |
| Mastil de carga Turbina Eolica                  | 2        | 121                | 242             |
| Elementos de soporte paneles solares            | 5        | 42                 | 210             |
| Cofre almacenamiento regulador-inversor-bateria | 1        | 34                 | 34              |
| <b>Peso total microrred (Kg)</b>                |          |                    | <b>783.75</b>   |

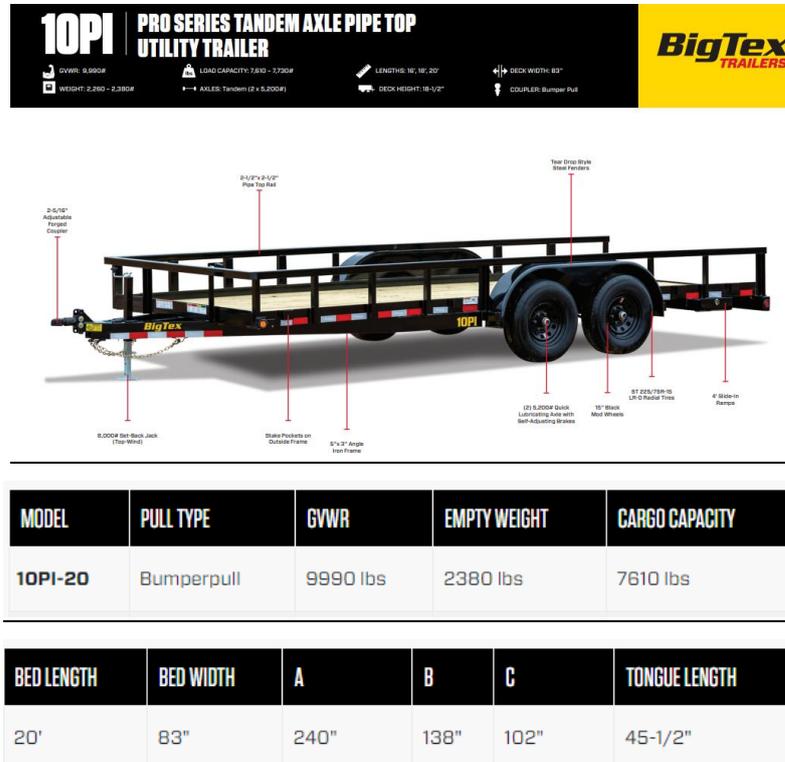
**Nota.** En la tabla se presenta el peso de cada componente de la microrred y peso total que soportará el tráiler.

Se observa que los componentes de la microrred pesan en total 783,75 Kg, por lo cual el tráiler seleccionado *10PI Pro Series Tandem Axle Pipe Top Utility Trailer* [53], soporta dicho peso satisfactoriamente; ya que este modelo cuenta con una capacidad de carga de 7610 libras o

3451,8 Kg. En síntesis, la Figura 44 presenta la ficha técnica del modelo de tráiler seleccionado a mayor detalle [53].

**Figura 44.**

*10PI Pro Series Tandem Axle Pipe Top Utility Trailer*



**Nota.** Se presenta la ficha técnica del tráiler seleccionado. Tomado de: “Utility & Landscape Trailers - Big Tex Trailers”. Big Tex Trailers. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.bigtextrailers.com/trailers/utility-landscape-trailers/>

Adicionalmente, la Figura 45 presenta la ubicación en el tráiler de las cajas de protección de los tramos entre los paneles solares y aerogeneradores con el regulador híbrido.

**Figura 45.**

*Ubicación de las cajas de protección en el tráiler*

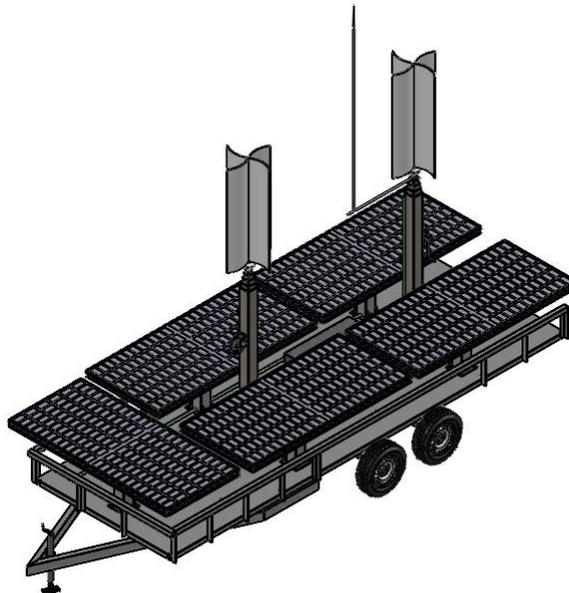


**Nota.** Se observa la ubicación de las cajas de protección en los tramos de paneles solares y aerogeneradores con el regulador híbrido, diseñado en el software SOLIDWORKS®.

De esa forma, se puede visualizar en las Figura 46 y Figura 47, la distribución definitiva de la microrred propuesta en el tráiler seleccionado, a través de un Diseño Asistido por Computadora (CAD).

**Figura 46.**

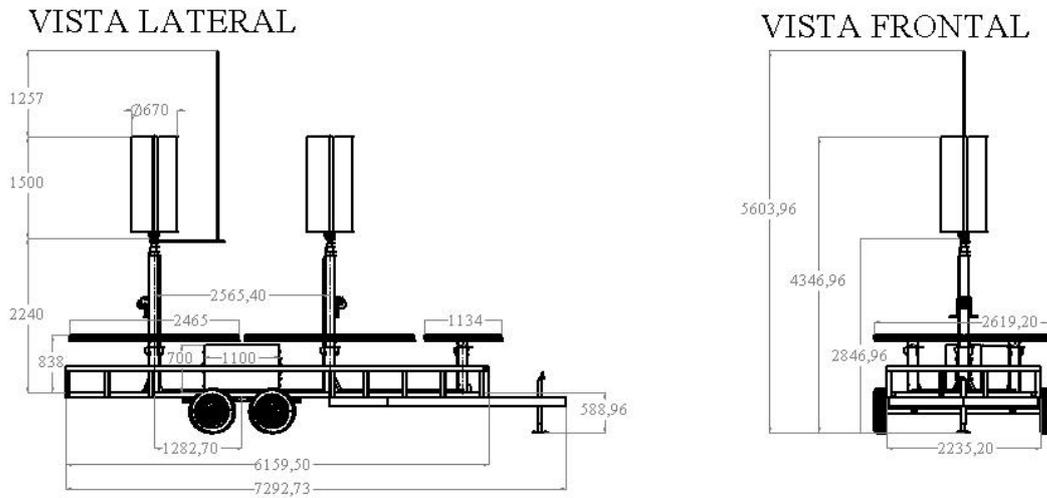
*Montaje de la microrred en el tráiler propuesto*



**Nota.** Se observa en una vista isométrica la representación de la microrred propuesta soportada en el tráiler modelado en el software SOLIDWORKS®.

**Figura 47.**

*Dimensiones de la microrred*

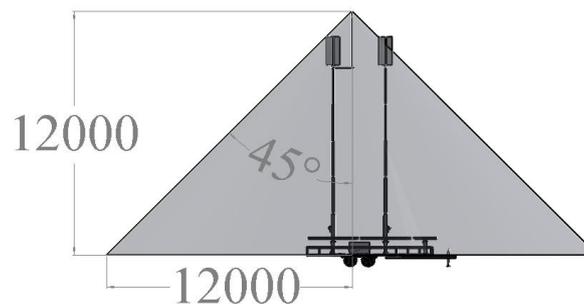


**Nota.** Se aprecia en una vista lateral y frontal las dimensiones en milímetros de la microrred propuesta soportada en el tráiler, modelado en el software SOLIDWORKS®.

Retomando la validación del campo de protección contra descargas atmosféricas, se evidencia en la Figura 48 y Figura 49, que el sistema propuesto cubre y protege la microrred planteada con una altura tráiler-punta captadora de 12 m, un radio de 12 m y un ángulo de protección de 45°.

**Figura 48.**

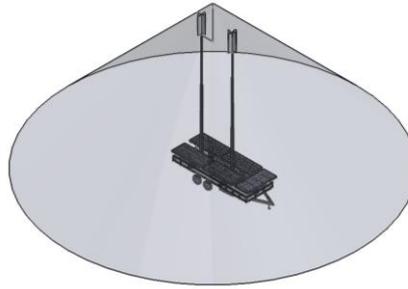
*Ángulo, radio y altura de cono de protección pararrayos*



**Nota.** Se presenta una vista lateral con la representación de la microrred y las turbinas izadas en su máxima altura, observando el espacio de protección del pararrayos, las dimensiones están en milímetros y modelado en el software SOLIDWORKS®.

**Figura 49.**

*Campo de protección contra descargas atmosféricas*



**Nota.** Se presenta una vista isométrica de la microrred propuesta en el tráiler, observando el campo de protección contra descargas atmosféricas, diseñado en el software SOLIDWORKS®.

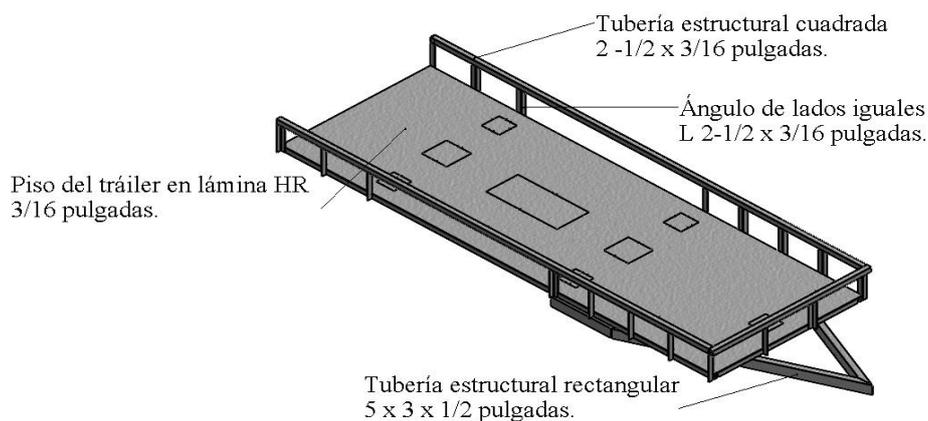
### **3.3. Resultados de la simulación estática de cargas usando el Método de Elementos Finitos (FEM)**

#### **3.3.1. Modelamiento del chasis del tráiler**

La estructura del chasis está conformada por las piezas relacionadas en la Figura 50 y configurada en el software SOLIDWORKS para un acero estructural ASTM 500 GRADO C [54]. Es importante definir las geometrías de las piezas dado que son el punto de partida de la simulación. Se siguió como guía la ficha técnica del tráiler seleccionado y se diseñaron las piezas y conjuntos estructurales en el software, a similitud del mencionado modelo; esto debido a que el fabricante, por razones de confidencialidad, no revela dicha información [53].

**Figura 50.**

*Perfiles estructurales que conforman el chasis del tráiler*



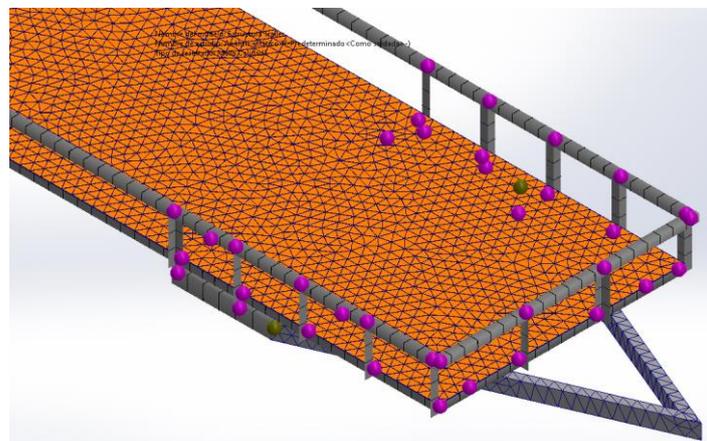
**Nota.** En la imagen se observa una vista isométrica de la representación del chasis del tráiler seleccionado, con los perfiles estructurales que lo conforman modelados en el software SOLIDWORKS®.

### 3.3.2. Mallado de la estructura

Posteriormente, con apoyo del software Solidworks, se generó la malla de simulación, tomando como parámetro de mallado la curvatura de combinado. Dicho parámetro es una técnica utilizada por el software para generar mallas por el Método de Elementos Finitos (FEM); ésta identifica la curvatura de la geometría para determinar el tamaño de los elementos, los cuales son de menor tamaño en áreas con alta curvatura y de mayor tamaño en áreas con baja curvatura [59]. Lo anterior se traduce en una mayor resolución en áreas de altas curvaturas, donde eventualmente pueden presentarse mayor concentración de esfuerzos; gracias a esta técnica, se aumenta la precisión y la eficiencia del análisis en el mallado. En la Figura 51, se observa la malla aplicada en el software sobre la estructura del chasis del tráiler.

**Figura 51.**

*Mallado de la estructura del chasis*



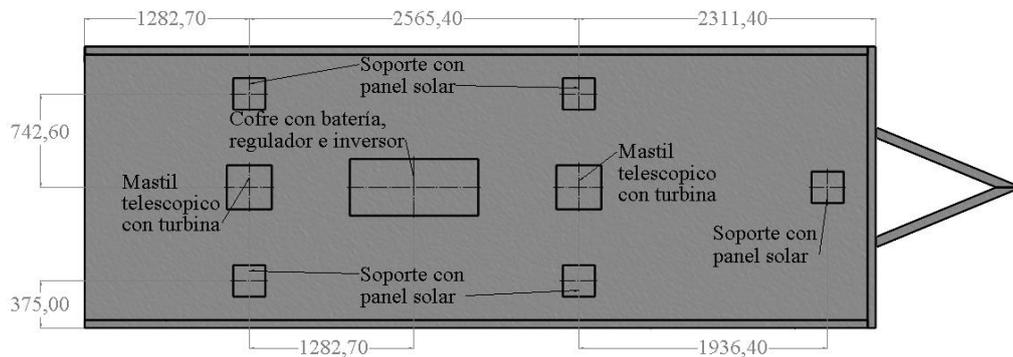
**Nota.** Se observa la representación del mallado del chasis del tráiler simulado en SOLIDWORKS®.

### 3.3.3. Distribución de cargas en el tráiler

Por otro lado, un parámetro de entrada para la simulación es definir el tipo de carga estudiada, junto con los vectores respectivos de cada componente que conforma la microrred y su respectiva distribución en el tráiler, la cual se puede observar en la Figura 52. Se definieron cargas distribuidas sobre las áreas de las bases de cada componente, como se observa en la Figura 53.

**Figura 52.**

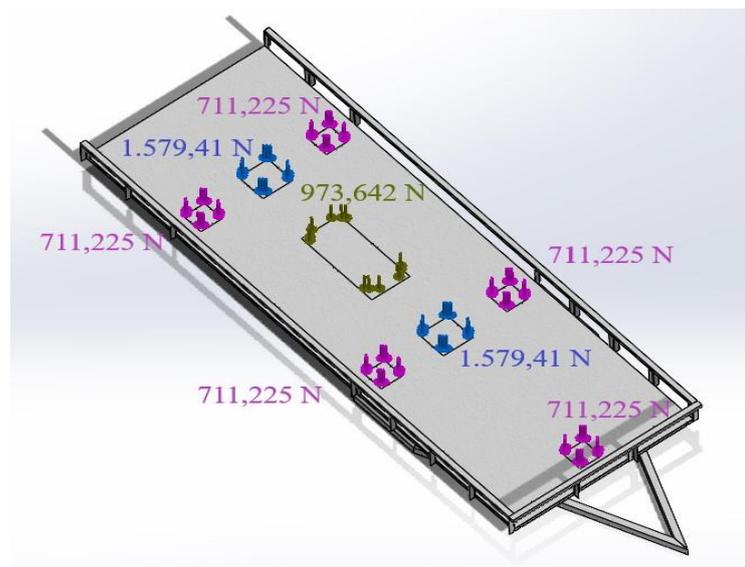
*Distribución de los componentes de la microrred en el tráiler*



**Nota.** Se observa una vista de planta con la distribución de los componentes de la microrred propuesta sobre el tráiler seleccionado, dimensiones en milímetros y simulado en SOLIDWORKS®.

**Figura 53.**

*Fuerzas distribuidas de los componentes de la microrred*



**Nota.** Se presenta una vista isométrica de la representación del chasis del tráiler con las fuerzas ejercidas por cada componente sobre el tráiler, simulado en SOLIDWORKS®.

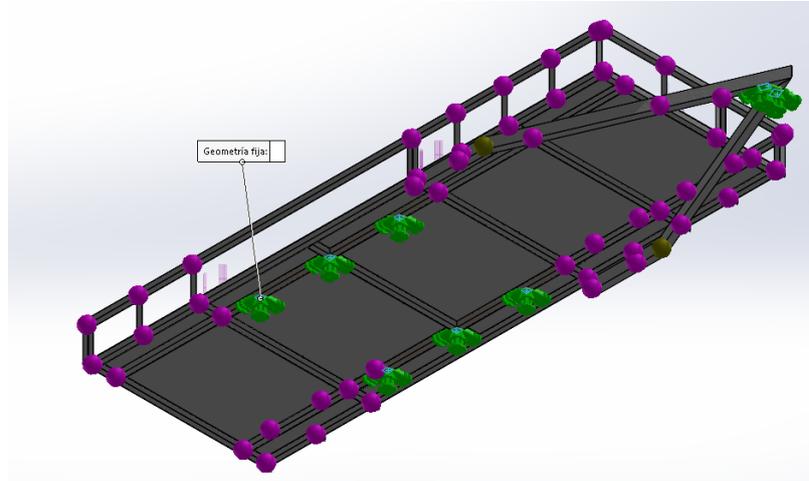
### **3.3.4. Condiciones de contorno**

Una vez definidas las cargas, se procedió a definir las restricciones o condiciones de contorno; para ello, se tiene en cuenta que los únicos elementos en el chasis que tienen restricción en todos los grados de libertad, son los apoyos sobre los que reposa la estructura, es decir, sobre la amortiguación en la parte trasera y en el cabezote en la parte delantera. La ubicación de estas restricciones se asimiló a la información que se logró recolectar de la ficha técnica del tráiler.

Basado en dichas condiciones, se definen sujeciones con geometría fija en los apoyos de la estructura, como se observa en la Figura 54.

**Figura 54.**

*Condiciones de contorno definidas en la estructura*



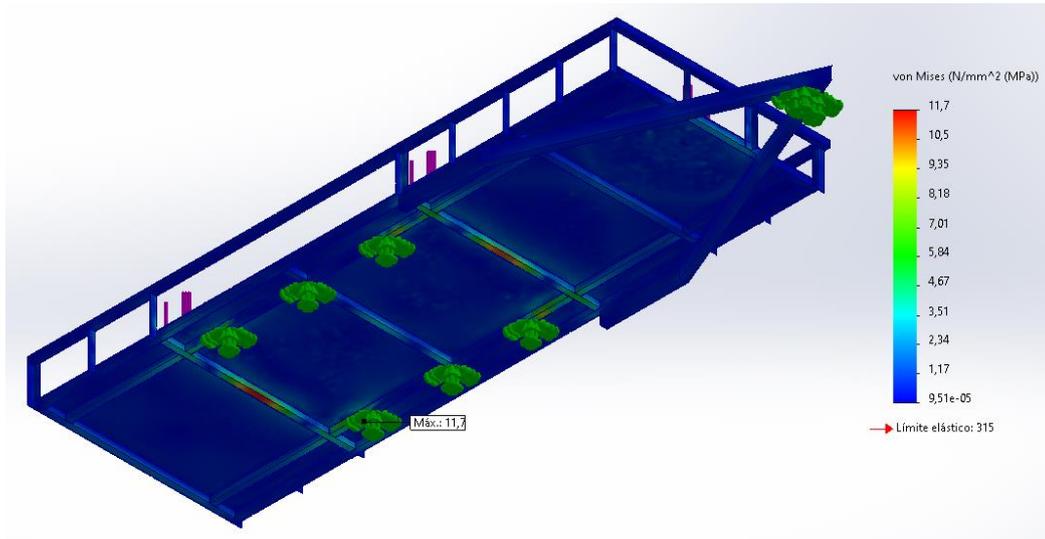
**Nota.** Se presentan los puntos definidos con geometría fija en la representación del chasis del tráiler simulado en SOLIDWORKS®.

### ***3.3.5. Análisis de resultados de la simulación***

Finalmente, el análisis de resultados obtenidos de tensiones o esfuerzo, presenta el esfuerzo de Von Mises, como se puede apreciar en la Figura 55; y se evidencia la ubicación en el tráiler del punto de mayor concentración de esfuerzos, con un valor de 11,7 MPa. Dado que este esfuerzo es menor al límite elástico del material ASTM 500 GRADO C (315 MPa), el tráiler simulado se encuentra en un estado de esfuerzos seguro para la integridad del mismo bajo las condiciones de carga estática definidas anteriormente. Es decir, la estructura no se deforma de manera permanente y no se presenta un evento de falla.

**Figura 55.**

*Esfuerzo de Von Mises en la estructura del tráiler*

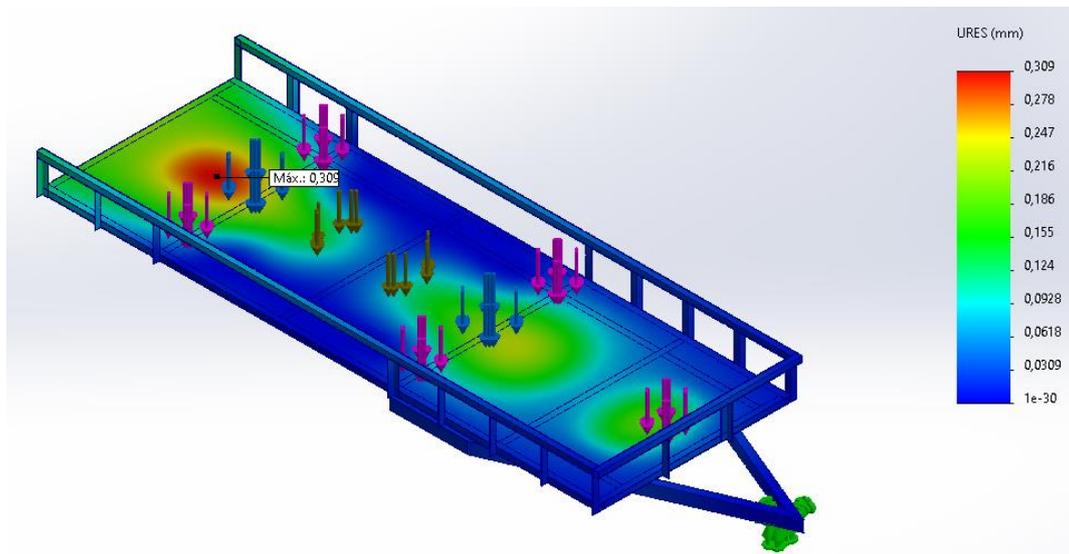


**Nota.** Se presentan los resultados de la simulación en SOLIDWORKS®, para el esfuerzo de Von Mises.

Otro aspecto a considerar es el valor del Desplazamiento Estático Máximo (URES), con un valor máximo de 0,309 mm como se puede visualizar en la Figura 56. La ubicación del tráiler en la cual se presenta dicha deformación, no representa un inconveniente en términos de interferencia entre la lámina del espacio de carga y la suspensión.

**Figura 56.**

*Desplazamiento Estático Máximo (URES) en la estructura del tráiler*



**Nota.** Se presentan los resultados de la simulación en SOLIDWORKS®, para URES.

### 3.4. Reporte de costos de la microrred y tráiler

A continuación, la Tabla 13 presenta un resumen de los costos unitarios y totales de la microrred solar-eólica propuesta soportada en un tráiler comercial.

**Tabla 13.**

*Reporte de costos*

| COSTOS  |            |                      |                         |                  |
|---|------------|----------------------|-------------------------|------------------|
| Componente                                      | Cantidad   | Costo unitario (COP) | Costo total (COP)       | Referencia       |
| Panel Solar                                     | 5          | \$ 760,000.00        | \$ 3,800,000.00         | Tomado de [60]   |
| Turbina Eolica                                  | 2          | \$ 2,435,560.00      | \$ 4,871,120.00         | Tomado de [28]   |
| Bateria   | 1          | \$ 8,750,000.00      | \$ 8,750,000.00         | Tomado de [29]   |
| Regulador                                       | 1          | \$ 808,640.00        | \$ 808,640.00           | Tomado de [30]   |
| Inversor  | 1          | \$ 3,690,000.00      | \$ 3,690,000.00         | Tomado de [31]   |
| Fusible   | 6          | \$ 481,486.00        | \$ 2,888,916.00         | Tomado de [61]   |
| Cable conductor AWG 11 (costo por metro)        | 4,7 metros | \$ 12,000.00         | \$ 56,400.00            | Tomado de [62]   |
| Cable conductor AWG 17 (costo por metro)        | 2,4 metros | \$ 23,572.00         | \$ 56,573.00            | Tomado de [63]   |
| Cable conductor AWG 8 (costo por metro)         | 2 metros   | \$ 16,853.00         | \$ 33,706.00            | Tomado de [64]   |
| Cable conductor AWG 2/0 (costo por metro)       | 18 metros  | \$ 57,500.00         | \$ 1,035,000.00         | Tomado de [65]   |
| Estructura soporte pararrayos                   | 6 metros   | \$ 2,465.00          | \$ 14,792.00            | Tomado de [66]   |
| Punta captadora                                 | 1          | \$ 85,425.00         | \$ 85,425.00            | Tomado de [67]   |
| Cofre almacenamiento regulador-inversor-bateria | 1          | \$ 776,555.00        | \$ 776,555.00           | Cotización local |
| Caja principal de protección                    | 2          | \$ 493,161.00        | \$ 986,322.00           | Tomado de [36]   |
| Breaker 100 A                                   | 1          | \$ 12,087.00         | \$ 12,087.00            | Tomado de [37]   |
| Breaker 40 A                                    | 1          | \$ 6,608.00          | \$ 6,608.00             | Tomado de [39]   |
| Portafusible tipo cuchilla                      | 4          | \$ 79,548.00         | \$ 318,192.00           | Tomado de [35]   |
| Mastil de carga Turbina Eolica                  | 2          | \$ 2,170,731.00      | \$ 4,341,462.00         | Tomado de [68]   |
| Estructura para sostener arreglo de paneles     | 5          | \$ 1,282,000.00      | \$ 6,410,000.00         | Cotización local |
| Trailer   | 1          | \$ 22,445,081.00     | \$ 22,445,081.00        | Tomado de [48]   |
| <b>TOTAL</b>                                    |            |                      | <b>\$ 61,386,879.00</b> |                  |

**Nota.** Se presentan los costos de la microrred y tráiler propuestos.

De la Tabla 13, se relacionan las siguientes consideraciones:

Los costos consultados en la moneda dólar estadounidense (USD) y Euro (EUR) fueron convertidos a la moneda pesos colombianos (COP), según la tasa de cambio entre dichas monedas consultada el día 20 de octubre de 2023 (1 USD = 4238,92 COP) [69], y del día 4 de febrero de 2024 (1 EUR=4231,30 COP) [70].

La Tabla 13 representa únicamente un reporte estimativo del costo del proyecto, el cual requeriría de subsidios del Estado para eventualmente implementarse en la isla; inicialmente, como un proyecto piloto que ofrezca una alternativa de acceso a energía eléctrica en la zona. Adicionalmente, el alcance de este proyecto no involucró un análisis de viabilidad económica para determinar si una familia promedio en la isla estaría en la capacidad de adquirir la microrred propuesta.

Para determinar la longitud del tramo de cable para la conexión de los componentes de la microrred (AWG 8,11,17), se tomó el valor de dos (2) veces la longitud de conductor ingresada a la Ecuación 39, dado que se requieren 2 cables conductores (positivo y negativo).

Para determinar la longitud del tramo de cable conductor bajante para la conexión de puesta a tierra (AWG 2/0), se tomó el recorrido que dicho cable recorre desde la punta captadora, estructura soporte en “L”, mástil telescópico, tráiler y distancia de seguridad de 3 metros desde el tráiler hasta llegar a la varilla Copperweld.

#### **4. Conclusiones**

La microrred propuesta aporta a la autonomía y sostenibilidad energética de la isla de Providencia, caracterizada como una Zona No Interconectada; lo anterior se debe a que el sistema diseñado está en la capacidad técnica de abastecer totalmente de energía eléctrica una vivienda de la Isla, partiendo de una demanda promedio por hogar de 19,07 kWh/día [18] y una generación solar y eólica instalada de 25,51 kWh/día; lo anterior calculado a partir de un recurso eólico con velocidades de viento promedio día de 6,95 m/s [14] e irradiancia global promedio día de 4,557 kWh/m<sup>2</sup> [11].

A través de un proceso iterativo, se seleccionó la microrred 5 conformada por paneles solares monocristalinos de 453 W, turbinas eólicas Savonius de eje vertical de 1 kW, batería de ion-litio de 48V y 100Ah de ciclo profundo, regulador de carga híbrido de 4,8 kW y un inversor de 6000W. Gracias a la sobre generación evidenciada entre las 8 y 19 horas, la batería se carga en 4 horas y termina el día con carga de reserva 100% disponible para el siguiente día de operación de la microrred. De esta manera, se puede mantener la operación del sistema para cubrir franjas del día donde no se abastece la demanda, dadas las fluctuaciones naturales de los recursos solar y eólico.

El comportamiento de las curvas de generación solar y eólica durante un día evidencia la complementariedad de estos recursos para producir energía a través de la microrred propuesta; por un lado, los aerogeneradores y paneles solares producen 11,92 y 13,56 kWh/día, respectivamente, lo que indica que ambos recursos tienen un aporte significativo a la generación total de energía de 25,51 kWh/día. Por otro lado, la generación solar tiene un aporte significativo únicamente entre las 8 y 17 horas, mientras que la generación eólica aumenta su productividad en la mañana (0-7 horas) y noche (18-23 horas).

El análisis por el Método de Elementos Finitos permitió evaluar la integridad estructural del tráiler bajo cargas estáticas simuladas como masas distribuidas en el área de contacto de los componentes de la microrred. El esfuerzo de Von Mises, con un valor máximo en la estructura de 11,7 MPa, el cual es inferior al límite elástico de 315 MPa calculado por el software Solidworks para un acero ASTM A500 grado C, confirma que la estructura no presenta un evento de falla bajo las condiciones de carga estática definidas.

Como trabajos futuros, se recomienda estudiar el comportamiento de la curva de carga en la isla de Providencia a lo largo de un año, con el fin de caracterizar las variaciones de la demanda de carga cada mes. Por otro lado, se recomienda evaluar la implementación de sistemas de seguimiento solar en los paneles fotovoltaicos para aumentar la energía diaria producida por los mismos. Finalmente, resultaría muy valioso evaluar la resistencia del tráiler bajo condiciones dinámicas de carga.

## 5. Referencias

- [1] “Complementariedad energética entre las centrales eléctricas renovables de Colombia.” Biblioteca Digital - Universidad ICESI: Página de inicio. Accedido el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: [https://repository.icesi.edu.co/biblioteca\\_digital/handle/10906/87301](https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/handle/10906/87301)
- [2] “Potenciales Energéticos – IPSE-CNM”. IPSE. Accedido el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://ipse.gov.co/cnm/potenciales-energeticos/>
- [3] “Así se energiza San Andrés y Providencia - Energía Limpia para Colombia”. Energía Limpia para Colombia. Accedido el 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://energialimpia.co/asi-se-energiza-san-andres-y-providencia/>
- [4] J. Gómez, J. Afanador, J. Rodríguez. “Hacia la sostenibilidad eléctrica en el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, Colombia: Análisis de alternativas”. Banco Interamericano de Desarrollo. Accedido el 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://publications.iadb.org/es/hacia-la-sostenibilidad-electrica-en-el-archipelago-de-san-andres-providencia-y-santa-catalina>
- [5] M. d. I. A. Pinto Calderón. “Propuesta y evaluación de una microrred para las Islas de Providencia y Santa Catalina, Colombia”. Repositorio Institucional | Universidad Autónoma de Bucaramanga - UNAB. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/1500?show=full>

- [6] D. Aragón, J. Castiblanco. “Estudio de simulación de un sistema de gestión de energía para una micro-red. Caso estudio: Isla de Providencia-Colombia”. Ciencia Unisalle. Accedido el 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_electrica/118/](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/118/)
- [7] E. Duque. “Viabilidad de una Micro-red en la isla de San Andrés, Colombia”. Repositorio Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Accedido el 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/1857>
- [8] J. Pulgarin. “POTENCIAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA CON SISTEMAS HÍBRIDOS FOTOVOLTAICO EÓLICO EN ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA”. Repositorio Institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana. Accedido el 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/1545/TESIS%20COMPLET A.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] E. Ramirez, S. Hernández y H. Pérez. “DESIGN OF A TRAILER FOR PHOTOVOLTAIC SOLAR PUMPING”. International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET). Accedido el 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal\\_uploads/IJMET/VOLUME\\_10\\_ISSUE\\_11/IJMET\\_10\\_11\\_029.pdf](https://iaeme.com/MasterAdmin/Journal_uploads/IJMET/VOLUME_10_ISSUE_11/IJMET_10_11_029.pdf)
- [10] A. Shrestha. “Theseus: 3D MODEL OF PORTABLE POWER SYSTEM: A hybrid model of solar panels and wind turbine”. Ammattikorkeakoulut - Theseus. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.theseus.fi/handle/10024/342446>
- [11] BIGLUX. “Remolque del banco de energía solar”. BIGLUX Energía solar móvil, Generador solar móvil, Remolque solar móvil, Torre de iluminación móvil, Torre CCTV móvil, Torre de vigilancia móvil. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <http://www.solarlighttowerchina.com/mobile-solar-power/solar-power-bank-trailer.html>
- [12] R. Montoya. “La agricultura en la isla de Providencia: problemas fitosanitarios.” Biblioteca Digital Agropecuaria de Colombia. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/22933>.
- [13] European Commission. “Herramientas interactivas-PVGIS”. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/es/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/es/)

- [14] A. Chauhan. “A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control”. ScienceDirect. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114004043?via=ihub>
- [15] Guaman Sanchez, Cristian Fernando. “DISEÑO DE UNA MICRORRED BASADA EN RENOVABLES PARA SUMINISTRAR ELECTRICIDAD A UN ÁREA DE CONCESIÓN DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR”. RiuNet repositorio UPV. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://riunet.upv.es/handle/10251/83964>
- [16] “Atlas Interactivo - Radiación IDEAM”. IDEAM. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- [17] Google Earth. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- [18] L.Gallo, E. Chica y. E. Florez. “Estudio de desempeño de distintos perfiles de álabe de una turbina eólica para aprovechar vientos de baja velocidad”. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Accedido el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/journal/4988/498872408004/html/>
- [19] NASA. “NASA POWER | Data Access Viewer”. NASA POWER | Prediction Of Worldwide Energy Resources. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- [20] IDEAM. “Distribución horaria de la velocidad del viento en zonas con mayor aprovechamiento de potencial eólico”. Atlas de Viento y Energía Eólica de Colombia. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21125/Capitulo4.pdf/3648f6d2-2350-40b4-bf35-a54611253612>
- [21] “Baterías de plomo-ácido versus baterías de litio: ¿Cuáles son mejores para la energía solar?” ENERLIFE Energías Renovables. Accedido el 26 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/naXl8A>
- [22] S. Diaff, D.Diaf, M.,Belhamel, M.,Haddadi y A.Louche. “A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system”. ScienceDirect. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421507002893>

- [23] Jing Li, Wei Wei y Ji Xiang. “A Simple Sizing Algorithm for Stand-Alone PV/Wind/Battery Hybrid Microgrids”. MDPI. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1073/5/12/5307>
- [24] I. Huancas. “Diseño de una microred híbrida eólico solar para suministrar con energía eléctrica al centro poblado Señor de la Humildad del Distrito de Incahuasi – Ferreñafe-Lambayeque”. Repositorio Institucional UNPRG. Accedido el 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8133>
- [25] IPSE. “Informe Mensuales Telemetría – IPSE-CNM”. IPSE-CNM-Informes Mensuales de Telemetría. Accedido el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://ipse.gov.co/cnm/informe-mensuales-telemetry/>
- [26] “DANE - Encuesta de hábitat y usos socioeconómicos, 2019 - Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina”. DANE - Inicio. Accedido el 13 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/y3Htvq>
- [27] “LUXPOWER Mono I 575 - 595W”. Paneles Solares Solartex Colombia. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.solartex.co/tienda/wp-content/uploads/2022/01/LUXEN-SERIES-5-182-156cells-LNVH-575-595w-MONOFACIAL.pdf>
- [28] “Turbina eólica Vertical para el hogar, molino de viento de bajo ruido de 4000W, 6000W, 10000W, 20000W, CA trifásica, 10kW, 12V, 24V, 48V, 96V, 2kW”. aliexpress.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/WpuFhD>
- [29] “Batería De Litio 48v 100ah GreenPoint”. SOLPHOWER. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://solphower.co/es/productos/bateria-de-litio-48v-100ah/attached/33917542-4adc-4233-8f0b-4da17023605f>
- [30] “Controlador de carga de sistema de energía Solar eólica híbrida, regulador de Panel Solar de turbina eólica con WIFI, 4800W, 12V, 24V, 48V”. aliexpress.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/CUxI0c>
- [31] “Inversor GreenPoint 6000W 48Vdc Mppt 80A 110/220Vac |”. Emergente Energía Sostenible. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.emergente.com.co/blog/producto/inversor-greenpoint-6000w-48vdc-mppt-80a-110-220vac/>
- [32] S. Nedelcu. “Suministro de energía eléctrica a una vivienda rural aislada mediante fuentes de energía renovables”. Univertat Rovira I Virgili. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://deeea.urv.es/public/PROPOSTES/pub/pdf/1430res.pdf>

- [33] BUSSMANN SERIES. “Protección de circuitos solares completa y fiable”. Guía de aplicaciones fotovoltaicas de series Bussmann. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.intronica.com/storage/Aplicaciones%20fotovoltaicas%20BUSSMANN.pdf>
- [34] “Fusible NH-1 de 100A (1000 VDC). Clase gPV | NH-1 de 100A gPV”. temper. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.grupotemper.com/producto/nh-1-de-100a-gpv>
- [35] “Portafusibles BUC para Fusibles de Cuchilla NH00 y NH000 | Coelectrix.com”. Coelectrix. Accedido el 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://coelectrix.com/producto/portafusibles-buc-para-fusibles-nh00>
- [36] “GEYA interruptor de circuito para Panel Solar, caja combinadora de plástico GYPV/1 1, 550V, 15A, 1 cuerda, 550VDC, 1 en 1”. aliexpress.com. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/Y5DoIY>
- [37] “Disyuntor de energía Solar PV DC 1000V/500V 125A MCB 1P 2P 4 polos 80 Amp 100A”. AliExpress. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/qigOzp>
- [38] “Conoce los tipos y grados de protección IP - TRACTIAN”. TRACTIAN. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://tractian.com/es/blog/conoce-los-tipos-y-grados-de-proteccion-ip>
- [39] “C45N 2 polos 3A/6A/10A/16A/20A/32A/40A/50A/63A 400V ~ C tipo Mini disyuntor Mcb montaje 35mm carril Din capacidad de rotura 6KA|Fusibles de interruptor de circuito”. aliexpress.com. Accedido el 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/hneRQ6>
- [40] M. L. Fula Bohorquez. “Implementación de equipo energía renovable (solar y eólico) en la Universidad Militar Nueva Granada”. RI UMNG Principal. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/11983>
- [41] N. Sanchez Gallego. “DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO SOLAR PARA EL BOMBEO DE AGUA”. Repositorio académico Universidad Tecnológica de Pereira. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/71399232.pdf>
- [42] “Construcciones de conductores americanas”. SAB Bröckskes. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.sab-cables.eu/productos/datos-tecnicos/cables-electricos/construccionesdevenasamericanas.html>

- [43] R. Flores Guerrero. “DISEÑO DE PROTECCIONES ATMOSFÉRICAS EXTERNAS SEGÚN NORMAS NFPA 780 - CASO EDIFICIO "E" - UDEP”. Repositorio institucional PIRHUA. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/31ce445b-f183-4d90-868a-7442e1c9caff/content>
- [44] C. Polo Bravo y H. Torres Muro. “SISTEMAS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AISLADOS EN LA ZONA ALTOANDINA DE LA REGIÓN TACNA”. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://manuelberaun.files.wordpress.com/2011/12/sistemas-de-proteccion-electrica-para-sistemas-fotovoltaicos-aislados-en-la.pdf>
- [45] “Puntas captadoras”. INGESCO Lightning Solutions. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.ingesco.com/es/productos/puntas-captadoras>
- [46] “BS EN IEC 62305 Norma de protección contra rayos”. LSP Lightning and Surge Protection. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.lsp-international.com/es/bs-en-iec-62305-lightning-protection-standard/>
- [47] “Tabla de roscas normalizadas”. Tornillera aragonesa. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [http://www.tornillera.com/archivos/info\\_tecnica/esp/tabla\\_roscas.pdf](http://www.tornillera.com/archivos/info_tecnica/esp/tabla_roscas.pdf)
- [48] “Tubería Mecánica IPAC”. AGOFER DITH Group. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/9fec2152/files/uploaded/22.Tubería-mecánica-redonda-IPAC-de%20acero-para-muebles-CR-Agofer.pdf>
- [49] “Cable de cobre para pararrayos”. ARGOS. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://argoselectrica.com/fichastecnicas/conductores/cable-de-cobre-para-pararrayos.pdf>
- [50] “Cable para pararrayos”. Viakon. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://viakon.com/wp-content/uploads/2023/05/CAT-Desn-Cable-de-Pararrayos-2022-03-01.pdf>
- [51] “Resolución Número 180398 de 2004”. Ministerio de Minas y Energía. Accedido el 2 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.minenergia.gov.co/documents/3832/22074-2284.pdf>

- [52] “FEATURED 2021 BIG TEX 10PI 20' - 6181”. Silverline Trailers. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.silverlinetrailer.com/inventory/2021-big-tex-10pi-20-6181/>
- [53] “Utility & Landscape Trailers - Big Tex Trailers”. Big Tex Trailers. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.bigtextrailers.com/trailers/utility-landscape-trailers/>
- [54] Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes, A500/A500M – 23, ASTM, United States. Accedido el 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: [https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM|A0500\\_A0500M-23|en-US](https://compass.astm.org/document/?contentCode=ASTM|A0500_A0500M-23|en-US)
- [55] “FICHA TÉCNICA PERFIL ESTRUCTURAL TUBULAR NEGRO Y GALVANIZADO · ASTM A500 (NTC 4526)”. Tubos Colmena. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: [https://tuboscolmena.com/fichas%20tecnicas/Perfil\\_estructural\\_cuadrado\\_Ficha\\_Tecnica\\_tubos\\_Colmena.pdf](https://tuboscolmena.com/fichas%20tecnicas/Perfil_estructural_cuadrado_Ficha_Tecnica_tubos_Colmena.pdf)
- [56] “Telescopic Mast Pole”. OkSolar.com. Accedido el 25 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.oksolar.com/lion/Item/8088/telescopic-mast-pole>
- [57] R. E. TIEMPO. “Usar remolque requiere usar la debida señalización pero no necesita un permiso especial”. El Tiempo. Accedido el 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-3646980>
- [58] INVIAS. “norma colombiana de diseño de puentes CCP14”. Accedido el 9 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3709-norma-colombiana-de-diseno-de-puentes-ccp14>
- [59] “Mallador basado en curvatura de combinado - 2022 - Novedades de SOLIDWORKS”. SolidWorks Web Help. Accedido el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: [https://help.solidworks.com/2022/spanish/WhatsNew/c\\_wn2022\\_simulation\\_bcb\\_mesher.htm?id=2657b558de85453c84a74a76680e2d61#Pg0](https://help.solidworks.com/2022/spanish/WhatsNew/c_wn2022_simulation_bcb_mesher.htm?id=2657b558de85453c84a74a76680e2d61#Pg0)
- [60] “Panel Solar de 550W Monocristalino JA Solar”. Emergente Energía Sostenible. Accedido el 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.emergente.com.co/blog/producto/panel-solar-de-550w-monocristalino-ja-solar/>
- [61] “Fusible Siemens, NH1, gPV, 1kV, 100A”. RS. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.rs-online.com/web/p/fusibles-de-cuchillas/2302985>

- [62] “Cable resistente al calor de 1 metro, 11, 10, 8, 7, 6, 4, 3, 2 AWG, cable de silicona ultra suave, línea de cobre Flexible de alta temperatura”. AliExpress. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.aliexpress.com/item/1005003605405831.html>
- [63] “Cable de goma de silicona suave de cobre estañado, cables eléctricos de alimentación para batería de coche, cableado Flexible, 17, 15, 13, 11, 9, 7, 5 AWG, 30m”. AliExpress. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/UN0GIx>
- [64] “Cable resistente al calor de 1 metro, 11, 10, 8, 7, 6, 4, 3, 2 AWG, cable de silicona ultra suave, línea de cobre Flexible de alta temperatura”. AliExpress. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://es.aliexpress.com/item/1005003605405831.html>
- [65] “RVV-máquina de soldadura de Cable de cobre de doble revestimiento, Cable de soldadura simple Core 7 5 3 2 1/0 2/0 3/0 AWG, cable para soldar 16 mm<sup>2</sup>, resistente al aceite”. AliExpress. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/f2mO6X>
- [66] “Tubería Mueble Redonda”. PanelCo. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/8u4SV5>
- [67] “Punta Captadora 5-8 X 0,6 mt Cobre-Estañado Sin Conector”. FYEEL.COM.CO. Accedido el 3 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://acortar.link/c4fPE5>
- [68] “Galvanized Telescopic Antenna Mast Pole - Buy 12m Telescopic Pole,Telescopic Camera Mast Pole,Telescopic Poles Paint Product on Alibaba.com”. Alibaba.com. Accedido el 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://lc.cx/tof8nV>
- [69] Banco de la República Colombia. “Comportamiento del mercado del dólar durante el día”. Banco de la República Colombia. Accedido el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/comportamiento-del-mercado-del-dolar-durante-el-dia-informacion-tiempo-real>
- [70] “Mercado cambiario Euro”. La República. Accedido el 4 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.larepublica.co/indicadores-economicos/mercado-cambiarior/euro>