



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Instituto  
Ingeniería  
Energética



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**TECNOLOGÍA ENERGÉTICA PARA DESARROLLO SOSTENIBLE**

**DISEÑO DE UNA MICRORRED BASADA  
EN RENOVABLES PARA SUMINISTRAR  
ELECTRICIDAD A UN ÁREA DE  
CONCESIÓN DE LA EMPRESA  
ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR**

Autor: **Guamán Sánchez, Cristian Fernando**

Tutor: **Vargas Salgado, Carlos Afranio**

**Curso Académico: 2015-16**

**“Febrero 2017”**

## **AGRADECIMIENTO**

A la Fundación Carolina quienes confiaron en mí y me dieron la oportunidad de cumplir una de mis metas profesionales que fue estudiar un máster en Europa.

A la Universidad Politécnica de Valencia que mediante sus catedráticos inculcaron sus conocimientos que servirán de gran apoyo para el desarrollo personal y del país al cual pertenezco.

De igual manera, al Dr. Carlos Vargas Salgado por haber aceptado dirigir este proyecto y haberme guiado por el camino correcto.

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto de fin de máster a Dios, a mis padres y hermanos. A Dios porque ha estado acompañándome en cada momento, cuidándome y dándome fortaleza para continuar en esta etapa de mi vida.

A mis padres y hermanos, quienes me brindan su apoyo incondicionalmente en todo momento.

**Cristian Guamán Sánchez.**

## RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto diseñar una microrred eléctrica basada en energías renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; enfocado principalmente en el concepto de microrredes, los cuales son sistemas pequeños e independientes; que tienen una combinación de tecnologías de energías convencionales y energías renovables, y poseen una alta fiabilidad, eficiencia y coste competitivo.

Este concepto se aplica a los usuarios que se encuentran conectados a una estación de transformación de la E.E.R.C.S.; los cuales están ubicados en el sector del Tablón del cantón Santa Isabel provincia del Azuay al sur del Ecuador.

Primero se realiza mediciones en tiempo real de los parámetros eléctricos necesarios para la obtención de la curva de carga.

Luego se obtiene los datos de radiación solar de la base de datos de la NASA para así diseñar el sistema de generación fotovoltaico que incluye paneles solares, inversores; inversores-cargadores y sistema de baterías con autonomía de un día.

Mediante la obtención de mediciones de velocidad del viento; se calcula los factores de forma y escala; para luego seleccionar un aerogenerador y determinar la energía anual obtenida con este sistema, el cual servirá de apoyo para la generación fotovoltaica de la microrred.

En caso de que las condiciones climáticas del sitio de emplazamiento no sean muy favorables para un determinado período de tiempo, y las baterías se encuentren descargadas; se realiza el dimensionamiento de un sistema formado por un generador diésel de combustión interna.

Una vez definido los equipos que conformarán la microrred eléctrica; se elabora un esquema en donde se observa cada una de las conexiones y funcionamiento de cada componente.

Finalmente se elabora un presupuesto económico, el cual refleja el costo de implementación de la microrred y así determinar la viabilidad económica, técnica y medioambiental.

**Palabras Clave:** Microrredes, energías renovables, sistemas aislados, sistemas de almacenamiento de energía.

## RESUM

Aquest treball té com a objectiu dissenyar una microxarxa elèctrica basada en energies renovables per subministrar electricitat a una àrea de concessió de l'*Empresa Eléctrica Regional Centro Sur*; enfocada principalment en el concepte de microxarxes, és a dir, sistemes xicotets i independents, que tenen una combinació de tecnologia d'energies convencionals i energies renovables i tenen una alta fiabilitat, eficiència i cost competitiu.

Aquest concepte s'aplica als usuaris que es troben connectats a una estació de transformació de l'E.R.R.C.S.; els quals estan ubicats en el sector del Tablón del cantón Santa Isabel, província d'Azuay al sud d'Equador.

Primer es realitzen mesuraments en temps real dels paràmetres elèctrics necessaris per a l'obtenció de la corba de càrrega.

Després s'obtenen les dades de radiació solar de la base de dades de la NASA per així dissenyar el sistema de generació fotovoltaic que inclou panells solars, inversors, inversors-carregadors i sistemes de bateria amb autonomia d'un dia.

Mitjançant l'obtenció de mesures de velocitat del vent, es calculen els factors de forma i escala, per després seleccionar un aerogenerador i determinar l'energia anual obtinguda amb aquest sistema, el qual servirà de suport per a la generació fotovoltaica de la microxarxa.

En el cas que les condicions climàtiques del lloc de l'emplaçament no siguin molt favorables per a un determinat període de temps, i les bateries es troben descarregades, es realitza el dimensionament d'un sistema format per un generador dièsel de combustió interna.

Una vegada definits els equips que conformaran la microxarxa elèctrica, s'elabora un esquema on s'observa cadascuna de les connexions i funcionament de cada component.

Finalment s'elabora un pressupost econòmic, que reflecteix el cost de la implantació de la microxarxa i així es determina la viabilitat econòmica, tècnica i mediambiental.

**Paraules clau:** Microxarxes, energies renovables, sistemes aïllats, sistemes d'emmagatzemament de l'energia

### ABSTRACT

The following project is aimed to design an electric microgrid based on renewable energy to supply electricity to a concession area of the Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; mainly focused on the concept of microgrids, which are small and independent systems; with a combination of conventional energy technologies and renewable energy, and it has high reliability, efficiency and a competitive cost.

The aforementioned concept will be applied particularly to users who are connected to a transformer station that is owned by the E.E.R.C.S. and it is installed in an area of Tablón of Santa Isabel district, Azuay province to the south of Ecuador.

The starting point will be to make real-time measurements of electrical parameters necessary for obtaining the load curve.

Then; the solar radiation data will be obtained from the database of NASA to design photovoltaic generation system that includes solar panels, inverters, inverters-chargers and battery system with autonomy of one day.

Thereafter by obtaining measurements of wind speed; the form factor and scale factor will be calculated; and then select a wind generator and determine the annual energy to be obtained with this system, which will support the generation of photovoltaic energy microgrid.

In case that weather conditions of the proposed site is not very favorable for a certain period of time, and the batteries are discharged; dimensioning generation system based on a generator diesel of internal combustion.

Once defined the equipment that will make up the electrical microgrid; a scheme will be draw up where it observes each one of the connections and functioning of each component.

Finally, it proceeds with the working out of an economic budget, which will reflect the cost of implementing the microgrid and determine the economic, technical and environmental viability.

**Keywords:** Microrredes, Renewable energy, Isolated systems, Energy storage systems.

## ÍNDICE

<b>CAPITULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Alcance .....	1
1.3 Justificación .....	2
1.4 Objetivos .....	2
1.4.1. Objetivo General: .....	2
1.4.2. Objetivos Específicos: .....	2
<b>CAPITULO 2:    MARCO TEÓRICO</b> .....	4
2.1.    Microrredes .....	4
2.2.    Aplicación de las microrredes .....	5
2.3.    Demanda de energía .....	5
2.4.    Microrredes en corriente continua.....	6
2.5.    Microrredes en corriente alterna .....	7
2.6.    Integración de fuentes de energía en una microrred. ....	8
2.7.    Energía Solar Fotovoltaica .....	9
2.7.1    Ventajas y Desventajas .....	10
2.7.2    Geometría solar .....	10
2.7.3    Inclinación y orientación de paneles.....	13
2.7.4    Componentes de una instalación solar fotovoltaica .....	14
2.7.5    Baterías.....	17
2.8.    Energía Eólica .....	18
2.8.1    Potencia del viento .....	19
2.8.2    Potencia máxima aprovechable límite de Betz .....	20
2.8.3    Determinación de potencia generada y rendimiento de un aerogenerador .....	20
2.8.4    Rosa de los vientos .....	21
2.8.5    Distribución de Weibull .....	22
2.8.6    Corrección de la distribución de Weibull por la altura.....	24
2.8.7    Aerogeneradores en microrredes .....	24
2.8.8    El regulador en sistemas eólicos .....	25
<b>CAPITULO 3:    ESTADO DEL ARTE</b> .....	26
3.1.    Últimas tecnologías utilizadas en microrredes .....	26
3.2.    Energías renovables en Ecuador .....	28
3.3.    Políticas de incentivo de energías renovables en el Ecuador .....	29

3.4.	Microrredes en el Ecuador. ....	30
3.5.	Energía eólica en Ecuador.....	30
3.6.	Energía fotovoltaica en Ecuador.....	31
3.7.	Normativa.....	32
<b>CAPITULO 4:</b>	<b>ANÁLISIS DE DATOS, CÁLCULOS Y DISEÑO</b> .....	<b>34</b>
4.1	Análisis de la curva de carga .....	34
4.2	Dimensionamiento del sistema fotovoltaico .....	44
4.2.1	Datos de partida sistema fotovoltaico.....	44
4.2.2	Selección de módulos fotovoltaicos .....	46
4.2.3	Selección del inversor de red.....	48
4.2.4	Selección del inversor - cargador de red.....	49
4.2.5	Selección de las baterías.....	50
4.3	Dimensionamiento del sistema eólico.....	51
4.3.1	Datos de partida sistema eólico .....	51
4.3.2	Cálculo de los índices c y k con el método de mínimos cuadrados .....	52
4.3.3	Cálculo de la distribución de Weibull.....	55
4.3.4	Selección del aerogenerador .....	57
4.3.5	Cálculo de energía a obtener con aerogenerador .....	58
4.3.6	Selección del regulador de carga eólico .....	60
4.3.7	Selección del inversor de conexión a red eólico .....	60
4.4	Dimensionamiento del generador de emergencia .....	60
4.5	Integración de todas las fuentes en la microrred (Sistema fotovoltaico, eólico, generador de emergencia, baterías).....	61
<b>CAPITULO 5:</b>	<b>PRESUPUESTO ECONÓMICO Y VIABILIDAD</b> .....	<b>64</b>
5.1	Presupuesto de implementación de la microrred .....	64
5.1.1	Viabilidad económica .....	65
5.2	Viabilidad medioambiental.....	67
<b>CAPITULO 6:</b>	<b>CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>68</b>
6.1	Conclusiones.....	68
6.2	Bibliografía. ....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de una microrred. ....	4
Figura 2. Esquema de una microrred de CC. ....	6
Figura 3. Esquema de una microrred de CA. ....	7
Figura 4. Esquema de un sistema fotovoltaico .....	9
Figura 5. Movimientos de la tierra. ....	11
Figura 6. Coordenadas geográficas de referencia. ....	12
Figura 7. Posición del sol. ....	12
Figura 8. Cálculo de distancia mínima de paneles fotovoltaicos. ....	13
Figura 9. Panel fotovoltaico monocristalino. ....	15
Figura 10. Panel fotovoltaico policristalino .....	15
Figura 11. Panel fotovoltaico amorfo. ....	15
Figura 12. Inversor de conexión a red .....	16
Figura 13. Flujo de viento a través de turbina eólica .....	19
Figura 14. Curva de potencia de un aerogenerador. ....	21
Figura 15. Rosa de los vientos. ....	21
Figura 16. Distribución de Weibull para diferentes valores de k. ....	22
Figura 17. Aerogenerador de eje horizontal y eje vertical.....	24
Figura 18. Ubicación geográfica del sitio de emplazamiento del diseño. ....	34
Figura 19. Ubicación geográfica de transformador número 7039 -10 kVA.....	35
Figura 20. Curva de carga semanal estación de transformación 10 kVA. ....	37
Figura 21. Curva de carga día de mayor consumo estación de transformador 10 kVA .....	37
Figura 22. Consumo de energía semanal, transformador 10 kVA. ....	38
Figura 23. Consumo estimado de energía mensual, trafo 10 kVA. ....	40
Figura 24. Radiación solar media diaria sector el Tablón. ....	45
Figura 25. Disposición de paneles solares .....	48
Figura 26. Velocidad del viento media mensual sector el Tablón.....	52
Figura 27. Aproximación lineal de la distribución de Weibull.....	53
Figura 28. Distribución de Weibull para velocidades existentes .....	56
Figura 29. Comparación entre histograma de velocidades y distribución de Weibull .....	56
Figura 30. Curva de potencia aerogenerador BORNAY 6000.....	57
Figura 31. Disposición física de los equipos que conforman la microrred .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ejemplos típicos de cargas AC en el hogar. ....	8
Tabla 2. Prototipos de microrredes de C.A. en el mundo. ....	27
Tabla 3. Prototipos de microrredes de C.C. en el mundo. ....	28
Tabla 4. Coordenadas del sitio de emplazamiento de la carga. ....	34
Tabla 5. Consumo semanal de energía, transformador 7039 de 10 kVA. ....	36
Tabla 6. Consumo semanal de energía media, trafo 7039. ....	39
Tabla 7. Consumo estimado de energía mensual y anual. ....	40
Tabla 8. Valores sintetizados de mediciones realizadas a estación de transformación 7039 de 10 kVA. .....	41
Tabla 9. Cargas conectadas a estación de transformación. ....	41
Tabla 10. Valores con incremento de carga de las mediciones realizadas en la estación de transformación 7039 de 10 kVA. ....	42
Tabla 11. Consumo mensual de cargas, estación de transformación 7039 de 10 kVA. ....	43
Tabla 12. Datos de radiación solar obtenidos de la NASA, para sitio de emplazamiento del diseño de la microrred eléctrica. ....	44
Tabla 13. Horas de sol diarias del sitio de emplazamiento. ....	45
Tabla 14. Datos de partida para diseño de sistema fotovoltaico. ....	46
Tabla 15. Especificaciones técnicas panel fotovoltaico AXITEC. ....	46
Tabla 16. Especificaciones técnicas del inversor. ....	49
Tabla 17. Especificaciones técnicas del inversor – cargador. ....	50
Tabla 18. Especificaciones técnicas de las baterías. ....	50
Tabla 19. Velocidad del viento media mensual. ....	52
Tabla 20. Cálculo de los factores $c$ y $k$ . ....	54
Tabla 21. Distribución de Weibull para velocidades existente. ....	55
Tabla 22. Especificaciones Técnicas de Aerogenerador. ....	57
Tabla 23. Datos para el cálculo de energía a producir con el aerogenerador. ....	58
Tabla 24. Cálculo de energía anual a producir por el aerogenerador. ....	59
Tabla 25. Especificaciones técnicas del regulador de carga eólico. ....	60
Tabla 26. Especificaciones técnicas del inversor eólico. ....	60
Tabla 27. Especificaciones Técnicas del Generador de Combustión interna. ....	61
Tabla 28. Equipos que conforman la microrred eléctrica. ....	62
Tabla 29. Presupuesto económico de materiales. ....	64
Tabla 30. Presupuesto económico de mano de obra. ....	65
Tabla 31. Presupuesto económico total. ....	65

## CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La generación y el consumo de energía es sin duda uno de los ámbitos prioritarios sobre los cuales se debe enfocar el desarrollo de un país. Siempre visualizando, una menor dependencia del uso de combustibles fósiles y un mayor aprovechamiento de las energías renovables. Lo antes expuesto se sustenta en el agotamiento de hidrocarburos y las restricciones ambientales que son impuestas a nivel mundial.

Es el caso de Ecuador que a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER), promueve el uso racional de energía y desarrollo de proyectos de uso de energía no convencional; es así que también se ha implementado el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables INER, que es el encargado de investigar, desarrollar, innovar y transferir tecnología y conocimiento, en eficiencia energética y energía renovable; orientadas al cambio de la matriz productiva, la diversificación de la matriz energética y la mitigación del cambio climático.

De acuerdo a las proyecciones del MEER, en cuanto al cambio de la matriz energética del Ecuador; se espera que para el año 2020 el 86% de la energía provenga de generación hidroeléctrica, y un 2% por tecnologías renovables no convencionales.

Enfocado en el uso de energías renovables se introduce el concepto de microrredes, los cuales son sistemas pequeños e independientes; que tienen una combinación de tecnologías de energías convencionales y energías renovables, adaptados a cada consumo en particular de tal manera que la energía eléctrica requerida adquiera una alta fiabilidad, eficiencia y un coste competitivo.

El concepto antes citado se aplicará a los abonados de una estación de transformación que se encuentra ubicada en el área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, orientado primero en la obtención de la curva de carga de la estación de transformación; para luego conseguir y analizar los datos eólicos y solares de la zona, y así proceder a realizar el diseño y dimensionamiento de la microrred que abastecerá eléctricamente a los usuarios de la estación de transformación.

Procedentemente se elaborará un presupuesto económico, el cual reflejará el costo de implementación de la microrred.

### 1.2 Alcance

Proponer el diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; partiendo primero de la obtención de la curva de carga del transformador que alimenta a los usuarios; para luego obtener los datos de velocidad del viento, así como los de radiación solar, los cuales serán analizados para proceder con los cálculos y diseño de la microrred; en donde se seleccionarán los mejores componentes en ámbitos de tecnología

y precio; para consecuentemente realizar un presupuesto económico de la implementación del proyecto.

### **1.3 Justificación**

El incremento de consumo de energía eléctrica en el Ecuador y la búsqueda de fuentes de energías renovables, con las cuales se busca disminuir el impacto ambiental; han dado lugar a un acelerado desarrollo de tecnologías como son la generación de energía eólica y fotovoltaica.

Mediante la aplicación de microrredes las cuales son un grupo de cargas, generación, sistemas de almacenamiento de energía; que pueden funcionar en isla o conectados a la red convencional de distribución eléctrica, y tienen como objetivo principal suministrar energía eléctrica de manera fiable, eficiente y a un coste competitivo. Además de que tiene grandes ventajas adicionales como la reducción de pérdidas en la red, descongestiona los sistemas de transporte de energía y disminuye el impacto ambiental del sistema eléctrico.

Son estas razones por las que se plantea desarrollar el presente proyecto de diseño de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

La microrred diseñada tendrá la capacidad de brindar el suministro eléctrico en la cantidad requerida, en el momento que se necesite y con una calidad adecuada.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General:**

Diseñar una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

#### **1.4.2. Objetivos Específicos:**

- 1.- Identificar y analizar la curva de carga de una estación de transformación, la cual se encuentra ubicada en el área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.
- 2.- Obtención y análisis de datos solares y eólicos, del lugar de emplazamiento.
- 3.- Realizar el dimensionamiento del sistema eólico y fotovoltaico, así como del sistema auxiliar de generación.

4.- Realizar el presupuesto económico de la implementación de la microrred, determinar la viabilidad económica y ambiental.

## CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. Microrredes

Los sistemas de distribución eléctricos tienen que desarrollarse, de tal manera que los objetivos principales sean brindar un servicio continuo, y de calidad, en el sentido de que no exista interrupciones y que las ondas sean lo más senoidales posible de tal manera que esté libre de armónicos.

El uso de la energía eléctrica tiene grandes ventajas ya que su transporte es fácil y eficiente; además de que es accesible a lugares lejanos y se puede subdividir hasta niveles muy pequeños, complementariamente hay ausencia de residuos.

El incremento de consumo de energía eléctrica en el mundo y la gran dependencia de combustibles fósiles han implicado la búsqueda de fuentes de energías renovables, con las cuales se plantea disminuir el impacto ambiental; dando como resultado un acelerado desarrollo de tecnologías como son la generación de energía eólica y fotovoltaica.

Otro aspecto importante es la generación distribuida que en [1] se conceptualiza como una generación en instalaciones relativamente pequeñas, en general inferiores a 10 MW, que se sitúan cerca de los consumos y conectadas a la red de distribución en media y baja tensión normalmente, y que complementan a la generación tradicional de grandes unidades conectadas generalmente a la red de transporte.

De la definición de generación distribuida surge el concepto de microrredes que son un conjunto de cargas, generadores y sistemas de almacenamiento de energía, aislados o conectados a la red convencional eléctrica, que pueden ser gestionados de manera coordinada para suministrar electricidad de forma fiable [2].

La implementación de microrredes tiene ventajas como la reducción de pérdidas en la red, descongestión de los sistemas de transporte de energía y disminución del impacto ambiental del sistema eléctrico. En la siguiente figura, se visualiza el esquema de una microrred.

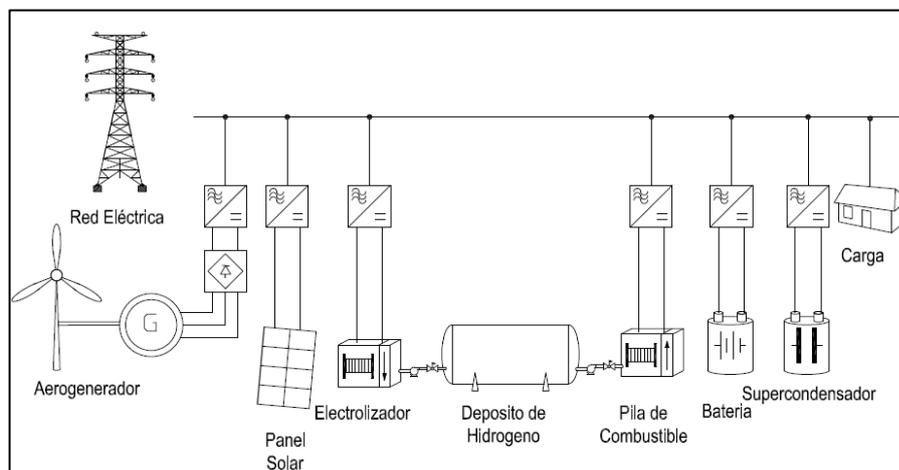


Figura 1. Esquema de una microrred.

Fuente: [2]

## 2.2. Aplicación de las microrredes

Sin duda las microrredes se pueden aplicar a diferentes sectores como son el sector doméstico y sector económico.

En el sector doméstico se implementan para abastecer de energía eléctrica a las viviendas convencionales y hoy en día a las Near Zero Energy Building NZEB, más conocidas como las viviendas de consumo energético casi nulo.

En terminología más técnica una NZEB consiste en una casa que cumpla con un nivel de eficiencia energética muy alto y un consumo de energía casi nulo, o muy bajo, el cual debe en su mayoría proceder de fuentes renovables.

En el sector económico se aplica al sector primario, secundario, terciario y cuaternario.

El sector primario en el cual forman parte actividades de transformación de recursos naturales en productos primarios no elaborados, generalmente son utilizados como materia prima en otros procesos industriales.

El sector secundario abarca las actividades artesanal e industrial de la manufactura, mediante las cuales se convierte los productos del sector primario en nuevos productos.

El sector terciario ofrece servicios a la sociedad tanto el campo comercial, turístico, sanitario y educativo.

Finalmente el sector cuaternario en el que se incluye actividades especializadas de investigación, desarrollo, innovación e información [3].

Aplicaciones adicionales son las relacionadas con la generación distribuida ya que con las microrredes se mantiene una generación continua funcionando conjuntamente con las redes eléctricas convencionales; de igual manera se puede generar solo en punta ya que el precio de la energía es alto en este período.

## 2.3. Demanda de energía

En general la carga es lo más importante en un diseño de un sistema eléctrico, considerando siempre que es un parámetro impredecible, además es importante conocer los factores de carga que son de gran apoyo para prever la demanda máxima, el cual es un parámetro significativo en el diseño.

Los factores de carga se obtienen midiendo directamente en las redes de operación, ya que cada uno de estos sistemas tiene sus características y funcionamientos particulares.

Los factores de carga juegan un papel importante en el diseño del sistema eléctrico, de tal manera que se utilice de mejor forma los recursos materiales y el desempeño de los mismos sea óptimo.

Las cargas pueden clasificarse de diferentes formas; lo más habitual es agruparlas con el perfil de la demanda con el tiempo; por ejemplo el sector industrial, comercial y residencial [4].

De acuerdo a [4] “la carga eléctrica es el aparato o conjunto de aparatos conectados a un sistema eléctrico que demandan una potencia eléctrica. El valor de la potencia demandada es el valor de la carga y normalmente se conoce como la demanda”.

La **demanda máxima** en un sistema eléctrico, es el mayor de todas las potencias demandas, las cuales se han sucedido en un periodo especificado de tiempo, y este es el valor que se debe utilizar para realizar los cálculos de dimensionamiento.

La **carga instalada** es la suma de todas las potencias nominales de los aparatos que utilizan la energía; diferenciando así el concepto de **capacidad instalada** que corresponde a la suma de las potencias nominales de los equipos que generan energía.

## 2.4. Microrredes en corriente continúa

Los sistemas de corriente alterna (CA) se han utilizado ampliamente, primero convirtiendo los altos niveles de tensión de transmisión a bajos niveles de tensión en distribución, que son utilizados para hacer funcionar a las diferentes cargas tanto en el sector residencial como industrial [5].

Por otro lado la corriente continua (CC) se usa en sistemas de distribución de la industria para alimentar cargas electrónicas de alta sensibilidad, en las infraestructuras de telecomunicaciones y transmisiones punto a punto para largas distancias, un esquema se presenta en la figura siguiente.

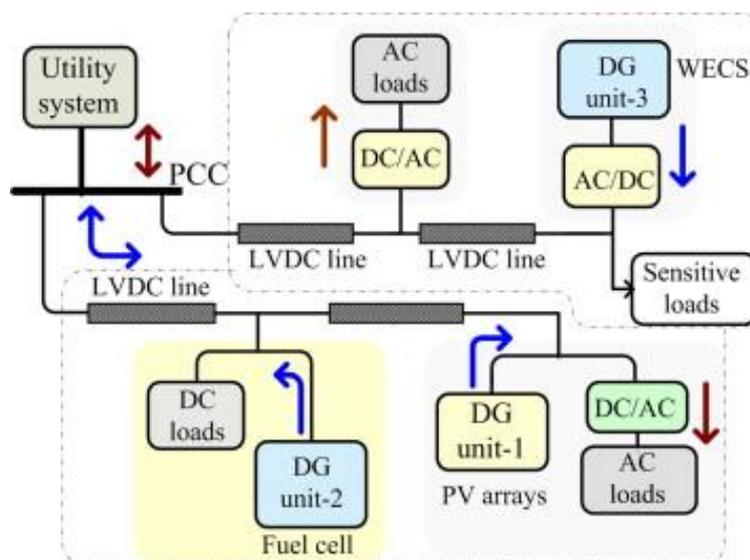


Figura 2. Esquema de una microrred de CC.

Fuente: [5]

En la actualidad gran parte de las cargas eléctricas están controladas o actúan con electrónica de potencia, las cuales necesitan corriente continua para su funcionamiento; que necesariamente requiere una conversión de CA a CC, que en la mayoría de los casos utiliza rectificadores que no tienen una alta eficiencia.

En la mayoría de casos la energía producida por generadores de corriente continua debe convertirse en corriente alterna para sincronizarse con la red eléctrica convencional y ésta nuevamente en CC para algunas aplicaciones; estas conversiones implican pérdidas de energía [6].

La red de distribución en corriente continua aumenta la eficiencia en lo referente a la entrega de energía a la red de distribución y una mejor calidad de la energía.

Aunque también las redes de CC presentan problemas como la sincronización de los generadores, de igual manera hay problemas en las elevadas corrientes de arranque de transformadores, motores y generadores.

Se determina algunas ventajas del uso de microrredes de CC como bajas pérdidas, la no existencia de potencia reactiva ni corrección del factor de potencia, la falta de armónicos y no se necesita cambiar los conductores en algunos casos. Por otro lado también existen desventajas como el uso de sistemas de protección más complejos, no hay puntos de cruce por cero y se necesitan niveles de tensión más altos.

## 2.5. Microrredes en corriente alterna

Una de las principales características de las microrredes de Corriente Alterna (CA), es la conexión directa con la red eléctrica convencional [7]. La ventaja principal es la alimentación eléctrica a las cargas en forma directa, considerando también que el acoplamiento de una microrred de CA es menos costoso en términos económicos ya que se requiere un menor tamaño de convertidor AC-DC, para manejar los flujos de energía entre la red de suministro eléctrico y la red de corriente continua, esto se puede visualizar en la siguiente figura.

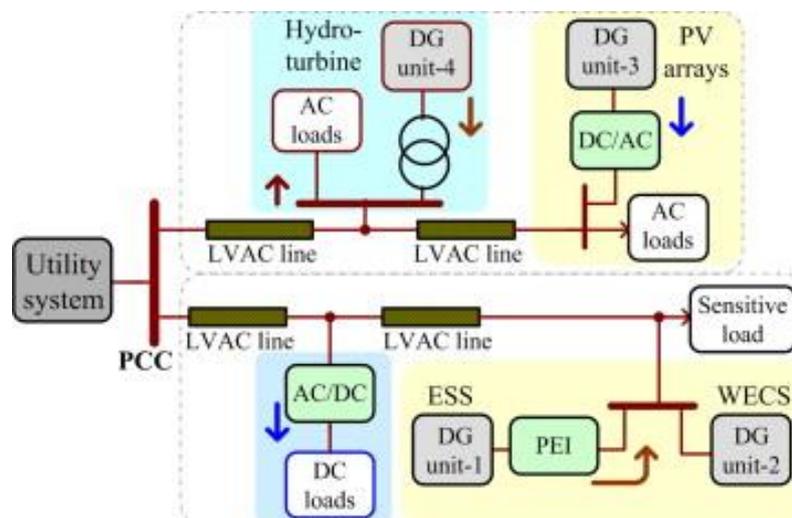


Figura 3. Esquema de una microrred de CA.

Fuente: [5]

De manera general en condiciones normales el funcionamiento de una microrred de CA, consiste en alimentarse de fuentes locales si la demanda de potencia de carga es menor que la potencia producida

por las unidades de generación de la microrred, considerando también que el exceso de energía puede ser exportada al sistema principal.

En la siguiente tabla se presenta algunos ejemplos de cargas típicas alimentadas por CA en el campo del hogar.

**Tabla 1.** Ejemplos típicos de cargas AC en el hogar.

**Fuente: [5]**

Ítem	Cargas de CA	Rangos de Voltaje (V)	Rango de Corriente (A)	Rango de Potencia
1	Horno Microondas	240	–	8,3 kW
2	Lava vajillas	120	11	–
3	Tostadora	120	–	1050 W
4	Cafetera	120	–	1100 W
5	Secadora de ropa	240	–	5600 W
6	Cocina eléctrica	240	–	8,8 W
7	Refrigerador	120	8,3	–
8	Lavadora de ropa	120	7	–

En la mayoría de los casos las microrredes de CA funcionan a voltajes y frecuencias aplicados en la mayoría de los sistemas de distribución convencionales ya que estos tienen una gran flexibilidad.

Por lo tanto se recalca que las microrredes de CA basadas en fuentes de energías renovables y no renovables, son de gran aplicación en áreas remotas, edificios, industria, de tal manera que se asegura el suministro de energía mejorando la eficiencia y confiabilidad en la infraestructura del sistema eléctrico.

## **2.6. Integración de fuentes de energía en una microrred.**

Las diferentes fuentes que componen una microrred dependen de la potencia necesaria solicitada por la carga, de la tecnología utilizada, impacto ambiental, modo de utilización; además de que no están definidas exactamente ya que las mismas dependen del lugar de emplazamiento.

Lo que sí está definido es que las fuentes de generación deben estar lo más cerca posible del consumidor o consumidores según sea el caso. En estos procesos el consumidor se convierte en autogenerador de energía, pudiendo el mismo estar o no conectado a la red eléctrica convencional de media tensión o baja tensión, que en muchos de los casos dependiendo de la regulación de cada país se puede verter a la red de distribución los excedentes de energía generadas por estas fuentes.

En cuanto a niveles de tensión lo recomendable es realizar las conexiones en baja tensión de tal manera que se abarque una mayor cantidad de consumidores.

Todas las tecnologías de fuentes de generación renovable son implementables en las microrredes, siempre teniendo en cuenta que el suministro de energía sea seguro tanto en calidad y confiabilidad y

que los precios sean competitivos frente a las tecnologías convencionales. De igual manera se puede implementar fuentes de energía no renovables que se basan en el uso de combustibles fósiles y energías convencionales.

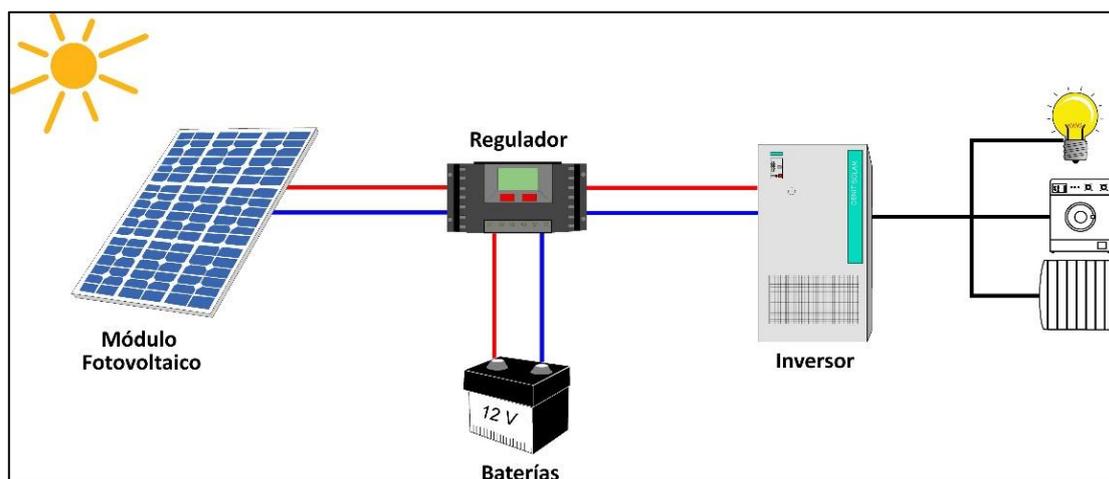
Dentro de las tecnologías más utilizadas en las microrredes están la biomasa, la fotovoltaica y la eólica [1]; destacando que con la energía fotovoltaica se puede cubrir la mayor cantidad de potencia demandada.

Realizando una revisión se determina que dentro de las fuentes de energía convencionales están la cogeneración, turbinas de gas, motores de combustión interna, microturbinas. Y dentro de las energías renovables se recalca las tecnologías minihidráulica, fotovoltaica, eólica, biomasa, geotérmica y marinas [1].

## 2.7. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es la conversión directa de la energía contenida en la radiación solar en energía eléctrica, sin la producción de humos ni ruidos [1].

La radiación solar incide sobre la tierra en forma de fotones, las cuales son partículas en forma de energía. La conversión se realiza mediante la exposición al sol de materiales semiconductores cristalinos en los cuales la acción de los fotones produce una diferencia de potencial eléctrico, esto se visualiza en la siguiente figura.



**Figura 4.** Esquema de un sistema fotovoltaico  
**Fuente:** [8]

Si luego se conecta un conductor entre las caras del material semiconductor, el conjunto de electrones circulara por el hilo conductor estableciéndose una corriente eléctrica la cual es llamada energía solar fotovoltaica.

Una de las aplicaciones más convencionales de la energía solar fotovoltaica, es proporcionar energía eléctrica a zonas aisladas específicamente para electrificación de viviendas, sistemas de bombeo, sistemas de señalización vial, sistemas de comunicaciones, etc.

Como segunda opción se usa la energía fotovoltaica para inyección directa a la red eléctrica convencional, en este caso se trata de grandes capacidades de potencia instalada.

### 2.7.1 Ventajas y Desventajas

En concordancia con [9] la energía solar presenta una gran cantidad de ventajas frente a otras tecnologías, entre las principales se encuentran las siguientes:

- *“La energía del sol es gratuita, autóctona, no tiene límite y es amigable con el medio ambiente, lo cual favorece al autoabastecimiento energético y una menor dependencia del exterior.*
- *Es una tecnología de diseño modular, que produce energía a cualquier escala permaneciendo constante el coste de la energía generada, y flexible o de fácil extensión.*
- *Su manejo es sencillo, y el mantenimiento básico puede realizarse en el ámbito local.*
- *Motiva el desarrollo de varios sectores.*
- *Presenta rentabilidad en aplicaciones de electrificación rural, esto comparado con sistemas de generación convencional”.*
- El mantenimiento es sencillo y de bajo costo.
- Se pueden hacer módulos de todos los tamaños.

A pesar de tener una gran cantidad de ventajas la energía fotovoltaica también presenta limitaciones e inconvenientes que se describen a continuación:

- La energía producida depende de la disponibilidad de luz solar.
- Requiere de un sistema de almacenamiento o back up que consiste en baterías o la red de distribución.
- Requiere mucho espacio físico y produce impacto visual.
- El periodo de amortización de la inversión es largo.
- El rendimiento es bajo.

### 2.7.2 Geometría solar

El sol es una estrella de forma esférica gaseosa de alta temperatura, del tipo espectral G2 que se encuentra en el centro del Sistema Solar y constituye la mayor fuente de radiación electromagnética

de este sistema planetario. El sol está constituido principalmente de helio, carbono e hidrógeno; y la radiación solar no se distribuye uniformemente en la tierra ya que depende de la distancia del sol a la tierra, la hora del día, inclinación del globo terráqueo y zona de la superficie terrestre.

La tierra se caracteriza por moverse alrededor del sol con dos tipos de movimientos; el movimiento de rotación que se produce alrededor del eje polar el cual es un eje imaginario que no es perpendicular al plano de la órbita sino que está inclinado  $23^{\circ} 27'$  con respecto al mismo. El segundo movimiento es el de traslación que consiste en el giro de la tierra alrededor del sol y cuyo periodo es de 365,25 días; lo descrito se visualiza en la siguiente figura.

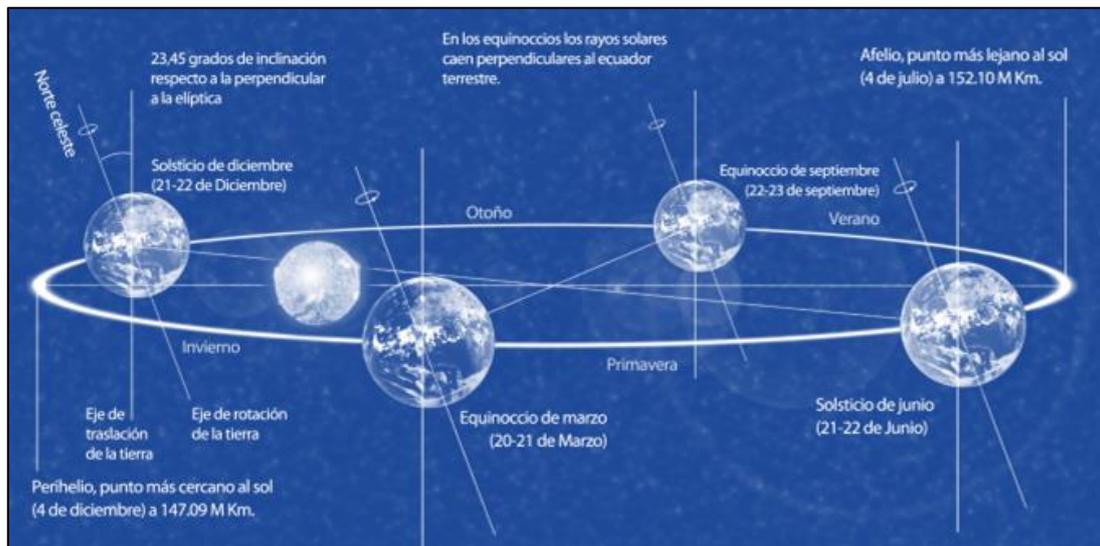


Figura 5. Movimientos de la tierra.

Fuente: [10].

Adicional a los movimientos de la tierra se definen conceptos que son importantes para el presente trabajo como:

La línea de los **ápsides** que es el eje que une el afelio (punto más alejado del sol) con el perihelio (punto más cercano del sol).

Los **solsticios** que son los momentos del año en los que el sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año.

La latitud y longitud son coordenadas geográficas que se utilizan como sistema de referencia para posicionar cualquier punto sobre la superficie de la tierra, tal como se visualiza en la figura 6.

La **latitud** expresa la distancia norte-sur respecto al Ecuador; toma valores absolutos de  $0^{\circ}$  en Ecuador y hasta  $90^{\circ}$  en los polos.

La **longitud** expresa la distancia este-oeste respecto al meridiano de Greenwich; toma valores absolutos de  $0^{\circ}$  en Greenwich hasta  $180^{\circ}$ .

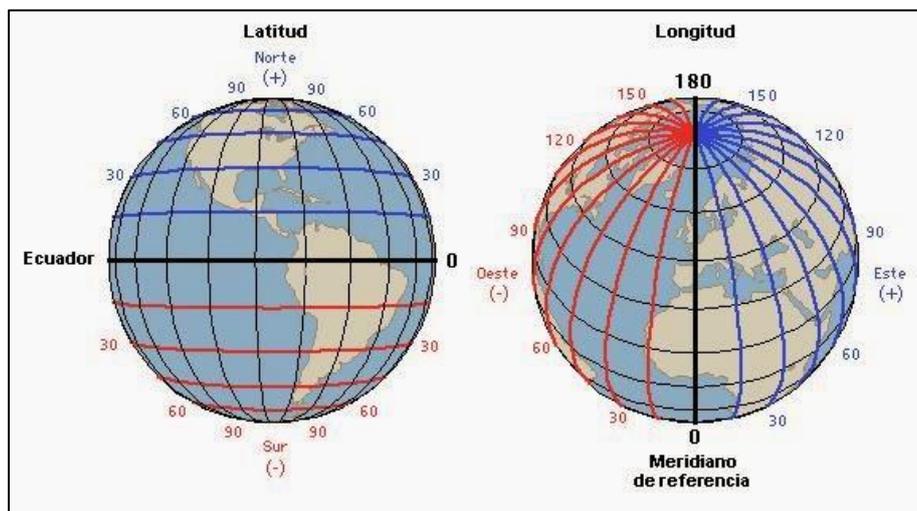


Figura 6. Coordenadas geográficas de referencia.

Fuente: [11]

Cuando se requiere expresar la posición del sol respecto a un punto en la superficie de la tierra, se utiliza el sistema horizontal que consiste en una esfera imaginaria denominada **Bóveda Celeste**, la cual representa una dirección del cielo vista desde la tierra y tiene como centro el punto de observación; de esta manera se tiene diferentes bóvedas celestes en cada punto de la tierra.

El **zenit** es el punto más alto de la bóveda y es la línea recta que se levanta sobre la cabeza del observador, definiéndose también el **nadir** que es el opuesto al zenit.

Análogamente se describen conceptos sobre la posición del sol, los cuales se visualizan en la siguiente figura.

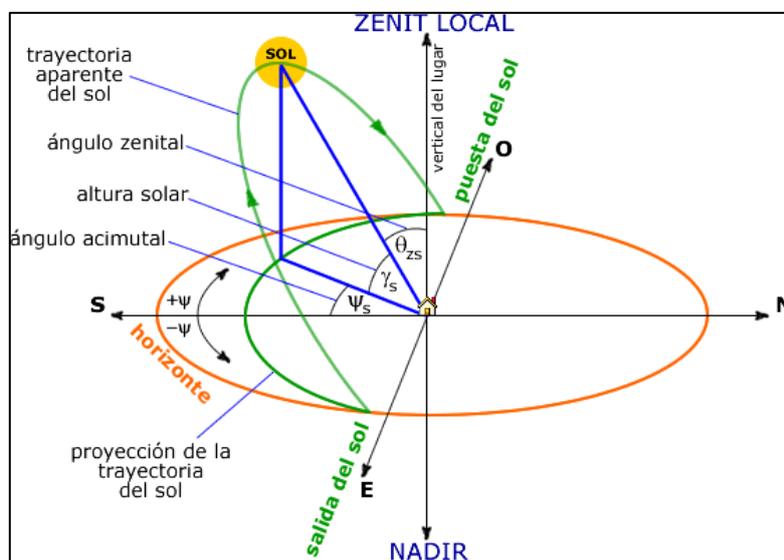


Figura 7. Posición del sol.

Fuente: [12]

El **azimut solar**  $\psi_s$  es un ángulo formado entre la proyección del sol sobre el horizonte y el sur.

La **altura solar**  $\gamma_s$  es el ángulo en un plano vertical entre los rayos del sol y la proyección de los mismos sobre el plano horizontal.

El **ángulo zenital**  $\theta_{zs}$  es el ángulo formado entre los rayos del sol y la normal al plano horizontal.

### 2.7.3 Inclinación y orientación de paneles

La inclinación óptima de los paneles solares depende principalmente de la latitud donde se encuentra ubicada la instalación. Esta inclinación varía diariamente a lo largo del año.

En instalaciones pequeñas el ángulo de inclinación es fijo o se cambia manualmente dos o cuatro veces al año.

Si la instalación de los paneles fotovoltaicos se encuentra en el hemisferio norte, entonces los mismos hay que orientarlos al hemisferio sur y viceversa.

Hay que tener precaución con la generación de posibles sombras ya que pueden afectar el funcionamiento de los paneles y causar pérdidas; esto se puede determinar si se conoce la altura solar y el azimut durante todo el año.

Para calcular la distancia mínima entre los módulos fotovoltaicos se presenta las siguientes expresiones, dada la siguiente figura:

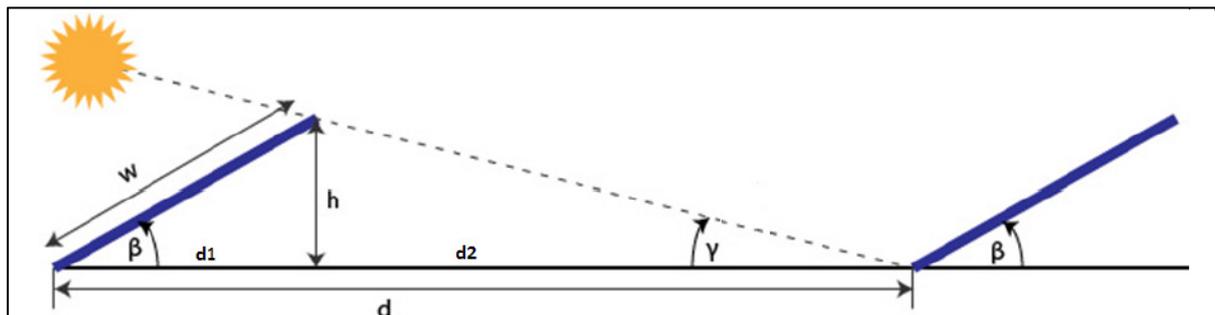


Figura 8. Cálculo de distancia mínima de paneles fotovoltaicos.

Fuente: [13]

Donde los ángulos son los siguientes:

$\gamma$ : Menor ángulo de la posición del sol respecto del observador.

$\delta$ : Inclinación de la tierra respecto al sol el día de menor ángulo.

$L$ : Latitud.

$\beta$ : Inclinación del panel solar.

El cálculo de  $d_1$ ,  $h$  y  $d_2$  vienen dados por las siguientes expresiones:

$$\gamma = 90 - \delta - L \quad (2.1)$$

$$d_1 = w * \cos(\beta) \quad (2.2)$$

$$h = d_1 * \tan(\beta) \quad (2.3)$$

$$d_2 = \frac{h}{\tan(\gamma)} \quad (2.4)$$

La distancia mínima entre los paneles viene dado por:

$$d: d_1 + d_2 \quad (2.5)$$

## 2.7.4 Componentes de una instalación solar fotovoltaica

Entre los principales componentes de la instalación fotovoltaica están los paneles solares y el inversor de conexión a red; en las siguientes secciones se presenta un análisis detallado de los componentes mencionados.

### 2.7.4.1. Paneles solares

Para aprovechar la energía radiante del sol se utiliza los paneles solares fotovoltaicos, los cuales son contruidos con materiales semiconductores que tienen determinadas características, y se pueden conectar eléctricamente de tal manera que produzcan tensiones y corrientes que pueden ser utilizados en aplicaciones cotidianas.

El principal componente de las células fotovoltaicas es el silicio que de acuerdo a la cantidad utilizada para la construcción se puede dividir en tres clases.

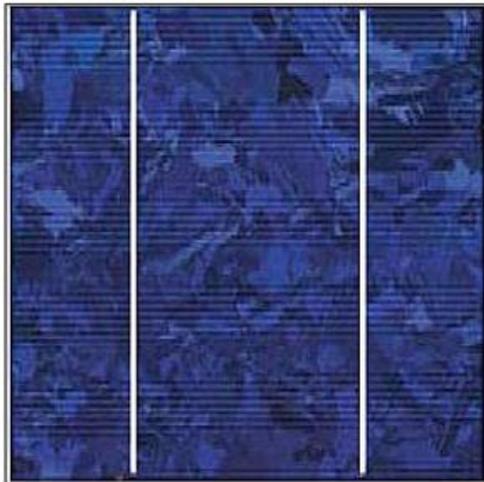
El **panel monocristalino** está formado por un silicio de alta pureza cuya célula tiene un solo cristal; estos son fáciles de reconocer por su color y aspecto uniforme tal como se presenta en la figura 9, además de que su eficiencia oscila entre el 11% y 16%.

El **panel policristalino** está formado por un silicio que se funde en bruto y se coloca en moldes cuadrados tal como se visualiza en la figura 10, provocando que cada cristal forme redes cristalinas diferentes; su eficiencia es menor que los paneles monocristalinos ya que oscila entre el 8% y 14%.

Otro tipo de panel fotovoltaico es el **amorfo** en el cual no existe una red cristalina sino que el material es depositado sobre unas capas finas que se unen entre sí, tal como se visualiza en la figura 11; la eficiencia de este tipo de panel se encuentra entre el 6% y 8%.



**Figura 9.** Panel fotovoltaico monocristalino.  
**Fuente: [1]**



**Figura 10.** Panel fotovoltaico policristalino  
**Fuente: [1]**



**Figura 11.** Panel fotovoltaico amorfo.  
**Fuente: [1]**

En concordancia con [1], a la hora de adquirir paneles fotovoltaicos hay que tener presente los siguientes parámetros de funcionamiento:

La **potencia máxima o pico**, en la curva tensión-intensidad (I-V) el panel tiene una potencia máxima que depende de la corriente pico  $I_p$  y la tensión pico  $V_p$ .

La **intensidad de cortocircuito**, es la corriente máxima del panel y se obtiene cuando en la célula se hace contacto sus bornes.

La **tensión de circuito abierto**, es la máxima tensión que se puede obtener en el panel fotovoltaico cuando no tiene ninguna carga conectada.

En base a la conexión o configuración de los módulos fotovoltaicos, es necesario tener presente los siguientes parámetros eléctricos.

La intensidad de cortocircuito  $I_{SC}$ , es igual al producto de la corriente de cortocircuito de un módulo por el número de filas conectadas en paralelo.

La tensión de circuito abierto  $V_{OC}$ , es igual al producto de la tensión en circuito abierto de un módulo por el número de módulos conectados en serie.

La potencia máxima o pico  $P_{MPP}$  es la potencia máxima que el panel fotovoltaico puede entregar.

La tensión en el punto de máxima potencia  $V_{MPP}$  es el voltaje de salida del módulo fotovoltaico a potencia máxima.

La intensidad en el punto de máxima potencia  $I_{MPP}$  es la corriente que entrega el módulo fotovoltaico a potencia máxima.

#### 2.7.4.2. Inversor de conexión a red

El inversor es uno de los componentes más importantes y utilizado en microrredes eléctricas; se encarga de transformar la corriente continua procedente del generador fotovoltaico en corriente alterna. El rendimiento del inversor oscila entre el 85% y 95%; y pueden ser de distintas clases como aislados, de conexión a red e híbridos; esto se visualiza en la siguiente figura.



**Figura 12.** Inversor de conexión a red  
**Fuente:** [14]

Cuando se trabaja con inversores es necesario tener presente los siguientes conceptos [1]:

La **tensión nominal**, es la tensión a la que se alimenta eléctricamente el inversor.

La **potencia nominal**, es la potencia que el inversor puede entregar de manera continua.

La **capacidad de sobrecarga**, es el tiempo que el inversor puede entregar una potencia superior a la nominal.

El **rendimiento**, es el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada del inversor.

La **forma de onda**, se caracteriza por ser una señal sinusoidal con un valor de tensión eficaz y su respectiva frecuencia, los cuales dependen de la región donde se instala el inversor.

Los inversores conectados a la red pueden ser monofásicos o trifásicos, en estos equipos la sincronización juega un papel importante en el funcionamiento de una microrred.

Para obtener la máxima potencia de los paneles solares; un inversor debería obtener la máxima potencia posible de un *array* intentando trabajar siempre en la llamada *knee* de la curva IV, además de que tiene que tener bajo consumo y responder con rapidez y precisión a los cambios de las condiciones ambientales.

### 2.7.5 Baterías

En acuerdo con [15], *“la batería eléctrica es un dispositivo que consta de una o más celdas electroquímicas que tienen la capacidad de convertir la energía química almacenada, en electricidad. A su vez cada celda tiene un cátodo o electrodo positivo y un ánodo o electrodo negativo, además posee electrolitos que facilitan el movimiento de los iones entre los electrodos facilitando que fluya la corriente eléctrica”*.

En una microrred la función principal de las baterías es almacenar energía cuando haya excedentes a coste cero y utilizarla cuando las fuentes renovables cuyo combustible primario no tiene coste no generen lo suficiente para cubrir la demanda.

Las diferencias en las tecnologías de fabricación de baterías definen el coste, la capacidad de almacenamiento de carga, su vida útil y tamaño.

Básicamente se diferencian dos tipos de baterías; las **baterías primarias** tienen la energía almacenada en reactivos químicos y se libera al conectarla a una carga en un solo ciclo; las **baterías secundarias** son aquellas donde las reacciones químicas que participan en la conversión de energía son reversibles permitiendo la acumulación y descarga de electricidad.

Las baterías utilizadas en microrredes son llamadas secundarias ya que permiten recargarse a partir de energía eléctrica revirtiendo el proceso electroquímico.

La tecnología de plomo ácido es la más madura, sus desventajas son la limitación en el número de ciclos de carga y descarga, la contaminación debido al electrolito y la baja densidad de energía que se traduce en peso y tamaño por lo que no son recomendables para sistemas que requieren movilidad o

portabilidad. El costo de esta tecnología es bajo y su eficiencia es cercana al 75%; es importante tener en cuenta las siguientes especificaciones técnicas en el manejo y operación de las baterías [13]:

La **tensión nominal**, es el voltaje por elemento de la batería, en el caso de las baterías de plomo ácido tienen 2 V/vaso.

La **capacidad de descarga**, es la cantidad total de carga en amperios hora (Ah) que puede suministrar la batería durante un tiempo  $t_N$  desde plena carga hasta alcanzar la tensión de corte  $V_d$  (1,8 V/vaso para plomo-ácido). Dicha capacidad depende de la corriente de descarga y de la temperatura.

La **capacidad nominal**, es la cantidad de carga que puede extraerse en 20 horas, a una temperatura de 20°C, hasta que la tensión entre terminales llegue a 1,8 V/vaso.

El **régimen de descarga o carga**, es la relación entre la capacidad nominal de la batería y el valor de la corriente a la que se realiza la descarga o carga. Con altas corrientes de descarga la capacidad de la batería es menor ya que las transformaciones internas son más superficiales.

La **vida de la batería**, se define como el número de ciclos que soporta la batería conservando una capacidad residual por encima del 80% de la capacidad nominal. El tiempo de vida disminuye cuando aumenta la profundidad de las descargas (DOD) y cuando aumenta la temperatura de trabajo. El nivel de descarga (DOD) viene definido por el porcentaje de descarga de la batería.

## 2.8. Energía Eólica

En concordancia con [16] *“La energía eólica es la energía obtenida del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es transformada en otras formas útiles para las actividades humanas”.*

Desde la antigüedad la energía eólica ha sido utilizada para actividades como movimiento de velas de barcos y movimiento de aspas de molinos.

*“El origen del viento está en la radiación solar, al estar el eje de la tierra inclinado, la radiación solar no es la misma en toda la tierra; esto produce temperaturas distintas en cada zona del planeta y por tanto, una densidad distinta, provocando un gradiente de presión que produce el movimiento del aire.*

*A escala planetaria el viento se produce por la diferencia de temperatura entre los polos y el Ecuador; el aire más caliente sube a la atmósfera y el frío baja.*

*La rotación de la tierra hace que en los hemisferios norte y sur el viento sople hacia el este por encima de aproximadamente 30° de latitud y al oeste por debajo” [13].*

A escala local el viento está influenciado por vientos o brisas marinas que se producen por la diferencia de temperatura entre el agua y la superficie terrestre; también intervienen los vientos de montaña que se suceden por la diferencia de temperatura entre el día y la noche.

En la actualidad, la energía eólica se utiliza para producir energía eléctrica a través de aerogeneradores, en muchos de los casos esta fuente de energía es más barata y competitiva con las fuentes de energía convencional.

La energía eólica es de origen renovable y podría integrarse como una fuente más en una microrred; además de que tiene más potencial en zonas urbanas donde las medidas de velocidad de viento son más altas y no hay obstáculos.

Para que la generación eólica sea rentable la velocidad de viento debe ser capaz de hacer generar al menos un 25-30% de la capacidad máxima de un aerogenerador eficiente en un año.

Para poder utilizar la energía del viento, es necesario que se obtengan velocidades mínimas de 3 m/s (*cut in speed*) y que no superen los 25 m/s (*cut out speed*).

La energía eólica tiene una ventaja sobre la energía fotovoltaica ya que requiere menos espacio y se puede generar por la noche, y puede ser un complemento para los pequeños consumidores.

### 2.8.1 Potencia del viento

Las palas de la turbina frenan el viento al capturar su energía cinética convirtiéndola en mecánica, por lo tanto el viento se moverá más lentamente a la salida del rotor.

Dado la cantidad de aire que pasa por la turbina es igual a la entrada y a la salida, el aire ocupará una mayor sección transversal a la salida, tal como se visualiza en la figura 13.

Este efecto en la turbina eólica se conoce como tubo de corriente; esta muestra cómo el área por la que pasa el viento va creciendo a la salida de la turbina, por tanto para mantener el caudal, el aire disminuye su velocidad.

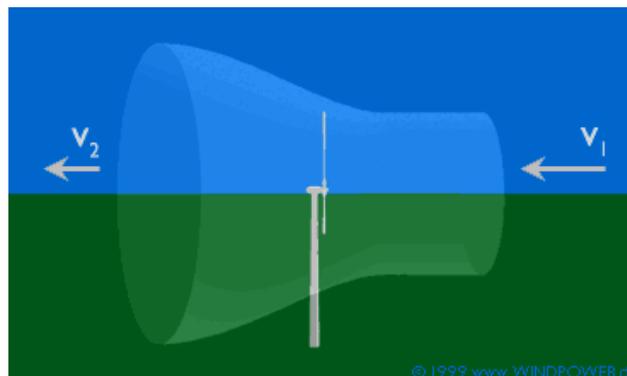


Figura 13. Flujo de viento a través de turbina eólica  
Fuente: [17]

La potencia que contiene el viento es proporcional al cubo de la velocidad y se calcula con la siguiente expresión:

$$P_{viento} = \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 \quad (2.6)$$

$\rho$ : Densidad del viento

$S$ : Superficie

$v$ : Velocidad del viento

“No toda la potencia del viento puede convertirse en mecánica debido a que para ello la velocidad del aire debería ser cero y esto no es posible” [13].

Otros factores que influyen en la velocidad del viento son ambientales como la temperatura de la zona, la orografía, la vegetación natural y estación del año; también existen factores artificiales que son obstáculos como casas, edificios y vallas.

### 2.8.2 Potencia máxima aprovechable límite de Betz

La máxima potencia que un aerogenerador puede obtener del viento convirtiendo la energía cinética en mecánica se conoce como límite de Betz; este principio se dio a conocer en el año de 1919 en el libro *Wind Energy*.

Como máximo se puede convertir en potencia en el eje 16/27 (59,26%) de la potencia del viento, por lo tanto la potencia máxima que podría entregar un aerogenerador es igual a:

$$P_{\max\_aprovech} = 0,5926 * \frac{1}{2} * \rho * S * v^3 \quad (2.7)$$

### 2.8.3 Determinación de potencia generada y rendimiento de un aerogenerador

La potencia real de un aerogenerador depende básicamente del diseño y la eficiencia, esto se calcula con la curva de velocidad del viento  $V_{viento}$  versus la potencia generada  $P_g$ ; tal como se observa en la figura 14.

Cada aerogenerador tiene su propia curva de potencia en función de la velocidad del viento y esta se encuentra fácilmente en su hoja técnica.

La ecuación de Betz proporciona la potencia máxima que es posible extraer de un aerogenerador, sin embargo no tiene en cuenta las características de funcionamiento de la máquina como:

- La resistencia aerodinámica de las palas.
- La compresibilidad del fluido.
- La interferencia de las palas.
- El rendimiento de los componentes del aerogenerador.

De esto se deduce que la potencia generada es inferior a la obtenida con la ecuación de Betz.

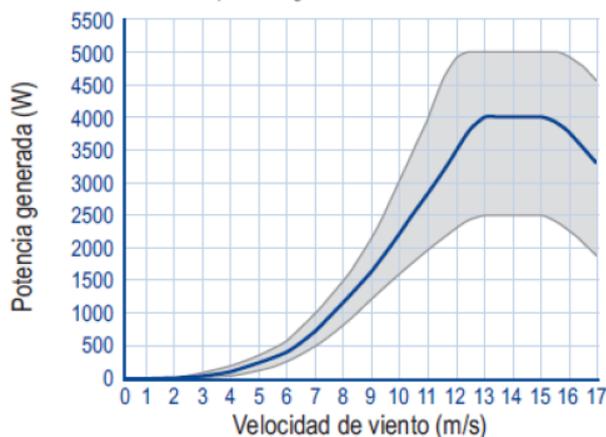


Figura 14. Curva de potencia de un aerogenerador.

Fuente: [13]

#### 2.8.4 Rosa de los vientos

La rosa de los vientos entrega información de la distribución de velocidades del viento y la frecuencia de variación de su dirección.

Esta se obtiene midiendo la velocidad y dirección del viento en el lugar de emplazamiento. Para que la información obtenida sea fiable se recomienda medir durante al menos 5 años y 8 veces al día. Si no es posible medir en el emplazamiento, se puede utilizar estadísticas de lugares cercanos donde haya un observatorio.

La distribución de la frecuencia de la dirección del viento es muy importante a la hora de implementar las turbinas eólicas en cuanto a la orientación del aerogenerador.

La representación gráfica de la velocidad y dirección del viento se lleva a un diagrama de círculos concéntricos, cuyos radios son a escala de las frecuencias de las velocidades en cada dirección; tal como se muestra en la figura contigua.

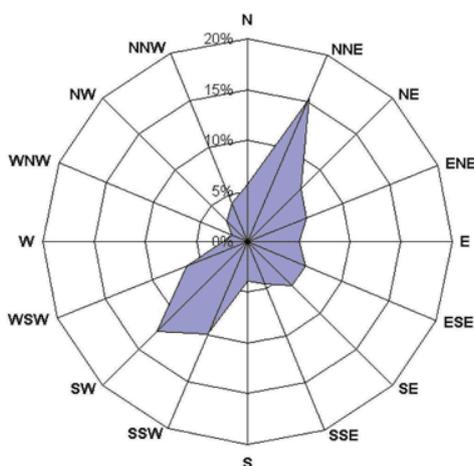


Figura 15. Rosa de los vientos.

Fuente: [18]

### 2.8.5 Distribución de Weibull

La variación del viento en un emplazamiento típico se describe utilizando la llamada distribución de *Weibull*.

Mediante el conocimiento de la distribución de la velocidad del viento, se logra determinar analíticamente el potencial energético y la energía anual que puede producir el aerogenerador. Con esta ley para una determinada ubicación y altura, se expresa el comportamiento de las velocidades para un año medio o tipo [19].

La distribución de *Weibull* se encuentra en función de dos parámetros; el **factor de escala c** y el **factor de forma k**; tal como se muestra en la siguiente expresión y figura:

$$f(v) = \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.8)$$

*k*: Factor de forma (adimensional)

*c*: Factor de escala  $\left(\frac{m}{s}\right)$

*v*: Velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

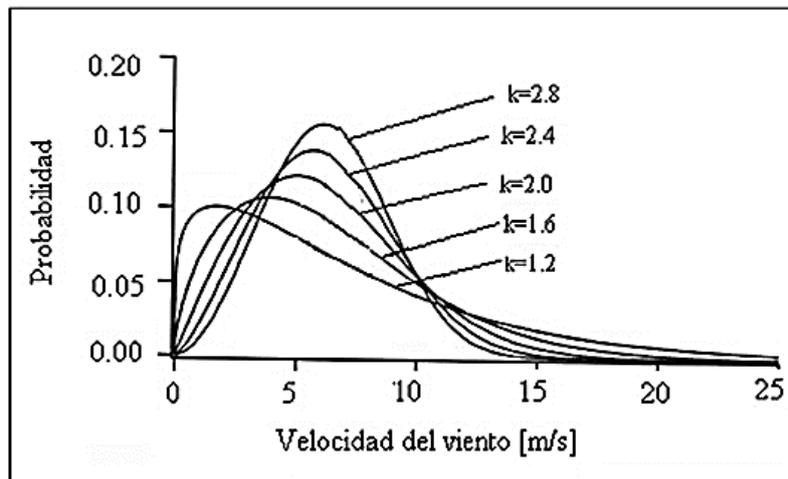


Figura 16. Distribución de Weibull para diferentes valores de k.

Fuente: [1]

El factor de distribución de forma k, representa la relación entre la energía obtenida en un año y la energía que se obtendría en ese año si la velocidad del viento se mantuviera constante e igual a la velocidad media [1].

### 2.8.5.1 Cálculo de los parámetros $c$ y $k$ mediante el método de mínimos cuadrados.

Para calcular los índices  $c$  y  $k$  se parte de la distribución acumulativa de Weibull la cual viene dada por:

$$\int_0^v f(v) dv = \int_0^v \frac{k}{c} * \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} * e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.9)$$

El método de mínimos cuadrados permite calcular los índices  $c$  y  $k$  con la transformación doble logarítmica de la distribución acumulativa de Weibull [45].

$$f(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (2.10)$$

Aplicando el primer logaritmo queda de la forma:

$$\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right) = \text{Ln}\left(e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right)$$

$$\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right) = e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k}$$

Aplicando el segundo logaritmo queda de la forma:

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right)\right] = \text{Ln}\left(e^{\left(\frac{v}{c}\right)^k}\right)$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right)\right] = k * \text{Ln}\left(\frac{v}{c}\right)$$

$$\text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right)\right] = k * \text{Ln}(v) - k * \text{Ln}(c) \quad (2.11)$$

Lo cual es similar a una ecuación de primer grado de la forma:

$$y = k * x + b \quad (2.12)$$

Donde:

$$y = \text{Ln}\left[\text{Ln}\left(\frac{1}{1-f(v)}\right)\right] \quad (2.13)$$

$$x = \text{Ln}(v) \quad (2.14)$$

$$b = -k * \text{Ln}(c) \quad (2.15)$$

En concordancia con [45] el factor forma  $k$  es la pendiente de la recta de regresión y  $b$  es el intercepto; los cuales se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$k = \frac{\sum(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sum(x-\bar{x})^2} \quad (2.16)$$

$$b = \bar{y} - k * \bar{x} \quad (2.17)$$

En donde  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  son la media de  $x$  e  $y$  respectivamente.

Por otra parte el factor de escala  $c$ , está en función del intercepto  $b$  de la recta de regresión.

$$b = -k * \text{Ln}(c) \quad (2.18)$$

$$c = e^{\left(\frac{h}{k}\right)} \quad (2.19)$$

### 2.8.6 Corrección de la distribución de Weibull por la altura.

Por lo general los valores del factor de forma  $k$  y el factor de escala  $c$ ; vienen dados a una determinada altura, por lo que para obtenerlos a una altura diferente se utiliza las siguientes expresiones:

$$k' = k * \frac{1-0,088*\ln\left(\frac{h}{10}\right)}{1-0,088*\ln\left(\frac{h'}{10}\right)} \quad (2.20)$$

$$c' = c * \left(\frac{h'}{h}\right)^\beta \quad (2.21)$$

$$\beta = \frac{0,37-0,088*\ln(c)}{1-0,088*\ln\left(\frac{h}{10}\right)} \quad (2.22)$$

$k$ : Factor de forma (adimencional)

$c$ : Factor de escala  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$v$ : Velocidad del viento  $\left(\frac{m}{s}\right)$

$k'$  y  $c'$  son los valores no disponibles a una altura  $h'$

### 2.8.7 Aerogeneradores en microrredes

Existen diferentes tipos de aerogeneradores entre los principales están los de eje horizontal y los de eje vertical; tal como se muestra en la siguiente figura.

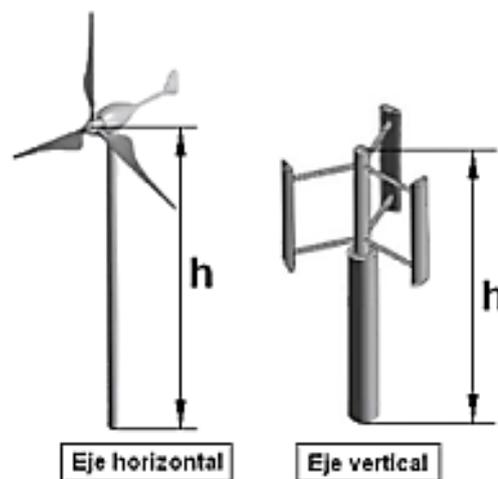


Figura 17. Aerogenerador de eje horizontal y eje vertical.  
Fuente: [20]

Los aerogeneradores de eje horizontal tienen el eje de rotación paralelo a la dirección del viento. De acuerdo a la velocidad de giro estos se pueden dividir en aerogeneradores lentos, rápidos y de velocidad intermedia.

Los aerogeneradores de eje vertical, tienen su eje de rotación perpendicular a la dirección del viento; pueden ser del tipo sanovius o darrieus.

En cuanto a los aerogeneradores utilizados en minieólica cuyas potencias van desde los 50W hasta 1.000W, se recalca los de tipo síncrono de imanes permanentes, con los imanes ubicados en rotor.

A menudo tienen un número de polos elevado para tener velocidades nominales más bajas.

En las aplicaciones de aerogeneradores minieólicos está el uso en zonas aisladas, instalaciones con gran consumo e incluso conexión a la red.

### 2.8.8 El regulador en sistemas eólicos

La función del regulador en los sistemas eólicos es transformar la energía generada de corriente alterna a corriente continua.

En instalaciones aisladas con batería conectadas al bus de continua, controla el estado de la batería evitando sobrecargas de la misma y controlando el funcionamiento del aerogenerador.

El regulador también tiene como función controlar la energía suministrada de tal manera de que no existan sobrecargas, protegiendo al acumulador y a la instalación.

En concordancia con [1], algunos conceptos que hay que tener presente en el manejo de reguladores son los siguientes:

*“La **tensión nominal**; es la tensión nominal del sistema, algunos modelos de reguladores se seleccionan manualmente o automáticamente.*

*La **intensidad nominal**; es la intensidad nominal procedente de la instalación.*

*La **tensión corte de sobrecarga**; es el máximo voltaje que el regulador permite que alcance la batería.*

*La **tensión de rearme de carga**; es el valor de voltaje al que se reconecta el sistema para cargar la batería.*

*La **tensión corte de sobredescarga**; es el valor mínimo de voltaje antes de desconectar el consumo.*

*La **tensión de rearme de descarga**; es el valor de voltaje que reconecta el consumo a la batería”.*

## CAPITULO 3: ESTADO DEL ARTE

### 3.1. Últimas tecnologías utilizadas en microrredes

Las microrredes facilitan la utilización óptima de energía renovable distribuida, ya que proporcionan un mejor suministro de energía local y reduce las pérdidas en la transmisión de energía y en la emisión de gases de efecto invernadero.

La tendencia de las microrredes es que tengan capacidades como la autoreparación, la participación en la red de los consumidores y sobre todo la operación eficiente de la red eléctrica.

Las microrredes se componen de varias tecnologías básicas para el funcionamiento como es la generación distribuida, el almacenamiento distribuido, la interconexión de conmutadores y sistemas de control. Uno de los grandes desafíos técnicos es el diseño, la aceptación y la disponibilidad de tecnologías de bajo costo para permitir la interconexión y uso seguro de microrredes.

Con respecto a la confiabilidad se hace estudios de implementación de interruptores inteligentes, de tal manera que la interrupción a las cargas sea mínima y se conserve la calidad de onda tanto en magnitud como en frecuencia; considerando también la sincronización con la red eléctrica. Estos interruptores tienen la capacidad de hacer funcionar en isla a la microrred cuando se produce cualquiera de las 1.547 perturbaciones establecidas en la IEEE o cualquier otro factor que afecte la calidad de la energía; también permite el control de potencia reactiva mediante la variación de la tensión [21].

También se está realizando estudios en microrredes sobre el impacto de la energía eólica debido a que produce problemas por la gran fluctuación del viento y la generación de armónicos en la tensión de salida [22]. Para esto se propone nuevos métodos que logran la mitigación de armónicos mediante la estabilización de la tensión, a través de un controlador de tensión avanzado que está formado por un transformador multidevanado; el cual muestra eficacia mediante los cálculos teóricos realizados así como las simulaciones y resultados experimentales.

De igual manera se ha elaborado un algoritmo llamado *Método integral de detección de isla*; que sintetiza y facilita la detección de isla de una microrred tanto en modo local como remoto [23], demostrando también que tiene una buena viabilidad económica, además de una fácil adaptación a la expansión o cambio de la topología de la red.

De acuerdo con [5], actualmente alrededor del mundo se tiene algunas instalaciones de microrredes tanto en corriente alterna como en corriente continua que sirven de prototipos de prueba, para analizar los beneficios económicos, técnicos y ambientales de la energía, en cuanto a microrredes de C.A.; se visualiza algunos proyectos en la siguiente tabla.

**Tabla 2.** Prototipos de microrredes de C.A. en el mundo.

Fuente: [5]

Componentes de Microrred	Ubicación	Nivel de Voltaje	Frecuencia	Capacidad
Arreglo PV, generador diésel, banco de baterías	Kythnos, Isla Griega	1 Fase LVAC	50 Hz	12 kWp del arreglo PV, 85 kWh desde el banco de baterías
Arreglo PV, Turbinas eólicas, máquinas de gas digestor controlable y banco de baterías de ácido	Hachinohe, Japón	No especificado	50 Hz	Demanda: 610 kW; Potencia generada por arreglo PV y turbina eólica: 150kW; Máquina de gas digestor: 510kW; Baterías: 100kW
Arreglo PV y Sistema de almacenamiento de energía en baterías	Áreas rurales en Senegal	220 V	50 Hz	0,5-10 kW por hogar
Dos turbinas de vapor, dos generadores diésel y una fuente convertidor-interfaz		94 V (pk); 115 V(rms)	60 Hz	3 MW
Máquinas de gas, Turbinas eólicas, Capacitor eléctrico de doble capa, Sistema de almacenamiento de energía en baterías	Japón	110,230,240V	50-60 Hz	50 kW-2MW
Celdas de combustible, Arreglo PV, Turbinas eólicas, Sistema de almacenamiento de energía y uso de la red convencional AC	Porto, Portugal	400 V	50 Hz	50-200 kW

En algunos países también existen prototipos de microrredes en C.C.; se presenta algunos proyectos en la siguiente tabla.

**Tabla 3.** Prototipos de microrredes de C.C. en el mundo.

**Fuente: [5]**

Componentes de Microrred	Ubicación	Nivel de Voltaje	Capacidad
Centro de Datos IBM	Suecia	24-350/380 LVDC	≥5 MW
Centro de datos	Japón	380/400 LVDC	≥5 MW
Centro de datos de telecomunicaciones	Nueva Zelanda	220 LVDC	0,5-5 MW
Centro de Datos de Intel Corp.	EEUU	400 LVDC	≥5 MW
Caso general	No especificado	187,8 V- 450 LVDC	600-2.100 MW
Dos turbinas de vapor- Prototipo de prueba	No especificado	800 V- 1.200 LVDC	4,8-18 kW
Arreglo PV, Sistema de almacenamiento de energía en baterías y sistema convencional A.C.	No especificado	180-210 V LVDC (modelo); 360 V - 420 LVDC (prototipo experimental)	150-945 W
Turbina eólica con generador síncrono de imanes permanentes, Sistema de almacenamiento de energía en baterías y sistema convencional A.C.	No especificado	1.200 LVDC	0,9-3,5 MW
Cogeneración con máquina de gas, Capacitor eléctrico de doble capa, Sistema de almacenamiento de energía en baterías. Arreglo PV y sistema convencional A.C.	No especificado	170 V, 340 LVDC	700-2.700 W
Caso general prototipo de prueba	No especificado	200,400,415 LVDC	5kW, 15 kW

### 3.2. Energías renovables en Ecuador

El Ecuador es un país donde se fomenta el uso de energías renovables no convencionales, tales como la biomasa, biogás, geotérmica, eólica y fotovoltaica, esto se encuentra estipulado en la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica.

El MEER mediante su informe del cambio de la Matriz Energética del Ecuador estipula que para el año 2020 el Ecuador debe contar con un 2% de tecnologías renovables no convencionales (1% solar o eólica, 1% biomasa); adicional se tiene 3.023 MW de potencia hidráulica en construcción y un aproximado de 900 MW de recurso eólico [24].

Con el objeto de impulsar las energías renovables y la eficiencia energética en el Ecuador se creó el INER Instituto Nacional de Eficiencia Energética, el cual lleva adelante los siguientes proyectos [25]:

- Uso de energías alternativas en el transporte marítimo de pasajeros en Galápagos; el cual tiene como objetivo diseñar y construir una barcaza prototipo que sea alimentada eléctricamente a través de paneles solares fotovoltaicos.
- Análisis del comportamiento de un parque eólico en condiciones extremas, que analizará el comportamiento del parque eólico Villonaco frente a las turbulencias y vientos verticales propios de la zona del proyecto.
- Plan de líneas de investigación para el desarrollo de la geotermia, que se enfoca en el desarrollo de esta rama debido a que se estima un potencial de 1.700 MWe de acuerdo al *Geothermal energy, the potential for clean power from the earth*.
- Estudio para uso de suelo como sumidero de calor para el reemplazo de torres de enfriamiento evaporativos; el cual beneficiará a las edificaciones de la ciudad de Guayaquil mediante la implementación de sistemas de climatización que utilicen bombas de calor geotérmicas.
- Métodos para el control de calidad y complementación de datos en parámetros meteorológicos relacionados con la utilización de energías renovables; para esto se repotenciarán 56 estaciones meteorológicas que darán información fidedigna para desarrollar mapas de radiación solar con alta resolución.
- Modelo cinético e implementación de reactor piloto para cogasificación de residuos sólidos y carbón vegetal para producción de combustibles; que se realizará mediante un modelo cinético de gasificación de biomasa que será validado mediante experimentación en una planta piloto para posteriormente ponerlo a disposición y elaboración de unidades a mayor escala.

### 3.3. Políticas de incentivo de energías renovables en el Ecuador

Para desarrollar políticas que se basan en tecnologías hay que tener en cuenta la etapa de desarrollo en las que se encuentran cada una, así como los costos, rendimientos y viabilidad económica.

El Ecuador es un país donde se incentiva el uso de energías renovables, esto se puede ver claramente en el **artículo 67** de la **Ley del Régimen de Sector Eléctrico**, en donde se estipula que se “*exonerará el pago de aranceles, demás impuestos adicionales y gravámenes que afecten a la importación de materiales y equipos no producidos en el país, para la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas destinados a la utilización de energía solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras...*”. Y en el mismo artículo se menciona la exoneración de impuestos a la renta durante cinco años de las empresas que instalen y operen centrales de producción de electricidad usando los recursos energéticos no convencionales [26]. Lo antes descrito se confirma más aún con el **Código de la Producción** en el **artículo 24**, en el **numeral 2**; indica que se exonerará durante cinco años el impuesto a la renta de manera total de los sectores que contribuyan al cambio de la matriz energética del Ecuador.

### **3.4. Microrredes en el Ecuador.**

De acuerdo al censo de población y vivienda del año 2010, el porcentaje de viviendas con energía eléctrica alcanzó el 94,77% en el sector urbano y el 89,03% en el sector rural; es por esta razón que el MEER promueve la adecuada y exitosa gestión de proyectos de electrificación rural con energía renovable no convencional.

Actualmente se han realizado pre proyectos de diseño de sistemas híbridos como el de un sistema de generación de energía que satisfaga la demanda eléctrica de una comunidad ubicada en una isla en el golfo de Guayaquil; este diseño se realizó con la ayuda del software HOMER; en donde se simularon cinco diferentes tipos de demanda de casas modelo [27].

Paralelamente se ha ejecutado investigación sobre implementación de un sistema de control difuso para el deslastre de cargas para la operación confiable de una microrred aislada con generador principal diésel. Este método de control se lo desarrolló en MATLAB con el objeto de que el voltaje generado por la fuente pueda mantener su estabilidad en un valor determinado y obtenga un mejor desempeño de la microrred eléctrica y una óptima distribución y consumo de la energía disponible en ella [28].

Se ha planteado también una simulación de un modelo dinámico, para proyectar la oferta y la demanda de energía eléctrica en una microrred compuesta por una vivienda con generación fotovoltaica y eólica. La carga se proyecta mediante la cuantificación de la cantidad de aparatos eléctricos utilizados en una vivienda convencional [29].

De igual manera se ha implantado un algoritmo en MATLAB para realizar intercambios de energía entre microrredes eléctricas basados en la Teoría de Juegos de Coalición; esto con el objeto de reducir las pérdidas de energía en los sistemas de distribución y optimizar los pagos de energía entre compradores y vendedores [30].

### **3.5. Energía eólica en Ecuador.**

Actualmente en el Ecuador la energía eólica se encuentra en desarrollo; es así que se han implementado algunos proyectos como el parque eólico en la isla San Cristóbal ubicado en el archipiélago de Galápagos el cual tiene una potencia de 2,4 MW. De igual manera el proyecto Baltra - Santa Cruz con una potencia de 3,2 MW, ubicado en el mismo archipiélago.

Otro proyecto emblemático es el parque eólico Villonaco, el cual está instalado a 2.720 m.s.n.m. en la ciudad de Loja al sur de Ecuador, la potencia nominal de este parque eólico es de 16,5 MW, aportando 60 millones de kWh/año reduciendo así las emisiones de CO<sub>2</sub> en 35 mil Ton/año [31].

El Gobierno del Ecuador a través del MEER, ha iniciado campañas para realizar la medición del viento a diferentes alturas (40, 60 y 80 metros), en provincias como Loja e Imbabura; con el objeto de determinar la factibilidad de construir parques eólicos.

En el año 2013 el MEER presento el Atlas Eólico del Ecuador, el cual se elaboró mediante mapeo satelital y se determinó que en el Ecuador existe un potencial disponible de 1.670 MW [32].

### 3.6. Energía fotovoltaica en Ecuador.

El estado ecuatoriano se proyecta a la creación de una nueva oferta energética, que tiene como directrices el uso de energías renovables orientadas siempre al ahorro y a la eficiencia energética; adicionalmente se desea brindar el servicio eléctrico a los sectores rurales que carecen del mismo e impulsarlos en el desarrollo agropecuario, artesanal y comercial.

Potencialmente la ubicación del Ecuador permite que se tenga el recurso del sol durante todo el año, y de acuerdo con el Atlas Solar del Ecuador se tiene una radiación de 4.574,99 Wh/m<sup>2</sup>/día [24].

Con el objeto de conservar la reserva ecológica del archipiélago de Galápagos, se está desarrollando el proyecto cero combustibles fósiles, con el cual se ha instalado 200 kWp en la isla Baltra; 1,5 MWp en Puerto Ayora y 1,15 MWp en la isla Isabela [24].

También se construyeron centrales fotovoltaicas en el Ecuador continental, ubicados en las provincias de Imbabura, Pichincha, Manabí, Santa Elena entre otras con una capacidad de 272 MW [33].

Existen empresas de distribución eléctrica que han instalado en sus edificios paneles fotovoltaicos; es el caso de la Empresa Eléctrica Regional CENTROSUR que tiene una capacidad de potencia de 28 kWp y el edificio del CENACE con 44 kWp.

Existen también algunos proyectos de electrificación rural que lleva adelante el MEER; los cuales se mencionan brevemente a continuación [34]:

- Programa Eurosolar; el cual consiste en la entrega de una torre con 7 paneles fotovoltaicos con una capacidad de 1,1 kWp y equipamientos para acceso a las telecomunicaciones; beneficiara a 39.629 habitantes.
- Consolidación de las energías renovables en el norte Amazónico Ecuatoriano; cuyo objetivo es vincular a la población con el uso y mantenimiento de las instalaciones de energía renovable.
- Fortalecimiento de la Unidad de Energía Renovable en la E.E.A.S.A.; el cual pretende identificar y presentar proyectos con energías renovables, para luego buscar su financiamiento.
- Observatorio de Energía renovable en Morona Santiago.
- Electrificación rural con energías renovables en zonas aisladas del Ecuador – Proyecto BID/GEF; mediante el cual se dictan talleres de Diseño y Evaluación de proyectos de electrificación rural en zonas aisladas con energía solar fotovoltaica, con el objeto de que se desarrollen con éxito los proyectos a ejecutar.

### 3.7. Normativa

En enero de 2015 se aprobó la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica; en el que uno de sus objetivos es desarrollar mecanismos para aprovechar técnica y económicamente los recursos energéticos del país, haciendo énfasis en las energías renovables [35].

El ente regulador del sector eléctrico es la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL); que en la regulación **ARCONEL-004-15** de Requerimientos Técnicos para la Conexión y Operación de Generadores Renovables No Convencionales a Las Redes de Transmisión y Distribución [36], hace referencia a los requisitos técnicos que deben cumplir los generadores de energía con fuentes no convencionales, con el objeto de mantener la calidad y confiabilidad de la energía. En esta misma regulación en el **numeral 5**, se establece las pruebas y certificaciones que deben cumplir los equipos de acuerdo a la tecnología que se vaya a utilizar.

En cuanto a los generadores eólicos en el **numeral 5.1.2**, se plantea realizar los las siguientes pruebas:

- Prueba de desempeño de potencia del aerogenerador, mediante la cual se obtendrá la curva de potencia del aerogenerador en el lugar de emplazamiento y así determinar la producción anual de energía.
- Medición y evaluación de la calidad de potencia de las turbinas eólicas conectadas a la red; con el que se analizará el impacto de las turbinas en la calidad de la energía.
- Certificado de conformidad; con lo cual se verifica que el aerogenerador cumple con todos los requerimientos técnicos.

Por su parte para la energía solar fotovoltaica en el **numeral 5.1.3**, indica que los inversores fotovoltaicos deben cumplir con las siguientes especificaciones técnicas:

- Deben poseer mecanismos de tal forma que se prevenga la generación de isla no intencional.
- La onda de tensión generada debe cumplir con las especificaciones de calidad estipuladas en esta misma regulación.

Así mismo en el **capítulo III** de esta regulación **ARCONEL-004-15**; se presenta los requisitos operativos como el control de potencia activa; control de potencia reactiva, voltaje y calidad del producto.

En cuanto al Procedimiento de Calificación y Registro de Proyectos de Generación de Energías Renovables No Convencionales menores a 1 MW; se encuentra vigente la regulación **CONELEC-002-13**; en donde se presentan las directrices que deben cumplir los proyectos de generación de energías renovables menores a 1 MW [37], para obtener su registro en el CONELEC, así como su tratamiento en los aspectos comerciales, técnicos y de control.

Adicionalmente se tenía la regulación **CONELEC-001-13**; en donde indicaba la Participación de los generadores de energía eléctrica producida con Recursos Energéticos Renovables no Convencionales; específicamente se presentaba los precios y despacho de energía en período preferente y ordinario;

dependiendo de cada una de las tecnologías que se esté utilizando, pero desde julio 2016 esta regulación fue derogada mediante la resolución **ARCONEL-031-16**; esperando así un nuevo marco normativo en función de la LOSPEE **[38]**.

## CAPITULO 4: ANÁLISIS DE DATOS, CÁLCULOS Y DISEÑO

### 4.1 Análisis de la curva de carga

El objeto del presente trabajo es realizar el diseño de una microrred eléctrica aislada basada en renovables, para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; por lo que primero se define el sitio de emplazamiento.

El lugar donde se desarrollará el diseño del presente trabajo es en el sector del Tablón; el cual se encuentra a una altura de 1.694 metros; ubicado en la provincia del Azuay; cantón Santa Isabel; al sur del Ecuador.

Las coordenadas del sitio de emplazamiento se visualizan en la siguiente tabla y figura respectivamente:

**Tabla 4.** Coordenadas del sitio de emplazamiento de la carga.

Fuente: Propia

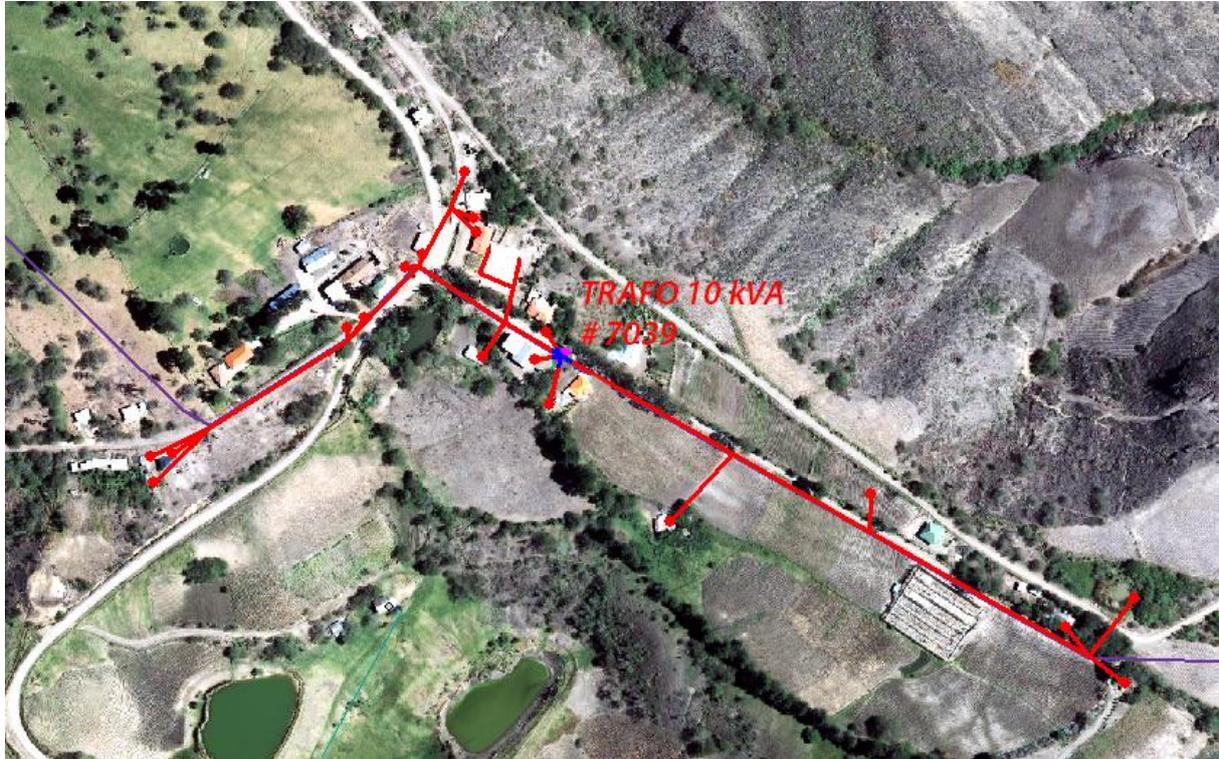
COORDENADAS	UTM WGS 1984	DECIMAL	GRADOS
LATITUD	677309,0149	3,30342657	3° 18' 12,3357"
LONGITUD	9634725,733	79,40414068	79° 24' 14,9065"



**Figura 18.** Ubicación geográfica del sitio de emplazamiento del diseño.

Fuente: [39]

Una vez definido el sitio de emplazamiento se procede a analizar el comportamiento de la demanda; para lo cual se ha tomado como punto de partida la carga conectada a la estación de transformación número 7039 de 10kVA; el cual se encuentra ubicado en las coordenadas presentadas en la tabla 4 y se visualiza en la siguiente figura.



**Figura 19.** Ubicación geográfica de transformador número 7039 -10 kVA.

**Fuente:** [40]

Para determinar la curva de carga se analiza las mediciones realizadas en la estación de transformación número 7039; las mismas que fueron proporcionadas por la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.

Estas mediciones se realizaron durante una semana con intervalos de 10 minutos cada una; las mismas que se midieron desde las 0:00 horas del día domingo 20 de diciembre de 2015 hasta las 23:50 horas del día sábado 26 de diciembre de 2015.

Es importante indicar que es una ventaja tener las mediciones de una semana del mes de diciembre, ya que en este mes se presenta el día de mayor de consumo debido a las cargas conectadas por temporada de navidad y fin de año.

Con los datos obtenidos se determina el consumo de energía horaria; lo cual se puede visualizar en la siguiente tabla.

**Tabla 5.** Consumo semanal de energía, transformador 7039 de 10 kVA.

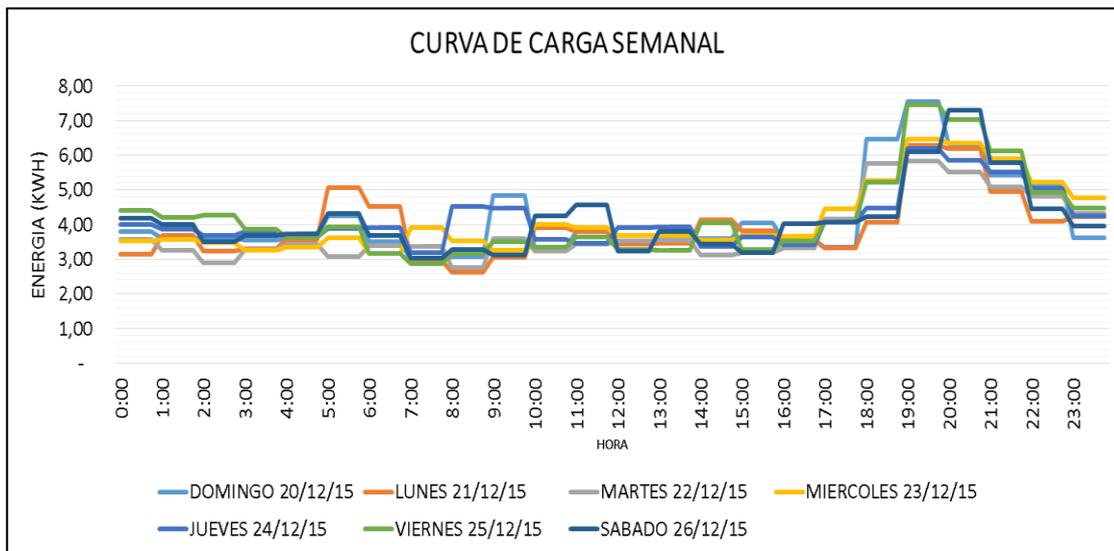
Fuente: Propia

HORA	CONSUMO DE ENERGÍA (kWh)						
	DOMINGO	LUNES	MARTES	MIÉRCOLES	JUEVES	VIERNES	SÁBADO
	20/12/2015	21/12/2015	22/12/2015	23/12/2015	24/12/2015	25/12/2015	26/12/2015
0:00	3,80	3,15	3,58	3,54	4,01	4,41	4,19
1:00	3,59	3,69	3,25	3,57	3,87	4,20	4,00
2:00	3,62	3,24	2,90	3,49	3,68	4,27	3,52
3:00	3,54	3,31	3,28	3,25	3,79	3,86	3,68
4:00	3,61	3,57	3,43	3,35	3,64	3,64	3,73
5:00	4,26	5,06	3,08	3,62	3,90	3,94	4,33
6:00	3,50	4,53	3,40	3,17	3,91	3,18	3,69
7:00	2,99	2,97	3,36	3,92	3,19	2,88	3,03
8:00	3,09	2,62	2,77	3,53	4,52	3,16	3,28
9:00	4,83	3,05	3,59	3,27	4,47	3,51	3,13
10:00	3,31	3,92	3,24	4,01	3,58	3,35	4,26
11:00	3,80	3,79	3,45	3,92	3,47	3,63	4,56
12:00	3,44	3,43	3,53	3,69	3,90	3,28	3,23
13:00	3,59	3,46	3,56	3,69	3,93	3,25	3,81
14:00	3,60	4,13	3,13	3,56	3,38	4,05	3,44
15:00	4,04	3,81	3,18	3,68	3,64	3,28	3,18
16:00	3,54	3,55	3,32	3,67	3,41	3,52	4,02
17:00	3,35	3,34	4,15	4,45	4,06	4,07	4,08
18:00	6,47	4,06	5,76	5,27	4,47	5,23	4,22
19:00	7,55	6,27	5,83	6,46	6,18	7,45	6,11
20:00	6,33	6,20	5,51	6,35	5,85	7,02	7,30
21:00	5,43	4,95	5,08	5,91	5,52	6,13	5,78
22:00	5,17	4,10	4,81	5,22	5,03	4,93	4,45
23:00	3,61	4,23	4,31	4,77	4,24	4,48	3,96
<b>TOTAL (kWh)</b>	<b>100,07</b>	<b>94,43</b>	<b>91,47</b>	<b>99,36</b>	<b>99,67</b>	<b>100,74</b>	<b>98,97</b>

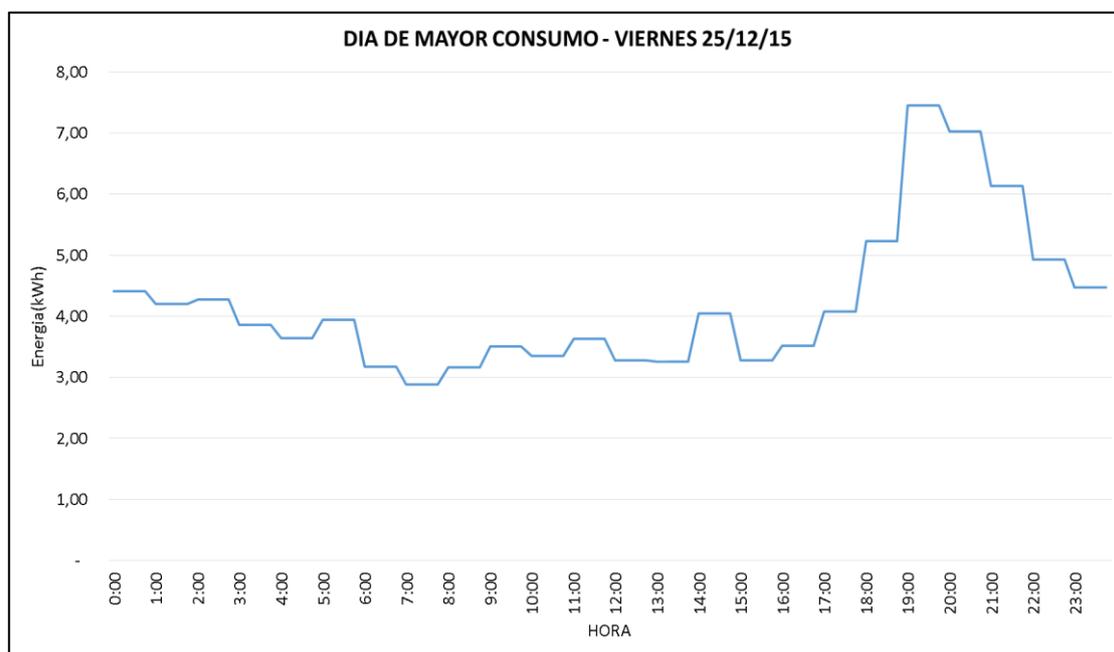
Con los datos de la tabla 5, que son datos de mediciones reales, se realiza una gráfica para poder visualizar de mejor manera los valores medidos; lo cual se presenta en la figura 20.

También se observa que el día de mayor consumo es el viernes 25 de diciembre de 2015, el cual registra un valor de 100,74 kWh; esta curva de carga se visualiza en la figura 21 y el registro de consumo en la figura 22.

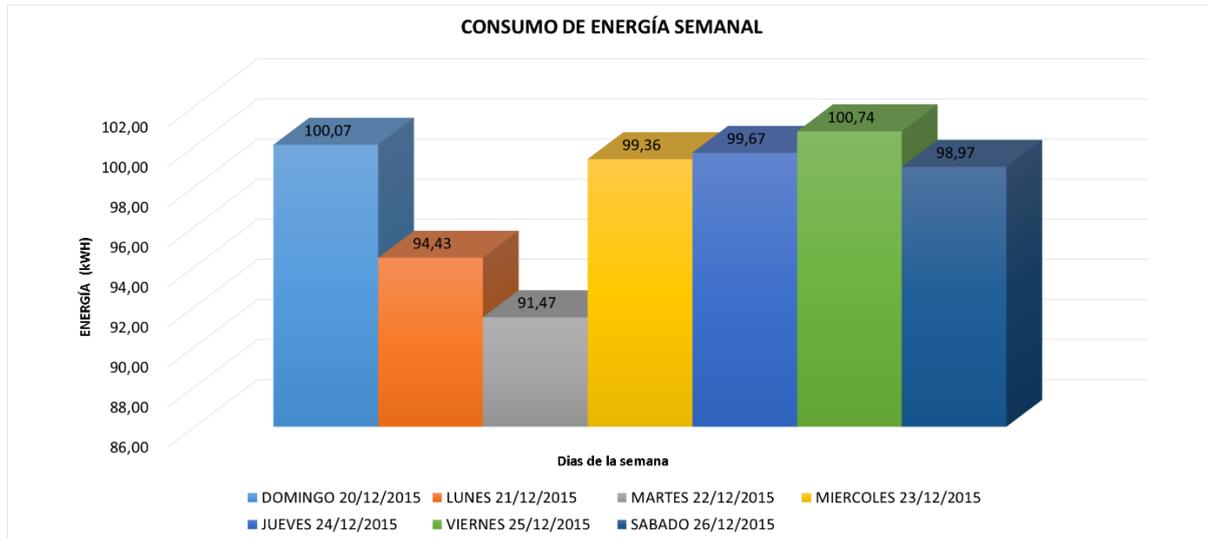
De igual manera se determina que el pico de demanda máxima se da en el día miércoles 23 de diciembre a las 19:20 con un valor de 9,031 kW.



**Figura 20.** Curva de carga semanal estación de transformación 10 kVA.  
Fuente: Propia.



**Figura 21.** Curva de carga día de mayor consumo estación de transformador 10 kVA  
Fuente: Propia.



**Figura 22.** Consumo de energía semanal, transformador 10 kVA.  
**Fuente:** Propia.

Con los datos de la tabla 5; se obtiene la demanda media horaria para posteriormente obtener la demanda media diaria la cual alcanza un valor de 97,81 kWh; lo cual se visualiza en la tabla 6.

Con la demanda media diaria se proyecta la demanda media mensual; la cual se visualiza en la tabla 7 y figura 23 respectivamente; y así estimar la demanda de energía anual la cual alcanza un valor de 35.702,31 kWh.

**Tabla 6.** Consumo semanal de energía media, trafo 7039.

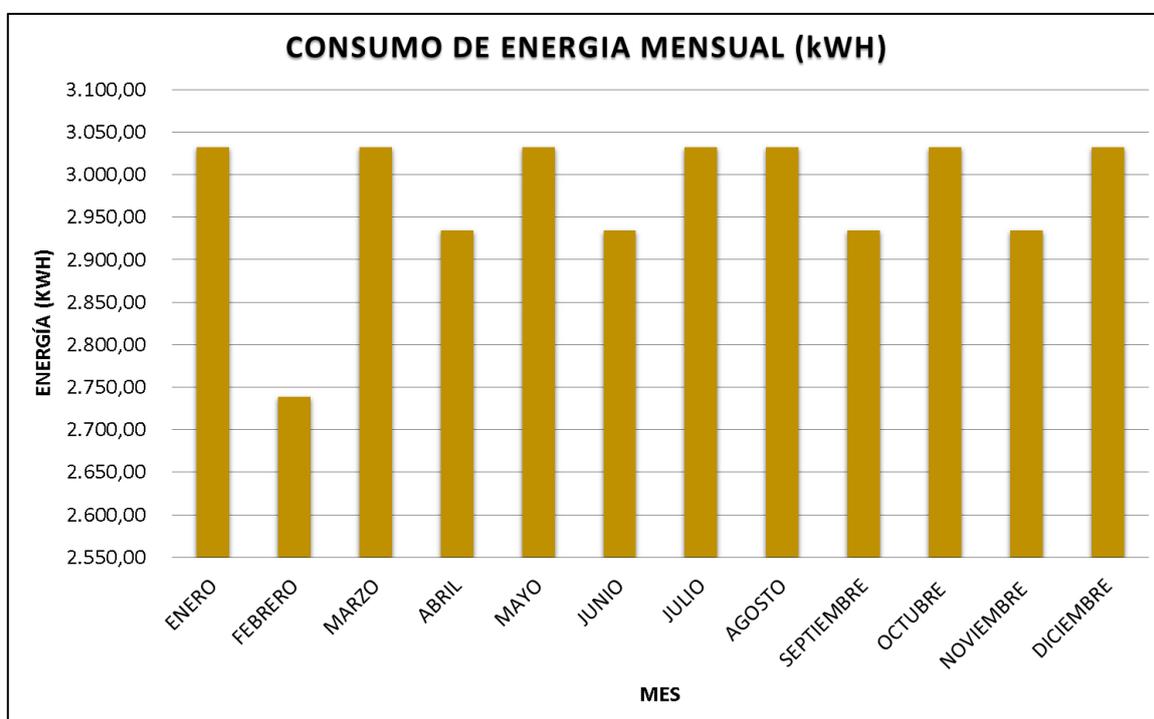
Fuente: Propia

HORA	Energía (kW)							ENERGÍA MEDIA (kWh)
	DOMINGO 20/12/2015	LUNES 21/12/15	MARTES 22/12/15	MIÉRCOLES 23/12/15	JUEVES 24/12/15	VIERNES 25/12/15	SÁBADO 26/12/15	
0:00	3,80	3,15	3,58	3,54	4,01	4,41	4,19	3,81
1:00	3,59	3,69	3,25	3,57	3,87	4,20	4,00	3,74
2:00	3,62	3,24	2,90	3,49	3,68	4,27	3,52	3,53
3:00	3,54	3,31	3,28	3,25	3,79	3,86	3,68	3,53
4:00	3,61	3,57	3,43	3,35	3,64	3,64	3,73	3,57
5:00	4,26	5,06	3,08	3,62	3,90	3,94	4,33	4,03
6:00	3,50	4,53	3,40	3,17	3,91	3,18	3,69	3,62
7:00	2,99	2,97	3,36	3,92	3,19	2,88	3,03	3,19
8:00	3,09	2,62	2,77	3,53	4,52	3,16	3,28	3,28
9:00	4,83	3,05	3,59	3,27	4,47	3,51	3,13	3,69
10:00	3,31	3,92	3,24	4,01	3,58	3,35	4,26	3,67
11:00	3,80	3,79	3,45	3,92	3,47	3,63	4,56	3,80
12:00	3,44	3,43	3,53	3,69	3,90	3,28	3,23	3,50
13:00	3,59	3,46	3,56	3,69	3,93	3,25	3,81	3,61
14:00	3,60	4,13	3,13	3,56	3,38	4,05	3,44	3,61
15:00	4,04	3,81	3,18	3,68	3,64	3,28	3,18	3,54
16:00	3,54	3,55	3,32	3,67	3,41	3,52	4,02	3,58
17:00	3,35	3,34	4,15	4,45	4,06	4,07	4,08	3,93
18:00	6,47	4,06	5,76	5,27	4,47	5,23	4,22	5,07
19:00	7,55	6,27	5,83	6,46	6,18	7,45	6,11	6,55
20:00	6,33	6,20	5,51	6,35	5,85	7,02	7,30	6,37
21:00	5,43	4,95	5,08	5,91	5,52	6,13	5,78	5,54
22:00	5,17	4,10	4,81	5,22	5,03	4,93	4,45	4,82
23:00	3,61	4,23	4,31	4,77	4,24	4,48	3,96	4,23
<b>TOTAL (kWh)</b>	<b>100,07</b>	<b>94,43</b>	<b>91,47</b>	<b>99,36</b>	<b>99,67</b>	<b>100,74</b>	<b>98,97</b>	<b>97,81</b>

**Tabla 7.** Consumo estimado de energía mensual y anual.

Fuente: Propia

MES	CONSUMO DE ENERGIA (kWh)
ENERO	3.032,25
FEBRERO	2.738,81
MARZO	3.032,25
ABRIL	2.934,44
MAYO	3.032,25
JUNIO	2.934,44
JULIO	3.032,25
AGOSTO	3.032,25
SEPTIEMBRE	2.934,44
OCTUBRE	3.032,25
NOVIEMBRE	2.934,44
DICIEMBRE	3.032,25
<b>TOTAL (KWh/año)</b>	<b>35.702,31</b>



**Figura 23.** Consumo estimado de energía mensual, trafo 10 kVA.

Fuente: Propia.

En la siguiente tabla se presenta en forma sintetizada los valores obtenidos correspondientes a las mediciones realizadas, esta información se utilizará para el diseño de la microrred.

**Tabla 8.** Valores sintetizados de mediciones realizadas a estación de transformación 7039 de 10 kVA.

Fuente: Propia

Ítem	Valor
Pico de demanda máxima (kW)	9,03
Consumo máximo de energía diaria (kWh)	100,74
Demanda anual (kWh)	35.702,31

Para corroborar que el consumo de energía anual es correcto, se extrajo de la base de datos de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; los consumos mensuales de los usuarios y de las luminarias que se encuentran conectados a la estación de transformación número 7039 de 10 kVA; considerando también un porcentaje de pérdidas en la red de distribución [41].

Actualmente se encuentran conectados al transformador las cargas que se visualizan en la siguiente tabla:

**Tabla 9.** Cargas conectadas a estación de transformación.

Fuente: Propia

ÍTEM	CARGA
1	18 Usuarios residenciales
2	4 Luminarias de 250 W
3	4 Luminarias de 100 W
4	1 Luminaria de 70 W

En la tabla 11 se visualiza los consumos mensuales de los usuarios; las luminarias y se estima un factor de pérdidas de distribución en baja tensión.

Como se puede observar la estimación del consumo anual de energía obtenido mediante la medición de la potencia en las bajantes del transformador es de 35.702,31 kWh, que comparado con el consumo anual de los usuarios, las luminarias y las pérdidas cuyo valor es de 34.047,16 kWh; existe una pequeña diferencia de energía anual de 1.655,15 kWh; que es un valor relativamente pequeño que al dividirlo para los 12 meses del año presenta una diferencia de 137,93 kWh mensual.

Para efectos de diseño y proyección de la demanda a pesar de que es un área que presenta bajos índices de crecimiento poblacional, se utilizará los datos de las mediciones realizadas con los equipos de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; multiplicando el valor de **consumo máximo de energía diaria** por un factor de 1,1 en base a los índices de crecimiento de la empresa; además con el objeto de que los equipos que conforman la microrred soporten los picos de potencia se multiplica el **pico de demanda máxima** por un factor de 1,5 dando como resultado los valores de la tabla 10; que serán las cantidades con las que se realizará el diseño de la microrred eléctrica.

**Tabla 10.** Valores con incremento de carga de las mediciones realizadas en la estación de transformación 7039 de 10 kVA.

Fuente: Propia

Ítem	Valor
Pico de demanda máxima (kW)	13,54
Consumo máximo de energía diaria (kWh/día)	110,81

**Tabla 11.** Consumo mensual de cargas, estación de transformación 7039 de 10 kVA.

		CONSUMO DE ENERGÍA USUARIOS Y LUMINARIAS TRANSFORMADOR 7039 DE 10 kVA (kWh)											
ÍTEM	Cliente	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15
1	1531300	64,00	61,00	56,00	59,00	61,00	58,00	60,00	51,00	57,00	55,00	57,00	60,00
2	1531318	113,00	45,00	51,00	87,00	118,00	64,00	57,00	59,00	64,00	67,00	55,00	45,00
3	1531326	30,00	25,00	32,00	30,00	35,00	29,00	27,00	31,00	34,00	35,00	37,00	42,00
4	1531342	35,00	30,00	28,00	29,00	34,00	33,00	28,00	28,00	29,00	33,00	37,00	38,00
5	1785708	99,00	88,00	90,00	95,00	137,00	45,00	43,00	43,00	50,00	51,00	43,00	44,00
6	1785740	188,00	75,00	70,00	67,00	265,00	134,00	136,00	151,00	135,00	175,00	153,00	140,00
7	3027927	113,00	201,00	120,00	181,00	95,00	88,00	91,00	148,00	142,00	128,00	135,00	158,00
8	3137205	115,00	93,00	87,00	84,00	139,00	104,00	100,00	112,00	120,00	122,00	101,00	103,00
9	3137213	112,00	69,00	64,00	62,00	185,00	104,00	100,00	108,00	85,00	112,00	96,00	98,00
10	3291119	69,00	68,00	70,00	74,00	65,00	68,00	69,00	60,00	63,00	64,00	58,00	70,00
11	3363082	55,00	87,00	65,00	45,00	53,00	64,00	78,00	60,00	50,00	45,00	55,00	80,00
12	3413952	679,00	697,00	651,00	629,00	350,00	419,00	240,00	100,00	177,00	127,00	148,00	150,00
13	3487766	141,00	319,00	114,00	113,00	152,00	125,00	119,00	122,00	116,00	151,00	123,00	213,00
14	3544830	116,00	124,00	116,00	112,00	607,00	126,00	130,00	132,00	125,00	134,00	122,00	125,00
15	4098612	121,00	60,00	56,00	54,00	191,00	63,00	59,00	63,00	64,00	78,00	69,00	64,00
16	4221735	136,00	134,00	125,00	120,00	161,00	135,00	131,00	149,00	115,00	124,00	122,00	106,00
17	4402020	123,00	61,00	57,00	55,00	227,00	123,00	100,00	110,00	108,00	143,00	112,00	113,00
18	4833356	194,00	182,00	175,00	200,00	718,00	308,00	263,00	275,00	335,00	274,00	129,00	139,00
<b>CONSUMO TOTAL USUARIOS</b>		<b>2.503,00</b>	<b>2.419,00</b>	<b>2.027,00</b>	<b>2.096,00</b>	<b>3.593,00</b>	<b>2.090,00</b>	<b>1.831,00</b>	<b>1.802,00</b>	<b>1.869,00</b>	<b>1.918,00</b>	<b>1.652,00</b>	<b>1.788,00</b>
<b>CONSUMO TOTAL LUMINARIAS</b>		<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>	<b>606,34</b>
<b>PERDIDAS DISTRIBUCIÓN</b>	<b>3,6%</b>	111,94	108,91	94,80	97,28	151,18	97,07	87,74	86,70	89,11	90,88	81,30	86,20
<b>CONSUMO MENSUAL (kWh)</b>		<b>3.221,27</b>	<b>3.134,25</b>	<b>2.728,14</b>	<b>2.799,62</b>	<b>4.350,51</b>	<b>2.793,41</b>	<b>2.525,08</b>	<b>2.495,04</b>	<b>2.564,45</b>	<b>2.615,21</b>	<b>2.339,64</b>	<b>2.480,53</b>
<b>CONSUMO ANUAL (kWh)</b>		<b>34.047,16</b>											

## 4.2 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico

### 4.2.1 Datos de partida sistema fotovoltaico

Una vez definida la curva de carga e identificado los parámetros como el pico de demanda máxima, y el consumo de energía máximo diario, se procede a analizar los datos solares para realizar el dimensionamiento del sistema fotovoltaico, que es el que cubrirá toda la demanda, ya que el sistema eólico servirá de apoyo a la microrred eléctrica.

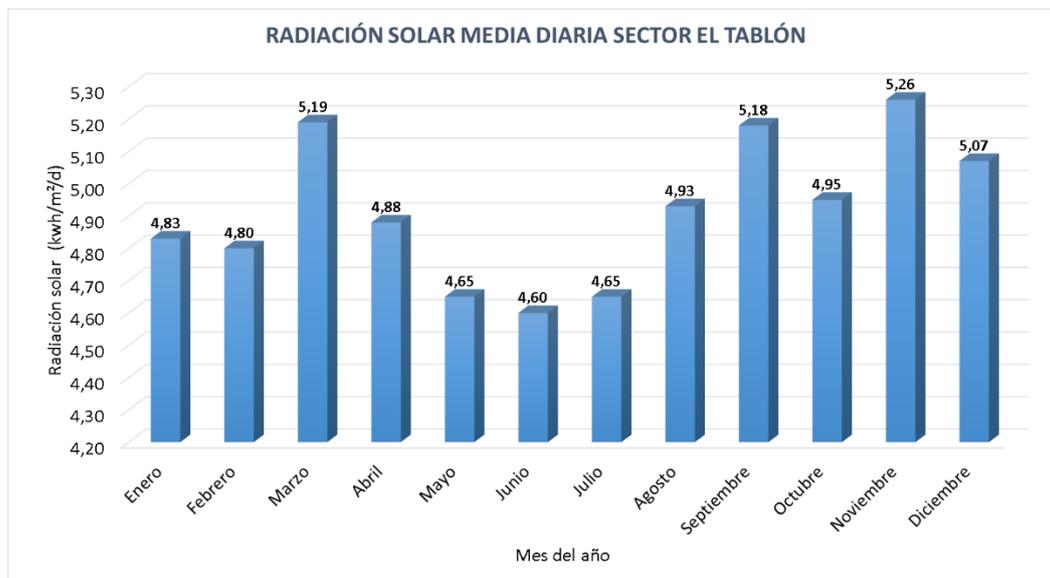
De la base de datos de la NASA se obtiene la radiación solar diaria, la temperatura del aire y se calcula la radiación solar mensual; lo cual se visualiza en la siguiente tabla.

**Tabla 12.** Datos de radiación solar obtenidos de la NASA, para sitio de emplazamiento del diseño de la microrred eléctrica.

Fuente: [42]

MES	DÍAS	TEMPERATURA DEL AIRE	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL DIARIA	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL MENSUAL	RADIACIÓN GLOBAL SOLAR
		°C	kWh/m <sup>2</sup> /d	kWh/m <sup>2</sup> /mes	W/m <sup>2</sup>
Enero	31	22,40	4,83	149,73	201,25
Febrero	28	22,00	4,80	134,40	200,00
Marzo	31	22,10	5,19	160,89	216,25
Abril	30	22,60	4,88	146,40	203,33
Mayo	31	22,50	4,65	144,15	193,75
Junio	30	21,90	4,60	138,00	191,67
Julio	31	21,80	4,65	144,15	193,75
Agosto	31	22,60	4,93	152,83	205,42
Septiembre	30	23,30	5,18	155,40	215,83
Octubre	31	23,30	4,95	153,45	206,25
Noviembre	30	22,80	5,26	157,80	219,17
Diciembre	31	22,50	5,07	157,17	211,25
<b>Promedio anual</b>	<b>365</b>	<b>22,50</b>	<b>4,92</b>	<b>149,53</b>	<b>205,00</b>
<b>Total del año (kWh/m<sup>2</sup>)</b>		-	<b>1.795,80</b>	-	-

Se determina que la temperatura promedio en el lugar de emplazamiento del diseño de la microrred es de 22.5 °C; y no presenta grandes variaciones, además de que no están marcadas las estaciones climáticas por estar ubicada en la zona ecuatorial; por lo que no es necesario el uso de sistemas de aire acondicionado ni calefacción. Para poder visualizar de una mejor manera la información de la radiación solar diaria, se muestra la siguiente figura.



**Figura 24.** Radiación solar media diaria sector el Tablón.

**Fuente:** Propia.

También se determina que en el sitio de emplazamiento existe un promedio de 12,07 horas con luz solar; que implica unas 4.404,10 horas sol al año; esto se visualiza en la tabla 13.

**Tabla 13.** Horas de sol diarias del sitio de emplazamiento.

**Fuente:** [43]

MES	Días	Promedio de horas de sol diarias	Promedio de horas de sol mensual
		h	h
Enero	31	12,20	378,20
Febrero	28	12,20	341,60
Marzo	31	12,10	375,10
Abril	30	12,00	360,00
Mayo	31	11,90	368,90
Junio	30	11,90	357,00
Julio	31	11,90	368,90
Agosto	31	12,00	372,00
Septiembre	30	12,00	360,00
Octubre	31	12,10	375,10
Noviembre	30	12,20	366,00
Diciembre	31	12,30	381,30
<b>Promedio / Total</b>	<b>365</b>	<b>12,07</b>	<b>4.404,10</b>

De igual manera se presentan datos de gran importancia para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico como la eficiencia del inversor, cargador, cableado, demanda máxima diaria de energía y horas de sol pico; los mismos que se observan en la tabla 14.

**Tabla 14.** Datos de partida para diseño de sistema fotovoltaico.

Fuente: Propia

<b>Eficiencia del Sistema</b>	
Inversor	95,70%
Cargador	85,00%
Cableado	99,00%
Eficiencia total	79,70%
<b>Demanda máxima diaria de energía kWh</b>	<b>110,81</b>
Demanda máxima diaria de energía incluyendo pérdidas kWh	<b>139,00</b>
<b>Horas de sol pico</b>	
HSP (h/año)	1.795,80
HSP (h/día)	4,92
Pérdidas por sombras (%)	0,993%
<b>HSP (descontando sombras)(h/día)</b>	<b>4,87</b>

#### 4.2.2 Selección de módulos fotovoltaicos

Después de hacer una revisión detallada de las especificaciones técnicas y rendimientos de los paneles fotovoltaicos se eligió los módulos AC300P de la marca AXITEC. A continuación se presenta una tabla resumen de las características técnicas del módulo seleccionado.

**Tabla 15.** Especificaciones técnicas panel fotovoltaico AXITEC.

Fuente: Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
Marca / Modelo	AXITEC / AC-300P/156-72S
Tipo	POLICRISTALINO
Área células (cm <sup>2</sup> )	240
V <sub>mpp</sub> (V)	36,73
I <sub>mpp</sub> (A)	8,18
P <sub>pico</sub> (Wp)	300
V <sub>oc</sub> (V)	45,48
I <sub>sc</sub> (A)	8,71
Largo / Ancho de panel (mm)	1.956 mm / 992 mm
Área panel (m <sup>2</sup> )	1,940 m <sup>2</sup>
η	15,46 %

Tomando como dato la energía máxima demandada; las horas solar pico y los módulos fotovoltaicos seleccionados se calcula que el número de módulos necesarios para cubrir la demanda máxima es:

$$\text{Número de módulos: } \frac{\text{Demanda máxima diaria}}{\text{HSP} * \text{Potencia módulos}} \quad (4.1)$$

$$\text{Número de módulos: } \frac{139,00 \text{ kWh/día}}{4,92 * 0,3 \text{ kW}} : 95,22 \approx 95 \text{ módulos}$$

La potencia instalada en módulos fotovoltaicos alcanza un valor de 28,5 kW.

Luego de obtener el número de módulos, la distancia mínima entre filas de módulos se calcula en base a la inclinación de los paneles y a la inclinación que tiene el sol con respecto al horizonte.

En cuanto a la inclinación de los paneles estos deben estar orientados hacia el norte, en el caso de que el panel sea fijo el ángulo de inclinación debe ser igual a la latitud del lugar donde se implementará las instalaciones fotovoltaicas.

Para el presente diseño ubicado en el sector del Tablón de la provincia del Azuay; el cual se encuentra al sur del Ecuador, y está a una latitud de  $3^{\circ} 18' 12,3357''$  y en concordancia con [44], ya que el Ecuador tiene una latitud de 0 a 5 grados; la inclinación que el panel debe tener es de  $5^{\circ}$  a  $10^{\circ}$  sobre la horizontal; con el objeto de que la lluvia fluya con normalidad y se permita la autolimpieza del panel; es por esto que se escoge el valor de  $10^{\circ}$  para la inclinación de los paneles fotovoltaicos.

Posteriormente se determina la separación entre módulos de tal manera de que no se produzcan sombra entre ellos; para esto utilizamos las expresiones de la sección 2.7.3.

El menor ángulo de posición del sol respecto del observador ( $\gamma$ ) viene dado por:

$$\gamma = 90 - \delta - L \quad (4.2)$$

$$\gamma = 90 - 23,5 - 3,30 = 63,2^{\circ}$$

La distancia ( $d_1; d_2; h$ ) se calcula con las expresiones:

$$d_1 = w * \cos(\beta) \quad (4.3)$$

$$h = d_1 * \tan(\beta) \quad (4.4)$$

$$d_2 = \frac{h}{\tan(\gamma)} \quad (4.5)$$

$$d_1 = 0,992 * \cos(10^{\circ}) = 0,976 \text{ m}$$

$$h = 0,976 * \tan(10^{\circ}) = 0,172 \text{ m}$$

$$d_2 = \frac{0,172}{\tan(63,2)} = 0,087 \text{ m}$$

La distancia mínima entre los paneles viene dado por la siguiente expresión y se visualiza en la siguiente figura.

$$d: d_1 + d_2. \quad (4.6)$$

$$d = 0,976 + 0,087 = 1,06 \text{ m}$$

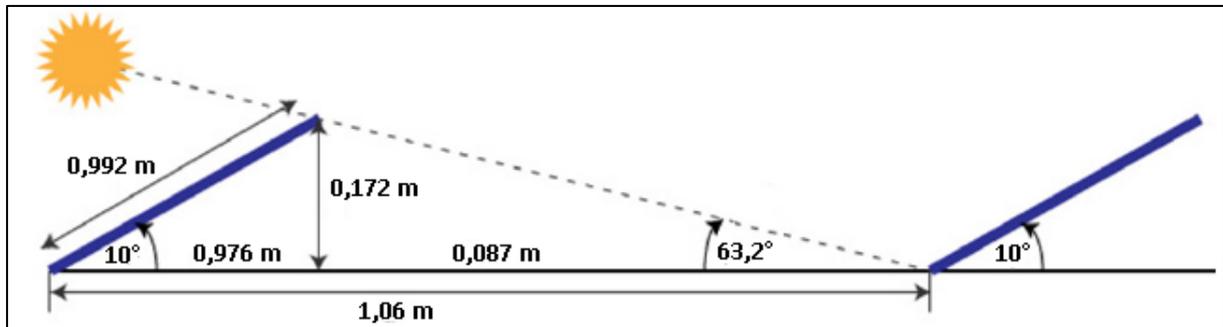


Figura 25. Disposición de paneles solares  
Fuente: Propia.

#### 4.2.3 Selección del inversor de red

Como la potencia nominal del arreglo fotovoltaico es de 28,5 kW, es necesario seleccionar un inversor o un grupo de inversores, que sean capaces de disipar esta misma cantidad de potencia. Si bien el aspecto económico es importante a la hora de realizar un diseño también lo es la fiabilidad del sistema, generalmente se observa que a medida que sube la potencia de los inversores su precio por vatio disminuye lo que quiere decir que entre más grande sea la unidad más favorable será el inversor desde un punto de vista económico, sin embargo se tiene la desventaja de que en caso de fallo si no se tienen unidades adicionales se desaprovecharía por completo la energía.

Si se evalúa el diseño desde el punto de vista de la fiabilidad la mejor alternativa es instalar 4 equipos trabajando en paralelo; esto es para que en caso de falla de alguno de los 4 equipos, el sistema siga estando en capacidad de entregar al menos los 3/4 de la potencia total instalada, garantizando así la continuidad de parte del suministro eléctrico en caso de fallo de algunos equipos.

Si se divide la potencia pico instalada entre 4, da como resultado que cada inversor debe ser capaz de disipar como mínimo 7,12 kW; teniendo esta potencia como potencia mínima a cubrir por parte del inversor cargador, se seleccionó el equipo **INGETAM 8,2 TL**; cuyas especificaciones técnicas se presentan en la tabla 16.

**Tabla 16.** Especificaciones técnicas del inversor.

Fuente: Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
Marca	INGETEAM
Modelo	8,2 TL
Potencia de salida	8.200 W
Voltaje de salida	L-N 120 V; L-L 240 V
Rango de voltaje de entrada DC	100V a 450V
Máximo corriente de entrada DC	35 A
Frecuencia de salida	50 a 60 Hz
Eficiencia $\eta$	95,70 %

La tensión máxima en circuito abierto del inversor para las entradas en corriente continua es de 450 Vdc y la tensión de entrada mínima MPPT es de 100 Vdc; por tanto las series de paneles conectadas al inversor tendrán que ser como mínimo 2 paneles y como máximo 9 paneles; para las corrientes el **INGETEAM 8,2TL**, es capaz de manejar 35 A, es decir puede soportar la conexión de 4 módulos **AXITEC AC300P** en paralelo.

Calculando el número de paneles por inversor nos da lo siguiente:

$$\text{Número de paneles por inversor} = \frac{\text{Potencia Inversor}}{\text{Potencia módulo fotovoltaico}} \quad (4.7)$$

$$\text{Número de paneles por inversor} = \frac{8.200}{300} = 27,33$$

Con el objeto de no sobrecargar los inversores; considerando que las conexiones en serie no sobrepasen la tensión en circuito abierto admisible ni su corriente máxima de trabajo del lado de corriente continua; se conectará 24 paneles por inversor; con una configuración de 3 bancadas en paralelo de 8 paneles en serie.

Es decir tres inversores tendrán conectados una carga de 7,2 kW; y el inversor restante tendrá conectado una carga de 6,9 kW; considerando los 4 inversores con una potencia total instalada de 28,5 kW.

#### 4.2.4 Selección del inversor - cargador de red

Para la selección del inversor cargador de manera similar que con el inversor de red se seleccionó el que tiene un menor costo por vatio, teniendo en cuenta que si se usan varios inversores cargadores en paralelo estos deben ser capaces de cubrir la demanda pico del sistema y asimilar la potencia total de generación en caso de que este esté funcionando solo con baterías.

La capacidad de los inversores cargadores se determinan de tal manera que no exista un sobredimensionamiento de la instalación; siempre teniendo en cuenta el parámetro de potencia pico de generación la cual alcanza un valor de 34,50 kW y la que es un valor de potencia poco probable.

Es así que se seleccionan 3 equipos de la firma **VICTOR ENERGY modelo QUATRO 48/15000** con una capacidad de 12.000 W cada uno y cuyas especificaciones técnicas se muestran a continuación.

**Tabla 17.** Especificaciones técnicas del inversor – cargador.

Fuente: Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
<b>CARACTERÍSTICAS INVERSOR</b>	
Marca	Victron
Modelo	Quatro 48/15000
Potencia de salida	12.000 W
Voltaje de salida	120 Vac / 220Vac
Rango de voltaje de entrada DC	38 a 66 V (48 V Nominal)
Máximo corriente de entrada DC	2x100 A
Frecuencia de salida	50/60 Hz
<b>CARACTERÍSTICAS CARGADOR</b>	
Máxima corriente de carga	140 A
Rango de Voltaje de carga	40 a 64 V (48 V Nominal)

#### 4.2.5 Selección de las baterías.

Para el cálculo del banco de baterías se considera diferentes factores como:

$E_d$  Energía demandada en el día de mayor consumo: 110,81 kWh/día.

$D_a$  Días de autonomía: 1.

$DOD$  Profundidad de descarga: 70% [1].

$V_b$  Tensión de la bancada: 48 Vdc.

$V_B$  Tensión de la batería: 12 Vdc.

$A_h$  Capacidad de la batería: 250 Ah.

La batería escogida es de la marca Monoblock Saclima AGM que presenta las características mostradas en la siguiente tabla.

**Tabla 18.** Especificaciones técnicas de las baterías.

Fuente: Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
Marca	Monoblock Saclima
Voltaje	12 V
C100 Ah	250 AH
Peso	60,70 kg
Ancho	274 cm
Largo	518 cm
Alto	242 cm
Tecnología	Libre de mantenimiento

Con las baterías seleccionadas y las especificaciones técnicas necesarias se procede a realizar el cálculo del número de elementos.

$$\text{Capacidad total de almacenamiento} = \frac{E_d D_a}{DOD} \quad (4.8)$$

$$\text{Capacidad total de almacenamiento} = \frac{110,81 \text{ kWh/día} * 1 \text{ día}}{70\%} = 158,30 \text{ kWh}$$

$$\text{Número de baterías} = \frac{\text{Capacidad total de almacenamiento (Wh)}}{A_h V_b} \quad (4.9)$$

$$\text{Número de baterías} = \frac{158.300,00}{250 * 12} = 52,76 \text{ baterías} \approx 52 \text{ baterías}$$

Como la tensión del banco es 48 Vdc; el número de baterías seleccionado debe ser múltiplo de 4 por lo que el número de baterías necesarias para cubrir la demanda sería 52. El número de baterías necesario es menor al calculado, pero esto no tiene ningún impacto negativo en el desempeño del sistema ni en la capacidad de respuesta del mismo, considerando también que se diseña para trabajar con una profundidad de descarga del 70% [1].

La cantidad de bancadas necesarias viene dado por:

$$\text{Bancadas necesarias} = \frac{52 \text{ baterías}}{4 \text{ baterías/bancada}} = 13 \text{ bancadas} \quad (4.10)$$

## 4.3 Dimensionamiento del sistema eólico

### 4.3.1 Datos de partida sistema eólico

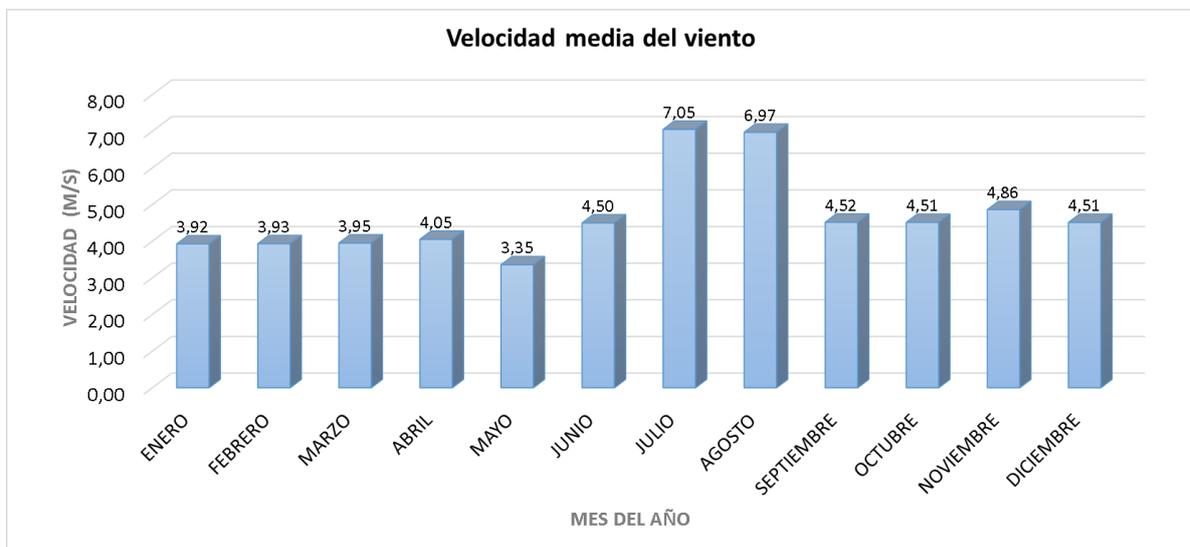
Para dimensionar el sistema eólico es necesario conocer los datos de medición del viento en la zona de emplazamiento; es así que se ha obtenido los datos de velocidad del viento del sector del Tablón del Cantón Santa Isabel provincia del Azuay; los cuales están medidos durante el periodo de un año en intervalos de 10 minutos a una altura de 26 metros; los mismos que fueron proporcionados por la empresa generadora ElecAustro.

En la tabla 19 y figura 24 se presenta los valores medios mensuales de la velocidad del viento así como el promedio anual.

**Tabla 19.** Velocidad del viento media mensual.

Fuente: Propia

MES	Velocidad del viento m/s
ENERO	3,92
FEBRERO	3,93
MARZO	3,95
ABRIL	4,05
MAYO	3,35
JUNIO	4,50
JULIO	7,05
AGOSTO	6,97
SEPTIEMBRE	4,52
OCTUBRE	4,51
NOVIEMBRE	4,86
DICIEMBRE	4,51
<b>PROMEDIO</b>	<b>4,68</b>



**Figura 26.** Velocidad del viento media mensual sector el Tablón.

Fuente: Propia.

### 4.3.2 Cálculo de los índices c y k con el método de mínimos cuadrados

Las mediciones del viento se realizaron en una estación meteorológica ubicada cerca del lugar de emplazamiento.

Para proceder con la determinación de los factores se debe seguir los siguientes pasos y cuyos cálculos se muestran en la tabla 17:

- a. Organizar los datos de velocidades del viento en rangos; por ejemplo en velocidades del viento de 2 m/seg se incluyen las velocidades mayores a 1 m/seg y menores o iguales a 2 m/seg.

Para el presente estudio se tiene variaciones de velocidad de 0 a 22 m/seg; lo cual se puede visualizar en la tabla 17.

- b. Determinar la frecuencia puntual y la frecuencia acumulada con las siguientes expresiones

$$\text{Frecuencia puntual} = \frac{\text{horas/año}}{8.760} \quad (4.11)$$

$$\text{Frecuencia acumulada}_n = \text{Frecuencia puntual}_n + \text{Frecuencia puntual}_{n-1} \quad (4.12)$$

- c. Aplicar las expresiones **2.13** y **2.14** para calcular los factores  $x$  e  $y$ .  
 d. Calcular los valores de  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$ , los cuales son el promedio de  $x$  e  $y$  respectivamente.

Para el presente estudio da como resultado los siguientes resultados:

$$\bar{x} = 2,203$$

$$\bar{y} = 0,852$$

- e. Con las ecuaciones **2.16**, **2.17** y **2.19** calcular los índices  $k$ ,  $b$  y  $c$ .

$$\text{Factor de forma} \quad k = \frac{18,76}{19,05} = 0,9846$$

$$\text{Intercepto} \quad b = 0,852 - 0,9846 * 2,203 = -1,3177$$

$$\text{Factor de escala} \quad c = e^{-\left(\frac{-1,3177}{0,9846}\right)} = 3,8125$$

- f. Calcular la ecuación lineal dada por **2.12**; de donde:

$$y = 0,9846 * x - 1,3177$$

Lo cual representa la aproximación lineal de Weibull y se puede observar en la figura contigua.

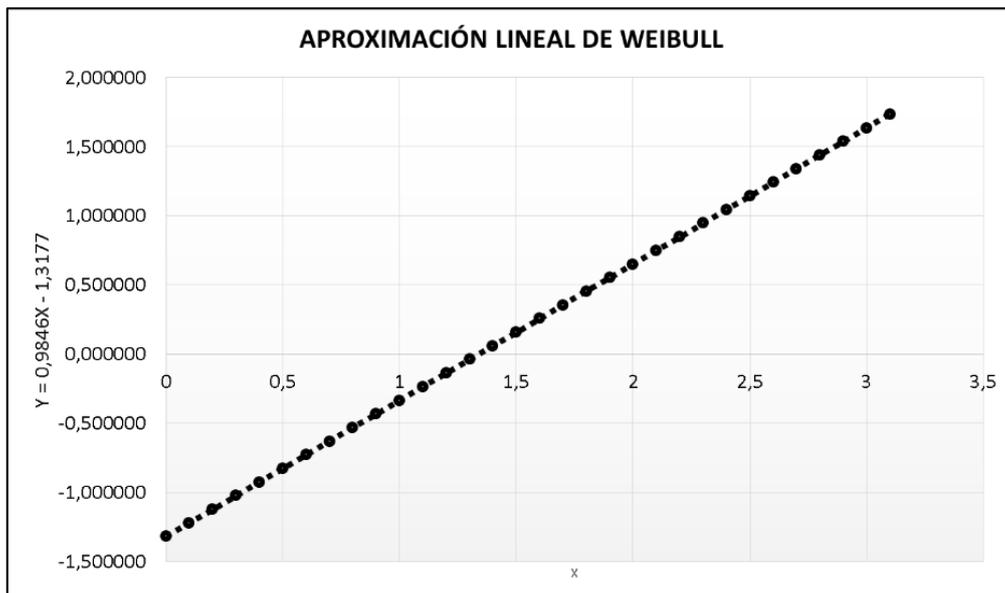


Figura 27. Aproximación lineal de la distribución de Weibull

Fuente: Propia.

Tabla 20. Cálculo de los factores c y k.

Fuente: Propia

Grupos de velocidades existentes	Horas al año con que se presenta	Frecuencia puntual Horas-año/8760	Frecuencia acumulada Horas-año/8760	X	Y	$(x - \bar{x})$	$(y - \bar{y})$	$(x - \bar{x}) * (y - \bar{y})$	$(x - \bar{x})^2$
				$\ln(\text{velocidad})$	$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1 - \text{Frecuencia acumulada}}\right)\right)$				
0	0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	-2,203236	-0,851653	1,876391	4,854247
1	2.458,33	0,280632	0,280632	0,000000	-1,110538	-2,203236	-1,962190	4,323168	4,854247
2	1.059,33	0,120928	0,401560	0,693147	-0,666643	-1,510088	-1,518296	2,292761	2,280367
3	736,67	0,084094	0,485654	1,098612	-0,408179	-1,104623	-1,259831	1,391639	1,220192
4	484,67	0,055327	0,540982	1,386294	-0,250174	-0,816941	-1,101827	0,900128	0,667393
5	419,50	0,047888	0,588870	1,609438	-0,117832	-0,593798	-0,969484	0,575678	0,352596
6	426,17	0,048649	0,637519	1,791759	0,014675	-0,411476	-0,836978	0,344396	0,169313
7	445,33	0,050837	0,688356	1,945910	0,153488	-0,257325	-0,698164	0,179655	0,066216
8	460,67	0,052588	0,740944	2,079442	0,300630	-0,123794	-0,551022	0,068213	0,015325
9	477,83	0,054547	0,795491	2,197225	0,461935	-0,006011	-0,389717	0,002343	0,000036
10	481,00	0,054909	0,850400	2,302585	0,641742	0,099350	-0,209911	-0,020855	0,009870
11	426,00	0,048630	0,899030	2,397895	0,829830	0,194660	-0,021823	-0,004248	0,037892
12	310,17	0,035407	0,934437	2,484907	1,002373	0,281671	0,150721	0,042454	0,079339
13	214,33	0,024467	0,958904	2,564949	1,160600	0,361714	0,308947	0,111750	0,130837
14	129,00	0,014726	0,973630	2,639057	1,290756	0,435822	0,439103	0,191371	0,189941
15	85,67	0,009779	0,983409	2,708050	1,410724	0,504815	0,559071	0,282227	0,254838
16	58,33	0,006659	0,990068	2,772589	1,528671	0,569353	0,677018	0,385463	0,324163
17	40,00	0,004566	0,994635	2,833213	1,653991	0,629978	0,802339	0,505456	0,396872
18	23,50	0,002683	0,997317	2,890372	1,778497	0,687136	0,926844	0,636868	0,472156
19	13,50	0,001541	0,998858	2,944439	1,913293	0,741203	1,061641	0,786892	0,549383
20	8,17	0,000932	0,999791	2,995732	2,136745	0,792497	1,285092	1,018431	0,628051
21	1,67	0,000190	0,999981	3,044522	2,385980	0,841287	1,534327	1,290810	0,707764
22	0,17	0,000019	1,000000	3,091042	2,625792	0,887807	1,774139	1,575093	0,788201
<b>TOTAL</b>	<b>8.760,00</b>	<b>1,000000</b>				<b>SUMATORIA</b>		<b>18,756083</b>	<b>19,049238</b>

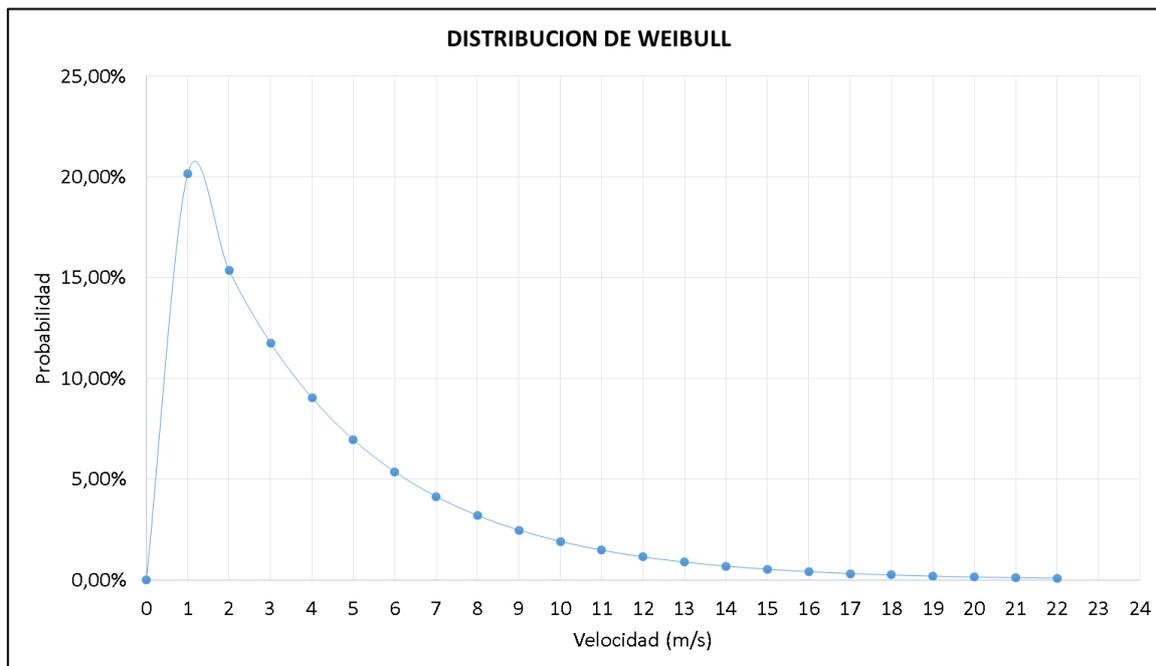
### 4.3.3 Cálculo de la distribución de Weibull

Luego de calcular el factor de escala y factor de forma; se procede a obtener la distribución de Weibull para los diferentes valores de velocidades del viento; esto con la expresión **(2.8)**; la cual proporciona los valores que se presentan en la tabla 21 y se visualizan claramente en la figura 26.

**Tabla 21.** Distribución de Weibull para velocidades existente.  
Fuente: Propia

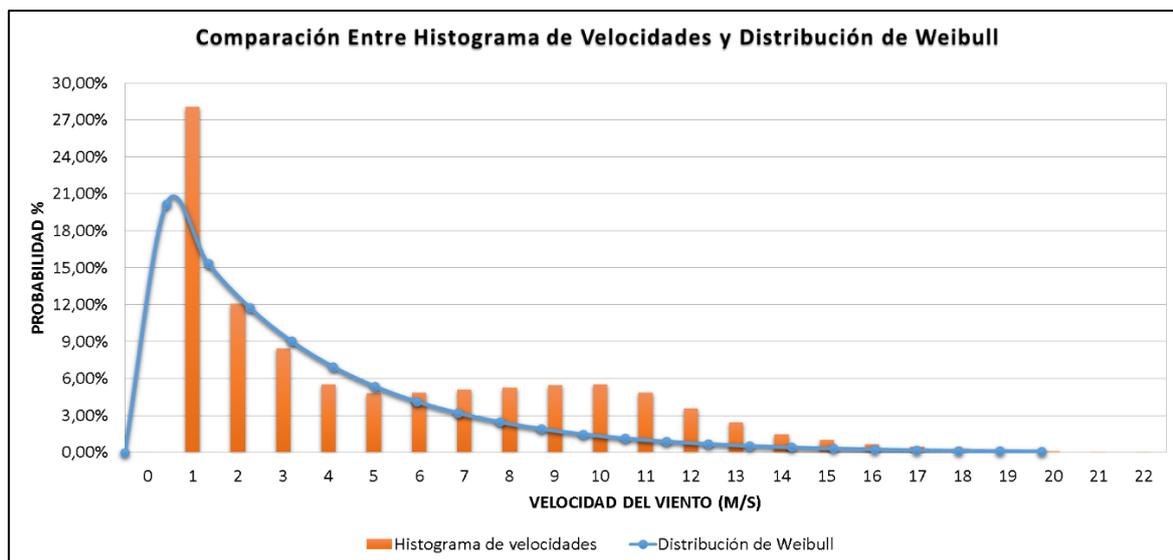
Grupos de velocidades existentes	Horas al año con que se presenta	DISTRIBUCION DE WEIBULL
0	0	0,00%
1	2.458,33	20,17%
2	1.059,33	15,36%
3	736,67	11,77%
4	484,67	9,05%
5	419,50	6,97%
6	426,17	5,37%
7	445,33	4,15%
8	460,67	3,21%
9	477,83	2,48%
10	481,00	1,92%
11	426,00	1,49%
12	310,17	1,15%
13	214,33	0,89%
14	129,00	0,69%
15	85,67	0,54%
16	58,33	0,42%
17	40,00	0,32%
18	23,50	0,25%
19	13,50	0,19%
20	8,17	0,15%
21	1,67	0,12%
22	0,17	0,09%

Consecuentemente se realiza una comparación del histograma de velocidades con la distribución de Weibull; lo cual se observa en la figura 27.



**Figura 28.** Distribución de Weibull para velocidades existentes

Fuente: Propia.



**Figura 29.** Comparación entre histograma de velocidades y distribución de Weibull

Fuente: Propia

#### 4.3.4 Selección del aerogenerador

Considerando que el sistema eólico servirá de apoyo al sistema de generación fotovoltaico de la microrred eléctrica; además teniendo en cuenta los costos de generación e implementación de un aerogenerador eléctrico, se seleccionó el aerogenerador BORNAY 6000, el cual tiene las características técnicas que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 22.** Especificaciones Técnicas de Aerogenerador.

Fuente: [46]

	Característica	Especificaciones
<b>Aerogenerador BORNAY 6000</b>	Modelo	BORNAY 6000
	Número de hélices	3
	Diámetro	4 mts.
	Sistema de control	Regulador electrónico
	Potencia nominal	6000 W
	Voltaje	48 V
	Regulador	48 V, 150 A
	Velocidad arranque	3,5 m/s
	Velocidad potencia nominal	12 m/s

Posteriormente en la siguiente figura se presenta la curva de potencia del aerogenerador.



**Figura 30.** Curva de potencia aerogenerador BORNAY 6000

Fuente: [46]

#### 4.3.5 Cálculo de energía a obtener con aerogenerador

Para calcular la energía anual a obtener con el aerogenerador seleccionado se parte primeramente de los datos de medición del viento los cuales fueron medidos a una altura de 26 metros; posteriormente se calcula los factores de escala y de forma, los cuales se obtuvieron en el **apartado 4.3.2**.

Se plantea colocar el aerogenerador a una altura de 35 metros con lo cual hay que realizar la corrección de los factores **c**, **k** y calcular **β** con las expresiones **(2.20)**; **(2.21)**; **(2.22)**; dando como resultado los siguientes valores:

$$\beta = \frac{0,37 - 0,088 * \ln(3,8124)}{1 - 0,088 * \ln\left(\frac{26}{10}\right)} = 0,2753$$

$$k' = 0,9846 * \frac{1 - 0,088 * \ln\left(\frac{26}{10}\right)}{1 - 0,088 * \ln\left(\frac{35}{10}\right)} = 1,01$$

$$c' = 4,14 * \left(\frac{35}{26}\right)^{0,2753} = 4,14$$

Es importante recalcar que para calcular la potencia del viento con la expresión **(2.7)** son necesarios los datos que se muestran a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 23.** Datos para el cálculo de energía a producir con el aerogenerador.  
**Fuente:** Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
<i>Límite de Betz</i>	0,5926
<i>Densidad del aire</i>	$1,225 \text{ kg/m}^3$
<i>Área</i>	$\pi * 2^2 = 12,57 \text{ m}^2$
<i>Eficiencia equipos de conversión</i>	85%

Una vez definidos los parámetros se procede a realizar el cálculo de la energía anual que se obtendrá con la instalación del aerogenerador a una altura de 35 metros considerando también que el BORNAY 6000 genera desde una velocidad de 3,5 m/s; el cual nos da como resultado un valor de 8.296,00 kWh/año que representa el 23% de energía demandada al año; en la siguiente tabla se muestra el cálculo de lo manifestado.

**Tabla 24.** Cálculo de energía anual a producir por el aerogenerador.

Fuente: Propia

<i>Velocidad</i>	<i>f(v)</i>		<i>Potencia (kW)</i>			<i>A altura h corregida</i>	
	<i>Altura 26 m</i>	<i>Altura corregida 35 m</i>	<i>Contenida en el viento (kw)</i>	<i>Máxima aprovechable (kw)</i>	<i>Producida por el aerogenerador (KW)</i>	<i>Horas/año</i>	<i>Energía (kWh/año)</i>
0	0,00%	0,00%	0,00	0,00	0,00	0,0	0
1	20,17%	18,96%	0,01	0,00	0,00	1660,6	0
2	15,36%	15,03%	0,06	0,04	0,00	1316,6	0
3	11,77%	11,85%	0,21	0,12	0,00	1038,0	0
4	9,05%	9,32%	0,49	0,29	0,70	816,1	486
5	6,97%	7,31%	0,96	0,57	1,00	640,6	544
6	5,37%	5,73%	1,66	0,99	1,90	502,2	811
7	4,15%	4,49%	2,64	1,56	2,50	393,3	836
8	3,21%	3,51%	3,94	2,34	3,50	307,8	916
9	2,48%	2,75%	5,61	3,33	4,00	240,7	818
10	1,92%	2,15%	7,70	4,56	5,00	188,2	800
11	1,49%	1,68%	10,24	6,07	5,50	147,0	687
12	1,15%	1,31%	13,30	7,88	5,95	114,8	581
13	0,89%	1,02%	16,91	10,02	6,30	89,6	480
14	0,69%	0,80%	21,12	12,52	6,40	70,0	381
15	0,54%	0,62%	25,98	15,39	6,00	54,6	278
16	0,42%	0,49%	31,53	18,68	5,60	42,6	203
17	0,32%	0,38%	37,81	22,41	5,80	33,2	164
18	0,25%	0,30%	44,89	26,60	5,90	25,9	130
19	0,19%	0,23%	52,79	31,29	5,95	20,2	102
20	0,15%	0,18%	61,58	36,49	6,00	15,7	80
21	0,12%	0,14%	71,28	42,24	0,00	12,2	0
22	0,09%	0,11%	81,96	48,57	0,00	9,5	0
23	0,07%	0,08%	93,65	55,50	0,00	7,4	0
24	0,06%	0,07%	106,40	63,05	0,00	5,8	0
25	0,04%	0,05%	120,26	71,27	0,00	4,5	0
26	0,03%	0,04%	135,28	80,17	0,00	3,5	0
<b>Total</b>							<b>8.296</b>

#### 4.3.6 Selección del regulador de carga eólico

Es importante indicar que el aerogenerador BORNAY 6000 incluye un regulador de carga electrónico cuyas especificaciones se presentan en la tabla contigua.

**Tabla 25.** Especificaciones técnicas del regulador de carga eólico.

Fuente: Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
Marca	Regulador electrónico incluido en aerogenerador BORNAY 6000
Voltaje	48 V
Corriente	150 A

#### 4.3.7 Selección del inversor de conexión a red eólico

Procedentemente se selecciona el inversor de conexión a red eólico el cual es de la firma **SMA** modelo **WINDY 6000**; el cual tiene las especificaciones que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 26.** Especificaciones técnicas del inversor eólico.

Fuente: Propia

ÍTEM	ESPECIFICACIÓN
<b>CARACTERÍSTICAS INVERSOR EÓLICO</b>	
Marca	SMA
Modelo	WINDY 6000A
Potencia de entrada máxima	6.300 W
Voltaje de entrada máximo DC	600 V
Máxima corriente de entrada DC	26 A
Voltaje de salida AC	120 V/ 220 V
Frecuencia de salida	50 Hz - 60 Hz $\pm$ 4,5 Hz
Potencia de salida	6.000 W
Factor de potencia	1
Número de fases	1

#### 4.4 Dimensionamiento del generador de emergencia

Al tratarse del diseño de una microrred eléctrica aislada; adicional a la generación fotovoltaica, generación eólica y el banco de baterías es necesario tener el respaldo de un generador de combustión

interna que abastezca de energía a la demanda cuando las fuentes de energía renovable no estén disponibles.

Es por esta razón que se dimensiona el equipo de acuerdo a la carga instalada; este dimensionamiento se lo realiza considerando que la curva de carga fue tomada de una estación de transformación de 10 KVA; en cuyas mediciones se registra que el transformador se encuentra con una potencia aparente de 8,86 kVA con un factor de potencia de 0,91; lo cual nos proporciona un valor de 8,06 kW.

En base a estos datos de mediciones reales; se establece que el generador diésel debe tener de una capacidad de 10 kVA.

Las especificaciones técnicas del generador de combustión de interna escogido son las que se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 27.** Especificaciones Técnicas del Generador de Combustión interna.

Fuente: Propia

Característica	Especificaciones
Marca	FG WILSON
Modelo	Perkins 403D-11G
Velocidad del motor	1.800 rpm.
Frecuencia	60 Hz
Capacidad del depósito de combustible	45 lts.
Consumo de combustible	2,9 lts./h
Voltaje	220/127 V
Potencia Aparente	10 kVA
Potencia Activa	8 kW
Potencia de sobrecarga	10% Durante 1 hora cada 12 horas.
Grado de protección	IP 23
Sistema de enfriamiento	Agua
Dimensiones	Largo 1.320 mm
	Ancho 552 mm
	Alto 1.179 mm

#### **4.5 Integración de todas las fuentes en la microrred (Sistema fotovoltaico, eólico, generador de emergencia, baterías).**

Luego de dimensionar y seleccionar cada uno de los componentes que conformarán la microrred eléctrica, se procede a integrarlos de tal manera que se visualice la conexión y funcionamiento de cada de uno de ellos.

Haciendo una visión general la microrred eléctrica estará formada por los siguientes equipos que se detallan en la tabla contigua.

**Tabla 28.** Equipos que conforman la microrred eléctrica.

**Fuente:** Propia

<b>SISTEMA</b>	<b>COMPONENTE</b>	<b>CANTIDAD</b>
Sistema Fotovoltaico	Panel solar AXITEC 300 Wp	95
	Inversor INGETEAM 8,2 TL	4
	Inversor cargador VICTRON Quatro 48/15000; 12 kW	3
	Baterías Monoblock Saclima 12V	52
Sistema Eólico	Aerogenerador BORNAY 6.000; incluye regulador de carga, 120V C.A., 6kW	1
	Inversor SMA Windy 6.000	1
Sistema Auxiliar	Generador de combustión interna FG Wilson; 10 kVA; 220/127 V	1

Además se presenta un esquema de la disposición física de los equipos; esto es visualiza en la siguiente figura.

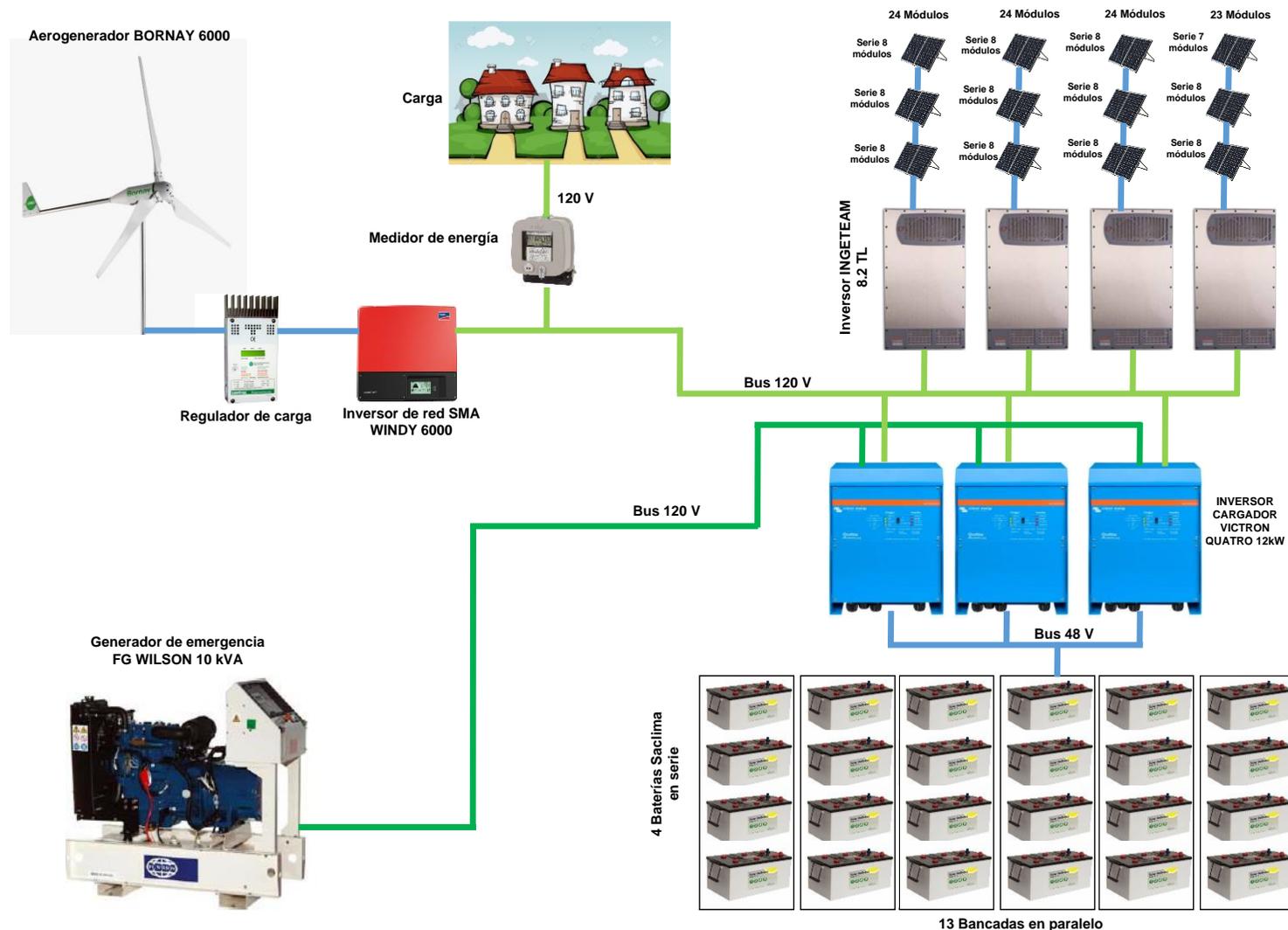


Figura 31. Disposición física de los equipos que conforman la microrred  
Fuente: [Propia]

## CAPITULO 5: PRESUPUESTO ECONÓMICO Y VIABILIDAD

### 5.1 Presupuesto de implementación de la microrred

Con el objeto de determinar el costo de implementación de la microrred eléctrica se obtiene un presupuesto económico de materiales y mano de obra; que se detalla a continuación en las siguientes tablas.

**Tabla 29.** Presupuesto económico de materiales.

Fuente: Propia

PRESUPUESTO MATERIALES					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (INCLUYE IVA)	TOTAL
1	Panel solar fotovoltaico	AXITEC 300 Wp	95	\$ 266,20	\$ 25.289,00
2	Inversor fotovoltaico	Radian GS 8.048; 8 kW	4	\$ 4.158,00	\$ 16.632,00
3	Inversor cargador	VICTRON Quatro 48/15000; 12 kW	3	\$ 4.370,00	\$ 13.110,00
4	Baterías	MONOBLOCK Saclima Plomo ácido 12V; 250 AH	52	\$ 219,67	\$ 11.422,84
5	Estructura panel fotovoltaico	Estructura de acero cincado para cubierta plana	1	\$ 1.254,00	\$ 1.254,00
6	Aerogenerador eólico – regulador.	BORNAY 6.000; 6kW; 120V, incluye regulador de carga	1	\$ 10.535,66	\$ 10.535,66
7	Inversor eólico	Inversor SMA Windy 6.000	1	\$ 1.980,00	\$ 1.980,00
8	Torre generador eólico	Suministro, montaje de apoyo de celosía de esfuerzo y montaje aerogenerador 35 metros	1	\$ 4.992,90	\$ 4.992,90
9	Generador diésel	Generador de combustión interna FG Wilson; 10 kVA, 220/127 V	1	\$ 10.065,00	\$ 10.065,00
<b>SUBTOTAL MATERIALES</b>					<b>\$ 95.281,40</b>

**Tabla 30.** Presupuesto económico de mano de obra.

Fuente: Propia

<b>PRESUPUESTO MANO DE OBRA</b>					
ÍTEM	DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (INCLUYE IVA)	TOTAL
10	Instalación eléctrica fotovoltaico	Cableado, cuadro y protecciones sist. Fotovoltaico	1	\$ 1.697,08	\$ 1.697,08
11	Mano de obra sist. Fotovoltaico	Mano de obra, desplazamientos y dietas	1	\$ 1.223,20	\$ 1.223,20
12	Instalación eléctrica eólico	Cableado, cuadro y protecciones sist. Eólico	1	\$ 715,00	\$ 715,00
13	Mano de obra sist. Eólico	Mano de obra, desplazamientos y dietas	1	\$ 418,00	\$ 418,00
14	Transporte y montaje de generador	Transporte y montaje de generador de combustión interna	1	\$ 200,00	\$ 200,00
<b>SUBTOTAL MANO DE OBRA</b>					<b>\$ 4.253,28</b>

**Tabla 31.** Presupuesto económico total

Fuente: Propia

ÍTEM	PRECIO
SUBTOTAL MATERIALES	\$ 95.281,40
SUBTOTAL MANO DE OBRA	\$ 4.253,28
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 99.534,68</b>

La implementación de la microrred eléctrica basada en energías renovables alcanza un valor de **USD\$ 99.534,68** dólares de los Estados Unidos de América.

Es importante recalcar nuevamente que el **artículo 67** de la **Ley del Régimen de Sector Eléctrico**, el cual manifiesta que se *“exonerará el pago de aranceles, demás impuestos adicionales y gravámenes que afecten a la importación de materiales y equipos no producidos en el país, para la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas destinados a la utilización de energía solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras...”*. Lo cual será una gran ventaja para el presente proyecto.

### 5.1.1 Viabilidad económica

Si el presente proyecto llega a implementarse y tomando como referencia el pliego tarifario 2016 emitido por el ARCONEL en donde para el promedio de consumo del área de estudio cuyo valor de

precio de la energía sin impuestos es de **0,097 USD\$/kWh [47]**, al incluir los impuestos presenta un valor de **0,15 USD\$/kWh**; con lo cual anualmente se paga:

$$35.702,31 \frac{kWh}{año} * 0,15 \frac{USD\$}{kWh} = 5.355,34 \frac{USD\$}{año} \quad (5.1)$$

El período de retorno viene dado por:

$$Tiempo de retorno = \frac{99.534,68}{5.355,34} = 18,58 \text{ años} \quad (5.2)$$

El tiempo de retorno de la inversión usando el simple *pay back* es de 18,58 años; lo cual lo hace no viable económicamente.

En base al valor obtenido a parte de lo estipulado en el **artículo 67** de la **Ley del Régimen de Sector Eléctrico**, es necesario buscar financiamiento económico por parte de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur a través del **MEER** o del **Ministerio del Ambiente**; ya que es un proyecto de generación de energía limpia; y que es de gran importancia para el Ecuador tener un proyecto que sirva de base para la construcción de microrredes eléctricas en el futuro.

Análogamente se realiza un cálculo con los precios que se estipulan en la regulación **CONELEC 001/13** sobre “Precios de la energía producida con recursos energéticos renovables no convencionales”, en donde para el territorio ecuatoriano continental el precio del kWh para la generación de energía fotovoltaica es de **25,77 cUSD\$** y para la energía eólica el precio es de **11,74 cUSD\$**.

Se estima que del total de la energía demanda es decir los 35.702,31 kWh/año; el 23% serán generados por energía eólica es decir unos 8.296,00 kWh y el resto de energía lo generarán los paneles fotovoltaicos con un valor de 27.406,31kWh; dando como resultado el siguiente flujo de caja.

$$27.406,31 \frac{kWh}{año} * 0,2577 \frac{USD\$}{kWh} + 8.296,00 \frac{kWh}{año} * 0,1174 = 8.036,56 \frac{USD\$}{año} \quad (5.3)$$

El período de retorno viene dado por:

$$Tiempo de retorno = \frac{99.534,68}{8.036,56} = 12,38 \text{ años} \quad (5.4)$$

Considerando los precios de la regulación **CONELEC 001/13**; el tiempo de retorno de la inversión se reduce a 12,38 años lo cual representa un 33% menos del tiempo calculado con el precio de la energía convencional.

## 5.2 Viabilidad medioambiental

En este apartado se determinará la viabilidad medioambiental de la implementación de la microrred eléctrica.

La demanda de energía anual de la carga estudiada es de 35.702,31 kWh/año.

De acuerdo con el factor de emisión de CO<sub>2</sub> para la generación de energía eléctrica en el Ecuador, el cual alcanza un valor de 0,6945 tonCO<sub>2</sub>/kWh [48].

Si se implementa el presente proyecto se evita emitir al ambiente las siguientes toneladas de CO<sub>2</sub>:

$$35.702,31 \frac{kWh}{año} * 0,6945 \frac{tonCO_2}{kWh} = 24.795,25 \frac{tonCO_2}{año} \quad (5.5)$$

El resultado muestra que anualmente se evita emitir al ambiente **24.795,25 tonCO<sub>2</sub>/año**; estas toneladas de CO<sub>2</sub>; podrían ser financiadas mediante los mercados de carbono por alguna empresa internacional el cual sería incluido como un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL); haciendo posible la construcción e implementación del presente proyecto.

Basado en que los proyectos MDL tienen como objetivo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero; y mediante estos se generen Reducciones de Emisiones Certificadas (CER); que serán acreditadas a los países desarrollados al implementar proyectos en países en vías de desarrollo [49].

Teniendo en cuenta que existen diferentes mercados de carbono, cada uno con diferentes precios para los CER, se ha tomado como referencia los precios del Sistema Europeo de Negociación de CO<sub>2</sub> SENDECO [50]; el cual presenta un valor medio anual para la tonelada de CO<sub>2</sub> de **0,40€** que a la fecha representa unos **0,45 USD\$**; valor con el cual se calculará la viabilidad ambiental del proyecto.

$$24.795,25 \frac{tonCO_2}{año} * 0,45 \frac{\$}{tonCO_2} = 11.157,86 \frac{\$}{año} \quad (5.6)$$

El período de retorno viene dado por:

$$Tiempo\ de\ retorno = \frac{99.534,68}{11.157,86} = 8,92\ años \quad (5.7)$$

Si el proyecto es analizado desde el punto de vista medioambiental, el tiempo de retorno de la inversión es de 8,92 años.

## CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y BIBLIOGRAFÍA

### 6.1 Conclusiones

Al desarrollar el presente diseño de una microrred eléctrica basada en energías renovables para suministrar electricidad a un área de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur; se obtuvieron los siguientes resultados y conclusiones:

1. La energía anual consumida por la carga en estudio alcanza un valor de 35.702,31 kWh; y presenta un pico de potencia de 9,03 kW.
2. La potencia total instalada en paneles fotovoltaicos que abastecerá la presente demanda es de 28,5 kW.
3. Como apoyo de la generación fotovoltaica se plantea instalar un aerogenerador de 6 kW; que cubrirá un 23% de la energía anual demandada.
4. Con el objeto de que las cargas no queden sin suministro eléctrico se instalará 52 baterías; las cuales brindarán autonomía de 1 día; planteando también la instalación de un generador de emergencia de combustión interna de 10kVA.
5. El precio total para la implementación de una microrred basada en renovables para suministrar electricidad a un área de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur alcanza un valor de **USD\$ 99.534,68** dólares de los Estados Unidos de América.
6. El tiempo de recuperación de la inversión sería de 18,58 años, si se pagara con precios de energía convencional estipulado en el pliego tarifario **ARCONEL 2016**.
7. El tiempo de recuperación de la inversión sería de 12,38 años, si se pagara con precios de energía renovable estipulada en la regulación **CONELC 001/13**.
8. Con la construcción de la microrred eléctrica basada en energías renovables se evita emitir al ambiente **24.795,25 tonCO<sub>2</sub>/año**, y mediante la implementación del proyecto por MDL a través de las Reducciones de Emisiones Certificadas CER, el tiempo de retorno de la inversión sería de 8,92 años.
9. El proyecto es viable económicamente si se construye mediante la implementación como proyecto MDL; ya que el tiempo de recuperación de la inversión es de 8,92 años; lo cual es menor al tiempo de vida del presente proyecto.
10. El presente proyecto debería implementarse en forma inmediata, buscando financiamiento a través del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable o del Ministerio del Ambiente; a fin de disponer con un proyecto modelo para la construcción de microrredes en lugares de difícil ingreso con energía convencional, ya que en la actualidad el gobierno del Ecuador, está promoviendo el uso de energías renovables y una gran ventaja sería la obtención de mediciones y datos de una instalación real.

11. Instalar más estaciones meteorológicas en el Ecuador con el objeto de tener información veraz no solo para aspectos climáticos, sino para utilizarlos en el diseño de futuros proyectos de energías renovables.
12. Realizar más investigación por parte del **INER** y de las Instituciones de Educación Superior; sobre el diseño e implementación de proyectos de microrredes en el Ecuador; ya que hasta la fecha existe un gran déficit de información en este campo a nivel de estudio.
13. Desarrollar un marco regulatorio por parte del **ARCONEL**; que sirva de guía para el diseño y construcción de proyectos de microrredes eléctricas en el Ecuador.

## 6.2 Bibliografía.

- [1] A. Colmenar Santos, D. Borge Díaz, E. Collado Fernández y M. A. Castro Gil, Generación distribuida, autoconsumo y redes inteligentes, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia (España), 2016.
- [2] F. G.-T. L. V. Carlos Bordonsa, «Gestión Óptima de la Energía en Microrredes con Generación Renovable,» *Sciencedirect*, vol. 12, nº 2, pp. 117-132, 2015.
- [3] C. Wikipedia, «Wikipedia,» 1 Julio 2016. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sectores\\_de\\_producci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Sectores_de_producci%C3%B3n). [Último acceso: 1 Julio 2016].
- [4] J. A. Y. Morón, Sistemas eléctricos de distribución, México, 2009.
- [5] F. M. J. L. J.-W. J. Jackson John Justo, « AC-microgrids versus DC-microgrids with distributed energy resources,» *ScinceDirect*, vol. 24, nº 1, pp. 387-405, 2013.
- [6] A. S.-M. M. R. F. Martin-Martínez, «A literature review of Microgrids,» *ScienceDirect*, vol. 62, nº 1, pp. 1133-1153, 2016.
- [7] J. A. B. Eneko Unamuno, «Hybrid ac/dc microgrids-Part I,» *ScienceDirect*, vol. 52, nº 1, pp. 1251-1259, 2015.
- [8] C. Solar, «Cenitsolar,» 5 Julio 2016. [En línea]. Available: [http://www.cenitsolar.com/imagenes/esquema\\_asilada.jpg](http://www.cenitsolar.com/imagenes/esquema_asilada.jpg). [Último acceso: 5 Julio 2016].
- [9] SlideShare, «SlideShare,» 6 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://es.slideshare.net/Hanna25/la-electricidad-en-el-medio-rural>. [Último acceso: 6 Julio 2016].
- [10] Cpogeografía, «3DCiencia,» [En línea]. Available: <https://cpogeografia2quintob09092013.files.wordpress.com/2013/09/solsticios-y-equinoccios-2.jpg>. [Último acceso: 7 Julio 2016].
- [11] Blogspot, «Blogspot.com,» [En línea]. Available: [http://2.bp.blogspot.com/-GcOWNSV\\_j-k/UoUBtn-kmCl/AAAAAAAAOE/xTupX6ibFWs/s640/lat%252Blon.jpg](http://2.bp.blogspot.com/-GcOWNSV_j-k/UoUBtn-kmCl/AAAAAAAAOE/xTupX6ibFWs/s640/lat%252Blon.jpg). [Último acceso: 7 Julio 2016].
- [12] U. d. Jaén, «www.ujaen.es,» [En línea]. Available: [https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/02\\_radiacion/01\\_basico/images/posi\\_sol.gif](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/02_radiacion/01_basico/images/posi_sol.gif). [Último acceso: 8 Julio 2016].
- [13] C. Vargas, «Microrredes - Sistemas Fotovoltaicos,» de *Redes eléctricas inteligentes*, Valencia, 2016.
- [14] SMA, «Sunny Boy,» [En línea]. Available: [http://img.archiexpo.es/images\\_ae/photo-g/87541-4562515.jpg](http://img.archiexpo.es/images_ae/photo-g/87541-4562515.jpg). [Último acceso: 9 Julio 2016].

- [15] C. Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa\\_el%C3%A9ctrica](https://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_el%C3%A9ctrica). [Último acceso: 10 Julio 2016].
- [16] C. Wikipedia, «Wikipedia,» Wikipedia, [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_e%C3%B3lica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_e%C3%B3lica). [Último acceso: 2 Agosto 2016].
- [17] Motiva, «www.Motiva.fi,» [En línea]. Available: [http://www.motiva.fi/myllarin\\_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/tube.htm](http://www.motiva.fi/myllarin_tuulivoima/windpower%20web/es/tour/wres/tube.htm). [Último acceso: 3 Agosto 2016].
- [18] EGA, «www.ega-asociacioneolicagalicia.es,» [En línea]. Available: <http://www.ega-asociacioneolicagalicia.es/es/elvientoengalicia/larosadelosvientos.php>. [Último acceso: 5 Agosto 2016].
- [19] M. V. López, Ingeniería de la Energía Eólica, Marcombo, 2012.
- [20] minieolicadelanzarote, «www.minieolicadelanzarote,» [En línea]. Available: <http://www.minieolicadelanzarote.com/images/dibujos/Aeros.PNG>. [Último acceso: 11 agosto 2016].
- [21] R. L. T. I. S. M. S. P. N. H. Benjamin Kroposki, «A look at Microgrid Technologies and Testing Projects from around the world,» *IEEE*, vol. 07, pp. 1540-7977, 2008.
- [22] I. P. S. M. a. L. S. K. Sambeet Mishra, «Modelling of wind energy-based microgrid system implementing MMC,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH*, vol. 40, nº 7, pp. 952-962, 2016.
- [23] Z. R. Z. G. a. A. Z. Linlin Gao, « A New Technology of Comprehensive Islanding Detection,» *International Journal of Hybrid Information Technology*, vol. 9, nº 6, pp. 1-10, 2016.
- [24] M. R. P. Samaniego y J. L. E. Abad, Energías Renovables en el Ecuador situación actual tendencias y perspectivas, Cuenca: Universidad de Cuenca, 2015.
- [25] I. N. d. E. E. y. E. R. INER, «www.iner.gob.ec,» [En línea]. Available: <http://www.iner.gob.ec/proyectos/>. [Último acceso: 4 Septiembre 2016].
- [26] A. d. E. Ecuador, Ley del Régimen del Sector Eléctrico del Ecuador, Quito: Asamblea del Ecuador, 2015.
- [27] P. D. Tagle Salazar, «Diseño preliminar de un sistema hibrido de suministro de energía domestica para una comunidad aislada en base al modelado en el software homer,» ESPOL, Guayaquil, 2010.
- [28] P. M. M. Tello, «Operación confiable de una microrred aislada con generador principal diésel, aplicando un sistema de control difuso en el deslastre de sus cargas,» UPS, Cuenca, 2014.

- [29] H. X. C. C. Andres Eulalio Cabrera Tacury, «Modelación Dinámica de la Oferta – Demanda de una Microrred Eléctrica,» Universidad de Cuenca, Cuenca, 2014.
- [30] J. B. S. Fernandez, «Desarrollo de un algoritmo de interrelación para microrredes de distribución eléctrica,» Universidad de Cuenca, Cuenca, 2015.
- [31] ESPOL, «[www.espol.edu.ec](http://www.espol.edu.ec),» [En línea]. Available: <http://blog.espol.edu.ec/jhohearr/energia-eolica-en-el-ecuador/>. [Último acceso: 1 Octubre 2016].
- [32] A. E. d. E. c. f. d. g. eléctrica y M. d. E. y. E. Renovable., «MEER,» [En línea]. Available: [www.energia.gob.ec](http://www.energia.gob.ec). [Último acceso: 10 Octubre 2016].
- [33] C. Anticorrupción. [En línea]. Available: <http://comisionanticorrupcion.ec/?p=3455>. [Último acceso: 11 Octubre 2016].
- [34] MEER, «[www.energia.gob.ec](http://www.energia.gob.ec),» [En línea]. Available: <http://www.energia.gob.ec/electrificacion-rural-con-energias-renovables/>. [Último acceso: 12 Octubre 2016].
- [35] A. N. d. Ecuador, « Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica,» Asamblea Nacional del Ecuador, Quito, 2015.
- [36] R. ARCONEL-004-15, «Requerimientos Técnicos para la Conexión y Operación de Generadores Renovables No Convencionales a Las Redes de Transmisión y Distribución,» ARCONEL, Quito, 2015.
- [37] R. CONELEC-002-13, « Procedimiento de Calificación y Registro de los Proyectos de Generación de Energías Renovables No Convencionales menores a 1 MW,» ARCONEL, Quito, 2013.
- [38] ARCONEL, «[www.arconel.gob.ec](http://www.arconel.gob.ec),» Regulaciones ARCONEL, [En línea]. Available: <http://www.regulacionelectrica.gob.ec/regulaciones/>.
- [39] G. EARTH. [En línea]. [Último acceso: 13 Octubre 2016].
- [40] E. E. R. C. SUR, «ARCGIS,» [En línea]. Available: <http://geoportal.centrosur.gob.ec/viewerEERCS/Default.aspx>. [Último acceso: 14 Octubre 2016].
- [41] E. E. Quito, «Guía para diseño para redes de distribución,» [En línea]. Available: <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/921866/Gu%C3%ADa+para+dise%C3%B1o+de+redes+para+distribuci%C3%B3n/b681b238-2c70-4ee6-b737-ecca4ca8b55c>. [Último acceso: 20 Octubre 2016].
- [42] NASA, «Base de datos de la NASA,» [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets%40nrcan.gc.ca&step=1&lat=-3.30342657&lon=-79.40414068&submit=Submit>. [Último acceso: 21 septiembre 2016].

- [43] NASA, «Base de datos de la NASA,» [En línea]. Available: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?email=rets@nrcan.gc.ca>. [Último acceso: 22 Septiembre 2016].
- [44] S. J. S. Miño, «Energías Renovables Conceptos y Aplicaciones,» *WWF-Fundación Natura*, vol. 2, nº 1, p. 41, 2003.
- [45] J. C. Patricio Astudillo, «Tesis - Análisis energético de centrales eólicas,» Universidad de Cuenca , Cuenca , 2012.
- [46] BORNAY, «BORNAY AEROGENERADORES,» [En línea]. Available: <http://www.bluemarket.es/wp-content/uploads/2014/10/Ficha-T%C3%A9cnica-Bornay-6000.pdf>. [Último acceso: 21 Septiembre 2016].
- [47] ARCONEL, «Pliego tarifario 2016,» ARCONEL , Quito, 2016.
- [48] O. J. Haro Lenin, «Factor Anual de Emisión de CO<sub>2</sub> Producido por el Parque Generador del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, Mediante la Aplicación de la Metodología de la Convención Marco Sobre el Cambio Climático UNFCCC, para el Periodo 2009-2014,» CENACE, Quito, 2014.
- [49] F. Carbono, «Plataforma sobre financiamiento climático para Latinoamérica y el Caribe,» [En línea]. Available: <http://finanzascarbono.org/mercados/mecanismo-desarrollo-limpio/preguntas-frecuentes-sobre-mdl/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2016].
- [50] SENDECO2, «Sistema Europeo de Negociación de CO<sub>2</sub>,» [En línea]. Available: <http://www.sendeco2.com/es/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2016].