DISEÑO DE UNA MICRORED DE BAJA TENSIÓN PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DEL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ

JUAN MANUEL REY LÓPEZ

PEDRO PABLO VERGARA BARRIOS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

DISEÑO DE UNA MICRORED DE BAJA TENSIÓN PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DEL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ

JUAN MANUEL REY LÓPEZ

PEDRO PABLO VERGARA BARRIOS

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico, respectivamente.

Director:

PhD. Gabriel Ordóñez Plata

Co-directores:

PhD. Johann Farith Petit Suárez

PhD. Rodolfo Villamizar Mejía

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

BUCARAMANGA

2012

A mi mamá, mi papá y mi hermano.

A Pote y a mi tía.

Juan Manuel Rey López

A Martin, mi padre y mi madre, por ser la razón que me da fuerzas para seguir. Todos mis triunfos se los dedico a ustedes.

Pedro Pablo Vergara Barrios

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 17

ABSTRACT 18

INTRODUCCIÓN 19

OBJETIVOS 21

OBJETIVO GENERAL 21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS 21

1. MARCO TEÓRICO 23

1.1 MICRORREDES 23
1.2 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA MICRORRED 25
1.2.1 SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA 26
1.2.2 REGULADORES DE CARGA 26
1.2.3 ACUMULADORES O BATERÍAS 27
1.2.4 INVERSORES 27
1.2.5 SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE CARGA 28
1.2.6 MEDIDORES INTELIGENTES 29
1.2.7 PROTECCIONES 30
1.2.8 CONTROL Y MANEJO DE LA MICRORRED 31
1.3 TOPOLOGÍAS DE MICRORREDES 32
1.4 ENERGÍA EÓLICA 32
1.4.1 VIENTOS EN COLOMBIA 36
1.4.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE GENERACIÓN EÓLICA 38
1.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA 39
1.5.1 EFECTO FOTOVOLTAICO 39
1.5.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS 40

2. EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR DISPONIBLE EN EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ 42

2.1 EQUIPO DE MEDICIÓN 42
2.2 TRATAMIENTO DE DATOS 48
2.2.1 DATOS DE LA UNIDAD INSTALADA EN GUATIGUARÁ 49
2.2.2 DATOS DE LA ESTACIÓN PTAR RÍO FRÍO 50
2.2.3 DATOS DE TEMPERATURA 51

3. EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE EN EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ 53

3.1 GENERALIDADES DEL VIENTO 53
3.2 CLIMA DE GUATIGUARÁ 58
3.3 ANÁLISIS DE DATOS: ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN EL PTG 58
3.4 ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA CDMB Y ANÁLISIS DE DATOS 69
3.5 CONCLUSIONES 73

4. OTROS SISTEMAS DE GENERACIÓN 75

4.1 GENERADOR DIESEL 76
5. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MICRORRED 80
5.1 CARGAS 86
6. SELECCIÓN DE EQUIPOS DISPONIBLES EN EL MERCADO 93
6.1 SELECCIÓN DE LOS PANELES SOLARES 93
6.1.1 DEFINICIÓN DE MARCAS COMERCIALES 93
6.1.2 SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE PANELES 94
6.1.3 VALORACIÓN TÉCNICO-COMERCIAL 95
6.1.4 SELECCIÓN DEL PANEL 96
6.1.5 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA DISEÑO 97
6.1.6 MODELADO DEL PANEL SOLAR 97
6.1.7 CONFIGURACIÓN DE PANELES 108
6.2 SELECCIÓN DE LOS AEROGENERADORES 110
6.2.1 GENERALIDADES DE LAS TURBINAS EÓLICAS 110
6.2.2 REVISIÓN TECNOLÓGICA 112
6.2.3 SELECCIÓN TÉCNICA 113
6.3 SELECCIÓN DE LOS CONTROLADORES SOLARES 115
6.4 SELECCIÓN DE LOS REGULADORES / INVERSORES 116
6.4.1 SELECCIÓN DEL REGULADOR 116
6.4.2 SELECCIÓN DEL INVERSOR 118
6.4.3 SELECCIÓN TÉCNICA 118
6.5 SELECCIÓN DE LAS BATERÍAS 120
6.5.1 CÁLCULO DE LAS BATERÍAS 121
6.5.2 SELECCIÓN TÉCNICA 123
6.6 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CARGA 125
6.6.1 SELECCIÓN TÉCNICA 126
6.7 SELECCIÓN DEL RECTIFICADOR 127
6.8 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN 129
6.8.1 SELECCIÓN TECNICA 130
7. DISEÑO DE LAS INSTALACIÓNES ELÉCTRICAS 133
7.1 ANÁLISIS DE FLUJOS 133
7.2 SELECCIÓN DE CONDUCTORES Y DUCTOS 138
7.3 SELECCIÓN DE PROTECCIONES 140
7.4 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA 141
7.5 SELECCIÓN DE TABLEROS ELÉCTRICOS 142
8. PROSPECTIVA DE LA MICRORRED 143
8.1 PROSPECTIVA DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA Y EÓLICA. 143
8.2 PROSPECTIVA DE LA UNIDAD FLEX POWER ONE 144
8.3 PROSPECTIVA DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CARGA 144
8.4 PROSPECTIVA DE LAS CARGAS 146
8.5 PROSPECTIVA DE IMPACTO REGIONAL 147
9. RECOMENDACIONES TÉCNICAS 148

9.1 RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN, MANEJO Y ARRANQUE DE EQUIPOS.... 148
9.2 RECOMENDACIONES ESPECIALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA . 149
9.3 RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN DE CABLEADO, CANALETAS Y REDES DE COMUNICACIÓN 151
10. PRESUPUESTO DEL PROYECTO 153
CONCLUSIONES 156
BIBLIOGRAFÍA 159
ANEXOS 163

LISTA DE IMÁGENES

FIGURA 1. CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR DE 11 [KW]. 34
FIGURA 2. ESTRUCTURA BÁSICA DE UN AEROGENERADOR. 35
FIGURA 3. VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO EN SUPERFICIES 37
FIGURA 4. COMPONENTES DE LA UNIDAD VANTAGE PRO 2 DAVIS. 43
FIGURA 5. PANEL FRONTAL DEL SOFTWARE WHEATERLINK. 44
FIGURA 6. FOTO SATELITAL DE LA UBICACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA CDMB. 46
FIGURA 7. DATOS EN HSP DE LAS MEDICIONES DE LA UNIDAD INSTALADA EN GUATIGUARÁ. 49
FIGURA 8. DATOS EN HSP DE LAS MEDICIONES DE LA ESTACIÓN DE LA CDMB EN LA PTAR RÍO FRÍO. 50
FIGURA 9. DATOS DE TEMPERATURA DE LAS MEDICIONES DE LA UNIDAD INSTALADA EN GUATIGUARÁ. 52
FIGURA 10. ROSA DE LOS VIENTOS. 55
FIGURA 11. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN E. 59
FIGURA 12. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN ENE. 59
FIGURA 13. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN NE. 60
FIGURA 14. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN NNE. 60
FIGURA 15. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN N. 60
FIGURA 16. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN NNO. 61
FIGURA 17. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN NO. 61
FIGURA 18. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN ONO. 61
FIGURA 19. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN O. 62
FIGURA 20. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN OSO. 62
FIGURA 21. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN SW. 62
FIGURA 22. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN SSO. 63
FIGURA 23. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN S. 63
FIGURA 24. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN SSE. 63
FIGURA 25. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN SE. 64
FIGURA 26. HISTOGRAMA DE VIENTO - DIRECCIÓN ESE. 64
FIGURA 27. DISTRIBUCIÓN HORARIA DEL VIENTO POR AÑO. 65
FIGURA 28. DISTRIBUCIÓN PORCENTUAL DEL VIENTO POR AÑO. 65
FIGURA 29. ROSA DE FRECUENCIA DE DIRECCIÓN DEL VIENTO. 69
FIGURA 30. ROSA DE ENERGÍA ANUAL [KWH/M^2/AÑO] 69
FIGURA 31. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD AÑO 2002. 70
FIGURA 32. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD AÑO 2003. 70
FIGURA 33. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD AÑO 2004. 71

FIGURA 34. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD AÑO 2005. 71
FIGURA 35. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD AÑO 2006. 71
FIGURA 36. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD AÑO 2011. 72
FIGURA 37. ESTRUCTURA BÁSICA DE LA MICRORRED. 85
FIGURA 38. COMBINACIONES POSIBLES DE ENERGÍA DIARIA PARA CARGAS AC. 90
FIGURA 39. CURVA CARACTERÍSTICA DEL PANEL SOLAR SOLAR WORLD SW 255 EN CONDICIONES SCT. 101
FIGURA 40. CURVA CARACTERÍSTICA DEL PANEL SOLAR SOLAR WORLD SW 255 EN CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA. 105
FIGURA 41. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL PANEL SOLAR SOLAR WORLD SW 255 EN CONDICIONES SCT Y CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA. 106
FIGURA 42. POSIBILIDADES DE CONFIGURACIONES DE PANELES SOLARES. 109
FIGURA 43. TIPOS DE AEROGENERADORES VAWT. 111
FIGURA 44. DIAGRAMA DE FLUJOS DE LA MICRORRED 135

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. VALORES DEL COEFICIENTE DE HELLMAN (∝).....54
TABLA 2. DISTRIBUCIÓN DEL VIENTO POR VELOCIDAD EN EL PTG POR AÑO. 66
TABLA 3. DESCRIPCIÓN CONSOLIDADA DEL RECURSO EÓLICO.....68
TABLA 4. CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DIESEL SELECCIONADO. 79
TABLA 5. NOMENCLATURA DEL DISEÑO.....84
TABLA 6. COMBINACIONES POSIBLES DE ENERGÍA DIARIA PARA CARGAS AC. 91
TABLA 7. MODELOS DE PANELES SOLARES SELECCIONADOS. 94
TABLA 8. PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS SELECCIONADOS. 96
TABLA 9. CARACTERÍSTICAS FINALES DE DISEÑO.....97
TABLA 10. PARÁMETROS GENERALES DEL MODELO. 98
TABLA 11. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SOLAR WORLD SW 225 98
TABLA 12. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR WORLD SW 225 PARA CONDICIONES SCT. 101
TABLA 13. PARÁMETROS DE LOS PANELES SOLARES SELECCIONADOS. 102
TABLA 14. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SUN TECH STP225-24-VB-1 PARA CONDICIONES SCT.....102
TABLA 15. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR KYOCERA KD225GX-LPB PARA CONDICIONES SCT.....103
TABLA 16. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SOLAR REC REC225 PE-US PARA CONDICIONES SCT.....103
TABLA 17. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SCHOTT POLY-225 PARA CONDICIONES SCT. 103
TABLA 18. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR WORLD SW 225 PARA CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA.....104
TABLA 19. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SUN TECH STP225-24-VB-1 PARA CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA 106
TABLA 20. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR KYOCERA KD225GX-LPB PARA CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA. 107
TABLA 21. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SOLAR REC REC225 PE-US PARA CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA. 107
TABLA 22. VALORES CARACTERÍSTICOS DEL PANEL SOLAR SCHOTT POLY-225 PARA CONDICIONES TÍPICAS DE LA ZONA.....107
TABLA 23. VALORES MÁXIMOS DE DIFERENTES VARIABLES DE LOS PANELES PRESELECCIONADOS PARA RADIACIÓN DE 1000 W/M^2.....108

TABLA 24. VALORES MÁXIMOS DE DIFERENTES VARIABLES DE LA CONFIGURACIÓN DE PANELES POR FASE PARA RADIACIÓN DE 1000 W/M^2. 109
TABLA 25. GENERADORES HAWT CON VELOCIDADES DE ARRANQUE MENORES A 1 [M/S]. 113
TABLA 26. GENERADORES HAWT CON VELOCIDADES DE ARRANQUE MENORES A 1 [M/S], ANÁLISIS ECONÓMICO. 114
TABLA 27. ENERGÍA ANUAL DE ACUERDO A LA CURVA DE POTENCIA DEL AEROGENERADOR WIND ARROW 1000 TRUE-NORTH POWER CALCULADA PARA LA DIRECCIÓN SO. 114
TABLA 28. CONTROLADORES SOLARES SELECCIONADOS. 115
TABLA 29. CARACTERÍSTICAS DEL INVERSOR VFX3648. 119
TABLA 30. CARACTERÍSTICAS DEL REGULADOR FLEX MAX 80. 119
TABLA 31. MODELOS DE BATERÍAS DISPONIBLES EN EL MERCADO. 124
TABLA 32. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LA BATERÍA DEL FABRICANTE ROLLS. 124
TABLA 33. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL STATYS 127
TABLA 34. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL RECTIFICADOR HRP-600-24. 128
TABLA 35. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MEDIDOR PZ300-DE 130
TABLA 36. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL DERIVADOR SHUNT. 131
TABLA 37. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MEDIDOR POWERLOGIC PM710. 131
TABLA 38. TRANSFORMADOR DE CORRIENTE POWERLOGIC CT TI 100/5. 132
TABLA 39. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE CONDUCTORES. 139
TABLA 40. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE LOS DUCTOS. 140
TABLA 41. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DE PROTECCIONES. 141
TABLA 42. CARACTERIZACIÓN DE LOS TABLEROS ELÉCTRICOS. 142
TABLA 43. RANGOS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DE LOS EQUIPOS. 150

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Planos adjuntos (Diagrama unifilar y plano de detalle de la pared occidente)…….....….163

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UNA MICRORED DE BAJA TENSIÓN PARA EL LABORATORIO DE INTEGRACIÓN ENERGÉTICA DEL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ.[1]

AUTORES: JUAN MANUEL REY LÓPEZ, PEDRO PABLO VERGARA BARRIOS.[2]

PALABRAS CLAVES: microrredes, energías renovables, smart-grid.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad, con el auge desenfrenado de los centros urbanos, crece la demanda de energía que las empresas locales y nacionales deben proporcionar. Como consecuencia, muchas de las redes de suministro de energía eléctrica se encuentran sobrecargadas. Debido a esto, el desarrollo de las microrredes de media y baja tensión podría resolver problemas de suministro eléctrico, calidad y confiabilidad. La implementación de las microrredes en grandes sistemas urbanos, reduce los problemas de sobrecarga al igual que las pérdidas por distribución de la energía, debido a que las fuentes de generación y almacenamiento operan cerca de los puntos de consumo.

La arquitectura de la microrred puede enmarcase dentro de un concepto más amplio denominado smart-grid. Sin embargo, las microrredes cuentan con la capacidad de conectarse a la red de suministro local para abastecer la carga, en caso de que las fuentes de generación distribuidas fallen.

Las fuentes de generación que se utilizan para la implementación de las microrredes de media y baja tensión, son de energía renovable, de esta forma se permite obtener energía del medio circundante reduciendo el consumo de la red principal y costos a largo plazo. No obstante, antes de poder implementar un sistema de generación mediante energía renovable es necesario evaluar el recurso energético disponible con el fin de garantizar la eficiencia del sistema.

En este trabajo de grado se realiza un estudio de los recursos energéticos disponibles en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará, para la implementación de sistemas eólicos y fotovoltaicos. Además, se presenta el diseño de una microrred de baja tensión y las características de los equipos que la componen, para dotar la infraestructura del Laboratorio de Integración Energética.

[1] Trabajo de grado.

[2] Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: PhD. Gabriel Ordóñez.

ABSTRACT

TITTLE: DESING OF A LOW POWER MICROGRID FOR THE ENERGY INTEGRATION LABORATORY IN GUATIGUARÁ TECHNOLOGICAL PARK.[3]

AUTHORS: JUAN MANUEL REY LÓPEZ, PEDRO PABLO VERGARA BARRIOS.[4]

KEYWORDS: microgrids, renewable energies, smart-grid.

DESCRIPTION: Nowadays, the accelerated growth of the urban centers increases the demand of energy that local and national companies should produce.

Consequently, most of the supply grids are overloaded. For this reason, the development of medium and low power microgrids could resolve the problems of electric power supply, quality and reliability. The implementation of microgrids in big urban systems, reduces the problems of overload and distribution energy losses, because the generation and storage sources operate near the loads.

Microgrids architecture can be framed in the broader concept called smart grids. However, microgrids have the ability to connect to the local grid to supply the load in case the generation sources fail.

Generation sources used for the implementation of medium and low power microgrids are of renewable energy, thus obtaining clean energy and reducing the principal grid consumption and long terms costs. Nonetheless, before implementing a renewable generation system it is necessary to evaluate the available energetic resource in order to ensure the efficiency of the system.

This project includes an available energetic resource study in the implementation of wind and photovoltaic system in Guatiguará technologic park. Furthermore, presenting the design of a low power microgrid and the characteristics of the equipment making up the microgrid to provide the energy integration laboratory.

[3] Degree Work

[4] Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Electric, Electronic and Telecommunications School. Director: PhD. Gabriel Ordoñez Plata.

INTRODUCCIÓN

Con la creciente popularidad y desarrollo en los últimos años de los sistemas de generación en base a energías renovables, se abre una nueva opción para el futuro abastecimiento energético. Sus fuentes son prácticamente inagotables, sus emisiones son muy escasas y en general, su contribución a la descentralización energética permitiría mayor equilibrio económico y participación del usuario final en el proceso de generación y consumo.

Sin embargo, la instalación de sistemas generadores de energía en base a recursos renovables debe estar acompañada de la modernización del modelo de distribución y administración del sistema energético, en países como Colombia. De igual forma, si la legislación actual no se modifica de manera que se obtengan beneficios por la instalación de estos sistemas, se reduzcan las tarifas de los impuestos de importación de los equipos y se faciliten los trámites para la obtención de los permisos de funcionamiento, el impacto e inversión de este tipo de sistemas se verá reducido.

La dependencia de los sistemas de generación en base a recursos energéticos asociados a condiciones climáticas, evidentemente cambiantes, requiere la integración de la red eléctrica como parte del sistema, debido a que se debe garantizar que, sin importar las condiciones meteorológicas, se abastezca confiablemente de energía a las cargas.

A este escenario de red eléctrica integrada se le ha denominado microrred, caracterizado por usar fuentes de energía distribuida, en su mayoría renovables, dispositivos almacenadores de energía, y un sistema basado en electrónica de potencia que permite censar el flujo de potencia en ambas direcciones (recopilando información importante para el mantenimiento y facturación) e interconectarse con la red cuando requiera abastecerse por escasez o vender excedentes al sistema, operación que se lleva a cabo de manera automatizada.

Las microrredes pueden beneficiar tanto a usuarios como a empresas distribuidoras, pues cuentan con un servicio confiable, limpio (por la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero) y económico a largo plazo. Además, la distribución de la generación permite solucionar a las empresas electrificadoras problemas asociados a las sobrecargas. Por otro lado, se abrirán enormes posibilidades para desarrollos en tecnologías que apuntan a la utilización de la electricidad como recurso energético para vehículos híbridos o totalmente eléctricos.

Debido a esto, a nivel mundial se están desarrollando centros de investigación y laboratorios desde los cuales universidades y entes privados han empezado a estudiar a fondo las microrredes. Se espera que el parque tecnológico de Guatiguará, sede de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander cuente con un laboratorio de integración energética en el que se pueda estudiar el comportamiento y la integración de estas redes con la red eléctrica actual.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño de los aspectos técnicos del laboratorio de integración energética ubicado en el parque tecnológico de Guatiguará. El desarrollo del diseño implica la formulación de una propuesta para la implementación del laboratorio de integración energética en base a un estudio de los dispositivos y sistemas disponibles en el mercado que garanticen una flexibilidad en la operación de la microrred.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Definir las características técnicas básicas necesarias de los elementos que componen el laboratorio.

- Presentar un estudio detallado sobre la potencia que se espera generen los sistemas eólicos y fotovoltaicos dependiendo de las condiciones climatológicas en la ubicación del parque tecnológico de Guatiguará. Este estudio permitirá determinar las condiciones de carga máxima que la microrred puede suministrar en condiciones normales de operación.

- Formular una propuesta de diseño de una microrred para la implementación del laboratorio de integración energética basado en el estudio de los dispositivos de medición, generación y control disponibles en el mercado, considerando entre los criterios de selección: costo, facilidad de manejo y

adquisición de datos de medición e información del estado del sistema, integrabilidad, flexibilidad, protocolo de comunicación, entre otros.

1. MARCO TEÓRICO

La implementación de sistemas eléctricos inteligentes, capaces de proporcionar la potencia necesaria a una carga determinada mediante la interconexión de varios sistemas de generación distribuida, generalmente basados en energías renovables, han permitido el desarrollo del concepto de microrred. Para que un sistema eléctrico sea considerado como una microrred, debe cumplir con ciertas especificaciones técnicas. En este capítulo, se describe el concepto de microrredes, sus características de operación y flujo de potencia, de igual forma se realiza una descripción de los componentes que las conforman y de las características generales de los tipos de generación asociados a éstas.

1.1 MICRORREDES

La arquitectura unidireccional de la red eléctrica actual, vertical en su operación de generación, distribución y consumo ha empezado a requerir cambios drásticos debido a los avances en las nuevas tecnologías en generación, así como necesidades de características dinámicas y velocidad en la transferencia de información y comunicaciones. El desarrollo de las redes inteligentes, está enfocado a la solución de problemas de confiabilidad y a la implementación de sistemas a base de energías renovables, con todas las características positivas que se les reconocen a estos.

De este concepto surge la microrred, la cual se define como una red eléctrica integrada que utiliza fuentes de generación distribuidas, generalmente de energías renovables y sistemas de almacenamiento de energía para alimentar a determinada demanda local.

A diferencia del concepto de smart-grid, la microrred puede funcionar tanto conectada al sistema eléctrico principal como desconectada de este, en caso de

perturbaciones eléctricas o si la demanda energética así lo permite. En la definición de microrred no se especifican tensiones ni se fijan límites de potencia. Ello, dependerá en gran medida de la aplicación de la microrred, las cargas a las cuales se les suministra energía y la disponibilidad de recursos energéticos cerca de la ubicación de la misma.

Dentro de las muchas ventajas de las microrredes se encuentran [3]:

- **Eficiencia energética.** Con una adecuada planificación y operación de los sistemas de generación y almacenamiento de la microrred, se puede conjugar la generación eléctrica y térmica para aumentar la eficiencia energética.

- **Incremento de la utilización de energías renovables.** Las microrredes facilitan la penetración de los sistemas de generación en base a energías renovables, pues se hace uso de los recursos energéticos renovables disponibles a través de un sistema acondicionado para manejar este tipo de tecnologías.

- **Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.** La elección de las fuentes de generación y sistemas de almacenamiento eléctrico más idóneos contribuyen a la reducción de este tipo de emisiones.

- **Reducción del costo energético.** Una microrred puede participar en el mercado eléctrico y vender el exceso de generación hacia la red eléctrica, lo que reduciría el precio de generación del recurso energético, característica clave para el desarrollo de un sistema más incluyente.

- **Incremento de la seguridad del suministro.** En la actualidad, las redes eléctricas ofrecen un nivel de seguridad adecuado para el funcionamiento

de las cargas eléctricas. Sin embargo, en el caso de perturbaciones en el sistema de distribución la microrred puede desconectarse del sistema y operar de forma autónoma hasta que se realice el mantenimiento adecuado.

- **Minimización de las pérdidas eléctricas.** En las microrredes las fuentes de generación se ubican cerca de los centros de consumo, por lo que se reducen pérdidas de potencia por distribución y transporte, lo cual puede reducir el costo de la energía en un porcentaje significativo.

1.2 ELEMENTOS QUE CONFORMAN UNA MICRORRED

La microrred proporciona beneficios a los usuarios en calidad y seguridad en el servicio, como también a la empresa electrificadora al resolver los problemas de sobrecarga. El núcleo principal de una microrred está compuesto por un sistema de control basado en tecnologías de la información y comunicación, este sistema permite manejar la red eléctrica como un ente único basado en un sistema de medición avanzado para la gestión de la generación y consumo interno de la red.

Además del sistema de control principal, la microrred está compuesta por sistemas de generación distribuidas que utilizan energías renovables. Las fuentes de generación para las microrredes de especial interés son las de menor generación (<100 kW) con interfaces electrónicas. Estos sistemas, generalmente micro-turbinas, paneles solares, aerogeneradores, celdas de combustibles, se ubican cerca de los sitios de consumo.

La estructura de la microrred además contiene acumuladores de DC o baterías, reguladores de carga, inversores de tensión para la conversión de tensión DC en AC, un sistema de transferencia de potencia y las protecciones necesarias para brindar seguridad a la red eléctrica ante cualquier perturbación o variación

inesperada de las condiciones climáticas, fallas por corto circuito o en los equipos. A continuación se describirán elementos importantes que componen a las microrredes.

1.2.1 SISTEMAS DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Los sistemas de generación distribuida que conforman una microrred son un grupo de fuentes de energía que se pueden conectar a la red principal o que pueden funcionar de manera autónoma. Generalmente, fuentes de energía renovable como solar, eólica, micro turbinas, celdas de combustibles y esquemas de cogeneración. La instalación e implementación de cada uno de estos sistemas dependerá en gran medida de las condiciones climáticas y ubicación geográfica del lugar donde se ubicará la microrred.

1.2.2 REGULADORES DE CARGA

Para el correcto funcionamiento del sistema es necesario instalar un sistema de regulación de carga entre la unión de los paneles solares y las baterías. Este dispositivo recibe el nombre de regulador y tiene la función de evitar situaciones de carga y sobredescarga de las baterías, con el fin de alargar su vida útil. El regulador trabaja por lo tanto en los dos procesos. En la parte relacionada con la carga, su función es garantizar una carga suficiente al acumulador o batería y evitar situaciones de sobrecarga. Y en la parte de descarga se encargará de asegurar el suministro diario necesario y evitar la descarga excesiva de la batería.

1.2.3 ACUMULADORES O BATERÍAS

Para almacenar la carga que se genera en los paneles solares, los aerogeneradores y otras fuentes dependientes de condiciones variables, se utilizan comúnmente acumuladores o baterías. Con estos, se pueden construir sistemas de tamaño pequeño. Generalmente, se emplean baterías especiales que permiten reducciones de carga hasta del 60% sin daños. Su vida útil bajo estas condiciones llega a ser de 5 a 7 años dependiendo del fabricante y de la operación del sistema. La configuración de las baterías se diseña de manera que se pueda mantener la tensión de operación mientras se proporciona la potencia necesaria para el funcionamiento de la carga, sin sobrepasar los límites mínimos de almacenamiento de las baterías, según las características definidas por los fabricantes. El número total de baterías dependerá del consumo promedio en amperes-hora y el número de días de autonomía que se estime conveniente.

1.2.4 INVERSORES

Los inversores se utilizan para convertir la corriente continua (CC) generada por los aerogeneradores, paneles solares, acumuladores o baterías en corriente alterna (CA) y de esta manera poder ser inyectada en la red eléctrica o usada en instalaciones eléctricas aisladas. Se distinguen varios tipos de inversores, el inversor de onda sinusoidal es capaz de producir corriente alterna de onda sinusoidal similar a la de la red, este tipo de inversor es utilizado en sistemas aislados. Los inversores autoconmutados pueden producir electricidad compatible con la red usando su propio circuito interno y utilizan la misma tecnología que los inversores sinusoidales. Los inversores autoconmutados son utilizados en las microrredes debido a su capacidad de producir una señal eléctrica compatible con la de la red. Así, cuando sea necesario, la red eléctrica principal puede ser

desconectada y el inversor puede proporcionar la potencia que sea requerida por la carga, sin detener el suministro.

Otra de las características importantes en la operación de un inversor es su capacidad de continuar operando de forma aislada. Los inversores *grid-tied* generan una onda sinusoidal concordante en tensión, fase y frecuencia con la señal de la red. Para poder operar necesitan de esta señal como entrada. Los inversores tipo *grid-tied* dejan de operar una vez ocurre una falla en la red eléctrica. Estos inversores son utilizados en aplicaciones aisladas de la red o en donde todo el sistema detiene su operación si la tensión proveniente de la red presenta alguna falla. Los inversores tipo *grid-off* generan una señal sinusoidal pura; poseen circuitería interna de control para mantener las rangos de tensión y frecuencia dentro de los parámetros considerados estándares y admisibles por la red. Este tipo de inversor opera sin necesidad de la red eléctrica, por lo que puede ser utilizado para operar de forma aislada. Los inversores utilizados para el diseño de la microrred deben tener la capacidad de operar en forma aislada, debido a que se espera que esta sea una de las características de funcionamiento de la microrred.

1.2.5 SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE CARGA

Los sistemas de transferencia de potencia o de transferencia de carga (STS), son los equipos encargados de la coordinación de inyección de potencia a la carga. Son el eje central de la microrred, pues su función va más allá de coordinar la entrega de potencia. Este equipo debe contar con la tecnología e infraestructura necesaria para transferir la alimentación de una carga crítica hacia cualquiera de los sistemas de generación (o la red eléctrica) que conforman la microrred y garantizar el suministro constante y estable en fase, tensión y frecuencia.

Los equipos de transferencia de carga actuales poseen la capacidad de expandir el número de fuentes de los sistemas de generación distribuida a las cuales se encuentran conectadas. Esto, debido a que es posible realizar una configuración con más equipos similares para garantizar la potencia que sea requerida por las cargas. Este equipo debe garantizar la separación completa de los sistemas de generación, de tal forma que si se detecta una falla en la red o alguno de los sistemas de generación distribuida, este sea aislado de la microrred y la operación continúe de forma normal. El STS cuenta con equipos internos de medición de los parámetros y variables de la calidad de la energía eléctrica que es suministrada, software de control, y protocolos de comunicaciones como RS232, RS485 y capacidad de monitorización remota mediante Ethernet.

1.2.6 MEDIDORES INTELIGENTES

La infraestructura de medición avanzada o AMI, por sus siglas en inglés, se compone de medidores digitales de estado sólido con comunicación de dos vías, capaz de proporcionar los valores de los parámetros que caracterizan la microrred. Parámetros como tensión, corriente, frecuencia, fase y potencia consumida por las cargas, permiten conocer el comportamiento cambiante de la energía que se produce por los sistemas locales de generación, y como se distribuye dicha energía dentro del sistema.

Los objetivos de la utilización de medidores inteligentes basados en tecnologías de la información y comunicación son:

- Robustecer y fortalecer la red, mejorando su operación e índices de calidad.
- Informar al operador en tiempo real sobre el uso y el costo de la energía eléctrica, a través de variables como flujos de potencia, tensiones, corrientes y sus respectivos ángulos.

- Optimizar las conexiones de las fuentes de energías renovables.
- Gestionar activamente la demanda, permitiendo que los consumidores hagan uso eficiente de los recursos energéticos disponibles.
- Desarrollar arquitecturas descentralizadas, permitiendo el funcionamiento de instalaciones de menor tamaño, en armonía con el sistema.

1.2.7 PROTECCIONES

Las protecciones utilizadas para las conexiones que derivan de los inversores en corriente alterna, son las protecciones comúnmente utilizadas en las instalaciones eléctricas. Para proteger de una sobretensión, se colocan cerca de los sistemas de generación dispositivos conocidos como descargadores de tensión o varistores de alta energía. La función de este dispositivo es detectar sobretensiónes en un espacio-tiempo determinado y derivarlas a tierra. Para las protecciones de los paneles solares se recomienda utilizar protecciones magnetotérmicas o interruptores seccionadores.

Las protecciones deben responder a las dos estructuras básicas que componen la microrred, la red eléctrica y los sistemas de generación distribuida. Si la falla es en la red eléctrica, la respuesta deseada del sistema es que aísle la microrred de la red principal, tan rápido como sea necesario para proteger las cargas del sistema. Si la falla es dentro de la microrred, el sistema coordinador debe aislar la menor parte posible de la microrred para eliminar la posible falla. Los sistemas de protección convencionales se basan en la medición de la corriente de cortocircuito del sistema.

La coordinación de protecciones es por tanto un componente de diseño de gran importancia. Para esto hay que tener en cuenta que actualmente los sistemas de distribución se diseñan en base a un alimentador a partir del cual se ramifican las fases y las cargas del sistema, por ser un sistema estático, es relativamente

sencillo dimensionar las corrientes y potencias estimadas así como los diferentes tipos de corrientes de falla. En una microrred, la complejidad de esta coordinación puede aumentar a medida que existan posibilidades de reconfiguraciones, lo cual implica diferentes escenarios. La coordinación, por tanto, debe prever este tipo de posibilidades, mediante una adecuada planificación de la microrred.

1.2.8 CONTROL Y MANEJO DE LA MICRORRED

El control de la microrred está a cargo del sistema de transferencia de potencia o STS, debido a que este equipo cumple la función de eje central de transferencia de potencia proveniente de los sistemas de generación distribuida o de la red de servicio público. El STS, debido a los medidores internos que posee, es capaz de realizar un análisis de los diferentes parámetros de operación de las dos fuentes redundantes, y de las condiciones de operación de la carga, con el objetivo de decidir si la fuente prioritaria proporciona las mejores condiciones de operación para el correcto funcionamiento de la carga o es necesario hacer la transferencia hacia la fuente de respaldo.

No obstante, para robustecer el control de todos los nodos de conexión y transferencia de energía, las microrredes utilizan medidores inteligentes. Estos medidores son capaces de proporcionar, mediante diferentes protocolos de comunicación, los valores en tiempo real de las condiciones de operación de cada uno de los sistemas de generación.

Toda esta integración, entre sistemas de medición y comunicación, permiten la estructuración de una red capaz de operar de forma autónoma y con alta eficiencia, con el fin de garantizar el flujo de potencia hacia la carga, pero teniendo como prioridad el uso de la energía producida mediante los sistemas de energías renovables instalados.

1.3 TOPOLOGÍAS DE MICRORREDES

Existen tres formas de clasificación de las microrredes según su topología [1]:

- **AC.** Donde los elementos se conectan a través de un sistema de conexión en AC en el que se lleva a cabo el intercambio energético. Dentro de la microrred se realiza una distribución de energía eléctrica en AC.

- **DC.** Donde la distribución de la energía dentro de la microrred se hace en DC. El intercambio energético se hace a través de un sistema de conexión DC y es éste el que se conecta a la red eléctrica a través de un inversor DC/AC. Las cargas en AC se alimentan también a través de inversores.

- **Mixta.** Es el caso en el que coexisten dos sistemas de conexión, uno en DC conectado a la red eléctrica a través de un inversor y otro AC que puede ser la propia red. Los diferentes elementos se conectan de acuerdo a su naturaleza al sistema de conexión correspondiente.

1.4 ENERGÍA EÓLICA

Actualmente, la energía eólica es una fuente de generación ampliamente utilizada principalmente porque, al igual que la energía solar, se caracteriza por ser flexible en su instalación y de bajo costo de mantenimiento, ofreciendo una energía económica y limpia. Generalmente cuando se habla de energía eólica, ésta se asocia a los sistemas de generación conformados por grandes parques eólicos. Sin embargo, los aerogeneradores de baja potencia también se han convertido en una opción interesante para aplicaciones de cargas pequeñas o medianas.

No existe una clasificación rigurosa sobre los aerogeneradores de baja potencia, ni se especifica su límite de generación de potencia en un valor máximo de 100 [kW]. Sin embargo, se cuenta con una normativa que, aunque no es de obligatorio cumplimiento, es un referente al respecto: la norma IEC-61400-2, la cual define el concepto de aerogenerador de baja potencia como aquel cuya área de barrido sea menor a 200 [m^2]. La potencia generada por un aerogenerador con ésta área depende de la calidad de su diseño, encontrándose valores nominales de hasta 65 kW. [8]

La cantidad de energía que puede producir una turbina eólica depende de las características del viento en el lugar de instalación. El viento es una masa de aire en movimiento por lo que puede transmitir energía cinética. Los aerogeneradores utilizan esa energía para producir electricidad, por lo tanto antes de instalar un aerogenerador es necesario conocer el potencial energético del viento que circula en el sitio de la instalación. La expresión (1) permite observar la relación del potencial del viento (Pn) en función del área barrida por el rotor A y de la velocidad del viento en las aspas del aerogenerador.

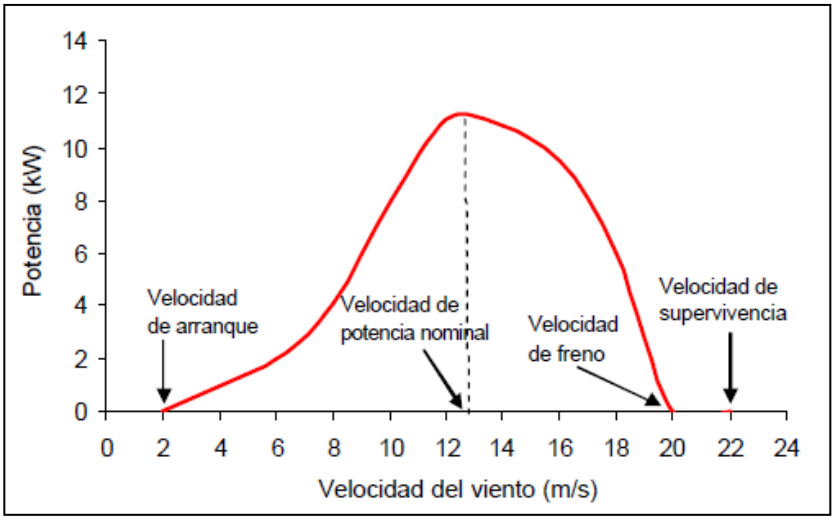
$$p_n \sim \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (1)$$

De esta relación, se pueden determinar varias características importantes, como que la potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento. Este factor puede indicar, al final, la eficiencia del sistema, por lo que es importante determinar rigurosamente los valores de velocidades del viento que se esperan para poder dimensionar la potencia de la turbina eólica que debe instalarse. Además, la potencia es proporcional al área barrida por el rotor, un aumento en el diámetro del rotor produce un aumento importante en la potencia. Y por último, la relación directa entre la potencia y la densidad del aire ρ, que hace evidente que cuanto más denso sea el aire se podrá extraer más potencia del aerogenerador.

Es importante entonces tener en cuenta las temperaturas del aire en las diferentes estaciones, en caso de que existan estas en el lugar de la instalación.

Evidentemente, no toda la energía cinética del viento puede ser convertida en electricidad, la eficiencia del sistema está limitada por rozamientos mecánicos y aerodinámicos, el límite de Benz, rendimiento del generador eléctrico, etc.

La potencia generada por un aerogenerador en función de la velocidad del viento se determina por la curva denominada “curva de potencia”. Ésta es una de las más significativas de los aerogeneradores y es única para cada diseño. En la Figura 1 se puede observar una curva de potencia para un aerogenerador de 11 [kW], de la cual se obtienen cuatro importantes valores.



Fuente: AEROGENERADORES INFERIORES A 100 kW. Maria Jose Cuestas. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. 2008.

Figura 1. Curva de potencia de un aerogenerador de 11 [kW].

Las velocidades críticas para el funcionamiento de un aerogenerador se definen a continuación:

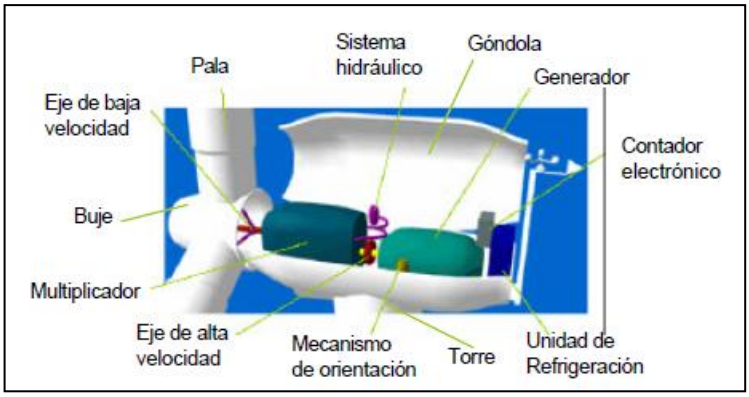
Velocidad de arranque. Velocidad del viento con la que el aerogenerador empieza a producir electricidad.

Velocidad de potencia nominal. Velocidad del viento con la que el sistema produce su potencia máxima o nominal. La potencia generada entre la velocidad de arranque y la potencia nominal presenta un comportamiento no lineal.

Velocidad de freno. Velocidad del viento con la que el rotor se detiene. Este sistema de freno se implementa para evitar que el rotor sufra daños por la alta velocidad del viento.

Velocidad de supervivencia. Velocidad del viento con la que el generador puede dañarse sin importar que el rotor esté detenido.

Dependiendo del eje de giro del aerogenerador con respecto a la dirección de la velocidad del viento, éstos se clasifican en dos grupo: Los aerogeneradores de eje horizontal o HAWT (Horizontal axis wind turbine) y los aerogeneradores de eje vertical o VAWT (Vertical axis wind turbine). Los aerogeneradores de eje horizontal son los más utilizados y su eje de rotación es paralelo a la dirección de la velocidad del viento. En la Figura 2 se puede observar la estructura básica de un aerogenerador.



Fuente: Energía Eólica, IDEA.

Figura 2. Estructura básica de un aerogenerador**.**

Los elementos de los cuales depende con mayor relevancia la eficiencia del aerogenerador son las palas o aspas, el multiplicador y el generador. De la estructura física es importante el diseño de la torre, pues es esta la que sostiene toda la estructura y su diseño debe garantizar la reducción de las vibraciones a causa del empuje del viento. De igual forma, el sistema de control del aerogenerador debe detener la maquina y limitar su velocidad por razones de seguridad y optimización del funcionamiento del sistema.

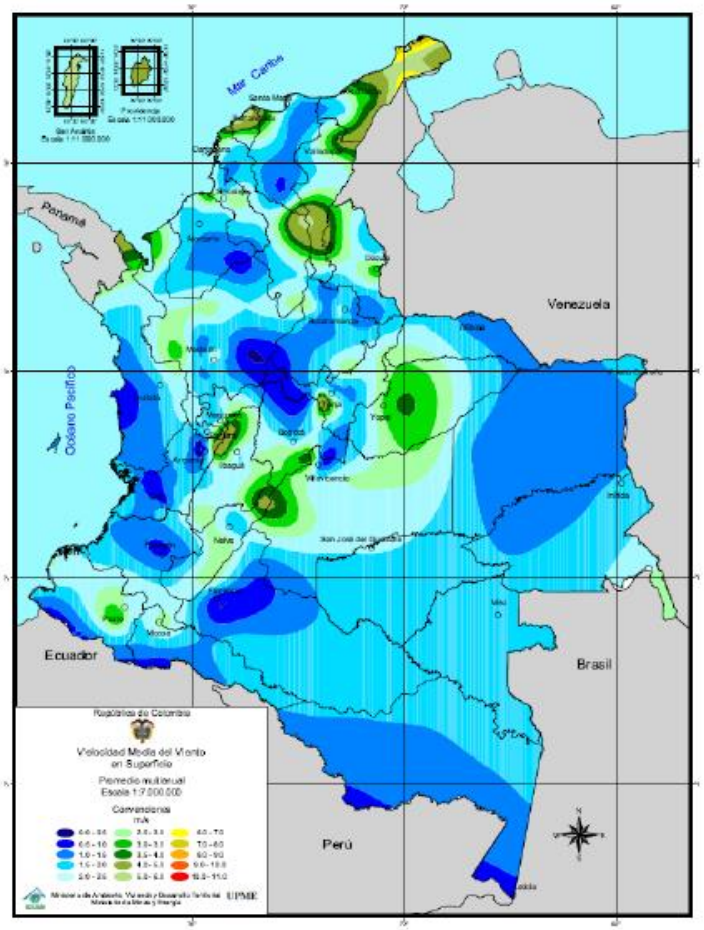
1.4.1 VIENTOS EN COLOMBIA

Las cordilleras colombianas tienen gran influencia en el clima del país, no solamente porque interfieren con los flujos atmosféricos, sino porque debido a su absorción y efectiva emisión de radiación solar, las cordilleras actúan como fuentes y sumideros de calor, generando su propio patrón de circulación atmosférica. [23]

Colombia, por estar ubicada geográficamente en una zona de convergencia intertropical, está sometida a los vientos alisios que soplan desde el hemisferio norte y del sureste en el hemisferio sur. Los vientos alisios influyen sobre las regiones planas del país donde se observa un flujo constante de viento en gran parte del año. Regiones como la Orinoquía, la Amazonía y la región Caribe muestran el mayor flujo de aire a grandes velocidades, mientras que las condiciones del relieve y la radiación solar determinan la velocidad y dirección del flujo del viento en la Región Andina y las zonas montañosas.

Los vientos alisios del Norte y del Caribe están presentes en toda la región Caribe y en el valle de Atrato, normalmente los cuatro primeros meses del año. Los vientos en esta región son fuertes, sobre todo en las partes planas del norte del

país. En la península de la Guajira, la velocidad promedio del viento en superficie es de 8 [m/s] ó 9 [m/s] variando muy poco su dirección. Estas velocidades del viento hacen atractiva a la Guajira para la instalación de grandes parques eólicos. En la Figura 3, se puede observar el mapa de velocidad de vientos de Colombia. De los estudios y datos proporcionados por el IDEAM[5]. se resaltan otras regiones del país que presentan condiciones de viento interesantes en menor medida para la producción energética, regiones como los Santanderes, la región montañosa del eje cafetero, en general, regiones en la cercanía del lago Calima en Huila y la zona desértica como Villa de Leiva, en Boyacá.



Fuente: Atlas del viento y la energía eólica en Colombia. IDEAM. 2003.

Figura 3. Velocidad media del viento en superficies.

[5] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia.

1.4.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DE GENERACIÓN EÓLICA

Para dimensionar y seleccionar adecuadamente los componentes de la generación eólica que hacen parte de una microrred, es necesario tener en cuenta los factores ambientales que están relacionados con ésta en el lugar de instalación. Para esto, lo más conveniente es realizar mediciones de estas variables en el lugar y, seguido, el tratamiento adecuado de los datos recolectados. Esto, puede incluso llevar a la conclusión de que lo más acertado es omitir este tipo de generación, por cuanto la potencia generada, según la información disponible en los catálogos de los fabricantes, no es suficiente para justificar la instalación de determinado equipo.

Para la toma de datos, se requiere de un equipo con capacidad para recolectar información de velocidad y dirección del viento. Como el equipo no necesariamente se instala a la altura del aerogenerador, es posible realizar una extrapolación de los datos obtenidos a través de la ley exponencial de Hellman (2):

$$V(h) = V_0(\frac{h}{h_0})^{\propto} \ (2)$$

O, de igual forma, a través del Modelo de Lysen (3):

$$V(z) = v_{ref} * \frac{\ln(\frac{z}{z_0})}{\ln(\frac{z_{ref}}{z_0})} \ (3)$$

Ecuaciones de tipo estadístico que se utilizarán más adelante en este documento, cuando se realice el tratamiento de datos recolectados.

Luego, se debe realizar una estimación del potencial eólico a partir del cual se calculan diferentes valores de potencia que permiten determinar la conveniencia de la instalación de la generación eólica y la capacidad de ésta.

1.5 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica se basa en el proceso de conversión de la luz directa del sol en energía eléctrica a través de algún dispositivo electrónico mediante el fenómeno físico conocido como efecto fotovoltaico. Debido a las características de éste, la generación fotovoltaica es adecuada para la implementación en cascos urbanos, tejados o fachadas, ya que no cuenta con elementos móviles y no genera humo. Además, por utilizar como recurso energético la luz solar, considerado un recurso energético inagotable a escala humana, el impacto ecológico se ve reducido.

En general, la energía solar fotovoltaica es de adecuada implementación en diverso número de aplicaciones en las cuales es necesario evaluar la viabilidad a través de las características asociadas a este tipo de generación.

1.5.1 EFECTO FOTOVOLTAICO

El sol es una increíble fuente de energía, en cada instante se liberan de él ondas electromagnéticas que acumulan cuantiosas sumas de energía, debido a la gran cantidad de fotones o agrupamientos en los que, de manera discreta como lo explica la teoría cuántica, se acumula la energía de la radiación solar.

Estas radiaciones que viajan varios millones de kilómetros antes de llegar la tierra, inciden en las capas exteriores de la atmósfera con un promedio del orden de 1400 [W] por metro cuadrado, y de 1000 [W] por metro cuadrado sobre la superficie terrestre, en un día despejado y en condiciones óptimas. La media, sin embargo, puede llegar a disminuir a valores promedio de 300 [W] por metro cuadrado por diferentes condiciones climáticas. [28]

La tierra solo recibe una infinitésima parte de la cantidad de energía emitida por el sol, que sin embargo, es suficiente para mantener las condiciones que han

generado vida en el planeta y que además, a partir de esta forma de captación energética, podría abastecer en gran medida la demanda de energía eléctrica.

La energía solar fotovoltaica funciona a partir del efecto físico fotovoltaico que consiste en la conversión de la energía solar en electricidad. Su descubrimiento se le atribuye a Edmond Bequerel quien fue el primero en observar la relación entre la generación eléctrica y la incidencia de la luz; más adelante Heirinch Hertz en 1887, adhiere anotaciones al concepto resaltando la incidencia de la luz ultravioleta en el alcance del arco entre electrodos conectados a alta tensión. Finalmente es Albert Einstein quien, en el año 1904, publica un documento en el que explica el efecto fotovoltaico, recibiendo por este la distinción del premio Nobel en 1921.

Este efecto consiste en la transformación de la energía almacenada en los fotones contenidos en la radiación solar en electricidad. El proceso ocurre en semiconductores que tiene la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando los electrones libres son capturados, se mueven produciendo una corriente eléctrica.

En las celdas se construye adecuadamente una unión de materiales p-n que genera un campo eléctrico permanente que actúa en forma de diodo permitiendo que las cargas eléctricas y la corriente sigan siempre la misma dirección.

1.5.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

Las células fotovoltaicas son los dispositivos en los que ocurre el efecto fotovoltaico. Están compuestas por materiales semiconductores con grosores que varían entre los 0,25 mm y los 0,35 mm. Se suelen construir en formas cuadradas y en áreas de aproximadamente 100 cm^2. [16] Las células se componen

básicamente de una capa delgada de material tipo n y otra mucho más espesa de material tipo p. Por la característica de estos materiales, la corriente generada solo fluye en el sentido p a n. La capa iluminada corresponde al material tipo n.

La corriente generada es proporcional a la luz incidida, característica que más adelante se describe con detalle. Hoy en día existen diferentes tecnologías de fabricación de células para aprovechar el efecto fotovoltaico. Sin embargo el mercado mundial es dominado por las de Silicio.

2. EVALUACIÓN DEL RECURSO SOLAR DISPONIBLE EN EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ

La evaluación del recurso solar disponible, es importante para el diseño de sistemas eléctricos que utilizan energía solar, ya que permite determinar la capacidad de generación de potencia y rendimiento. En particular, la medición de la radiación es clave para el dimensionamiento de este tipo de sistemas. [10]

La radiación solar es el conjunto de emisiones electromagnéticas mediante las cuales el sol libera energía a causa de una serie de reacciones que producen una pérdida de masa. La radiación total del sol es de 63450720 [W/m^2]. Sin embargo, esta energía es emitida en todas las direcciones, por lo que la tierra, afuera de la superficie atmosférica, solo recibe un valor aproximado de 1353 [W/m^2]. Esta cantidad es conocida como constante solar y es variable durante el año (más o menos en un 3%) a causa de la elipticidad de la órbita terrestre. [17]

El recurso solar disponible en determinado lugar puede ser caracterizado y medido a través de dos variables: irradiancia e insolación.

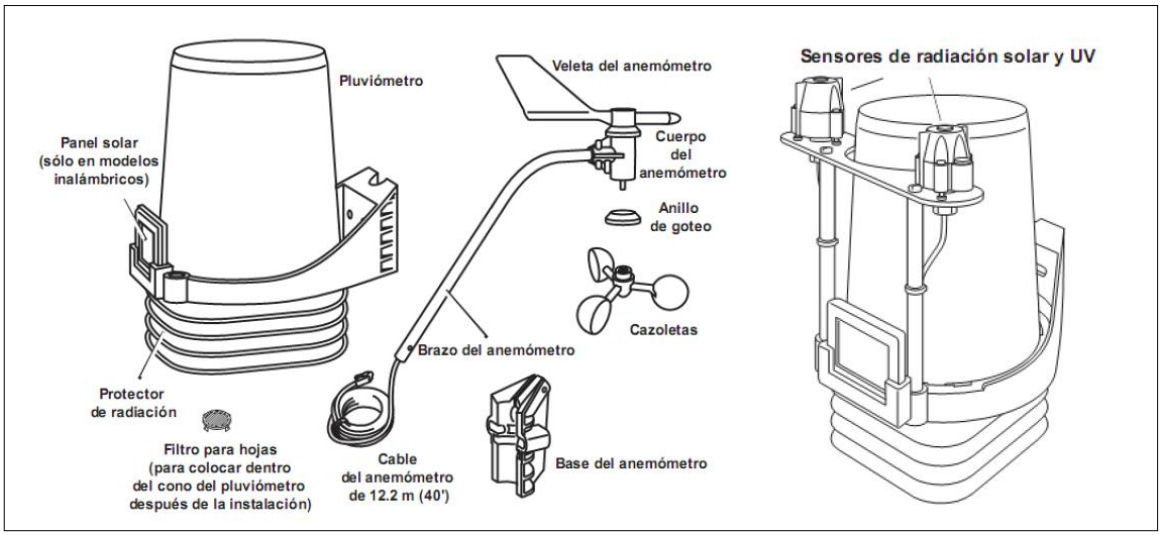
La irradiancia es la intensidad de la luz solar o la magnitud de potencia que incide sobre determinada área. Sus unidades son [W/m^2]. En un día con poca nubosidad, el sol puede alcanzar valores cercanos de 1000 o 1200 [W/m^2] La insolación es la cantidad de energía solar recibida en un intervalo determinado de tiempo. Sus unidades son $W\text{-}h/m^2$. [10]

2.1 EQUIPO DE MEDICIÓN

Para realizar las mediciones de irradiancia, se instaló en la sede de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander en Guatiguará, lugar

donde se encuentra el edificio de laboratorios del cual hace parte el laboratorio de integración energética, la unidad VANTAGE PRO-2 DAVIS, módulo adquirido por la E3T (Escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la Universidad Industrial de Santander) que permite medir diversas variables meteorológicas.

El módulo cuenta con sensores integrados (Figura 4) que permiten medir variables como temperatura, humedad, presión atmosférica, dirección y velocidad del viento, irradiancia, precipitación, densidad del aire, entre otras. Para mayor información de las funciones disponibles para esta unidad consultar [9].



Fuente: www.davisnet.com

Figura 4. Componentes de la unidad VANTAGE PRO 2 DAVIS.

El módulo incluye el software WEATHERLINK, que permite el almacenamiento y visualización de la medición histórica de las variables. Mediante este software y con la consola de recepción inalámbrica de datos, se reciben los valores de las variables meteorológicas cada 8 [s], y se actualiza el panel frontal del software (que se observa en la Figura 5). Los datos son almacenados en el disco duro del ordenador que funciona como base de datos para dicha estación, y son actualizados cada determinado tiempo según la configuración.

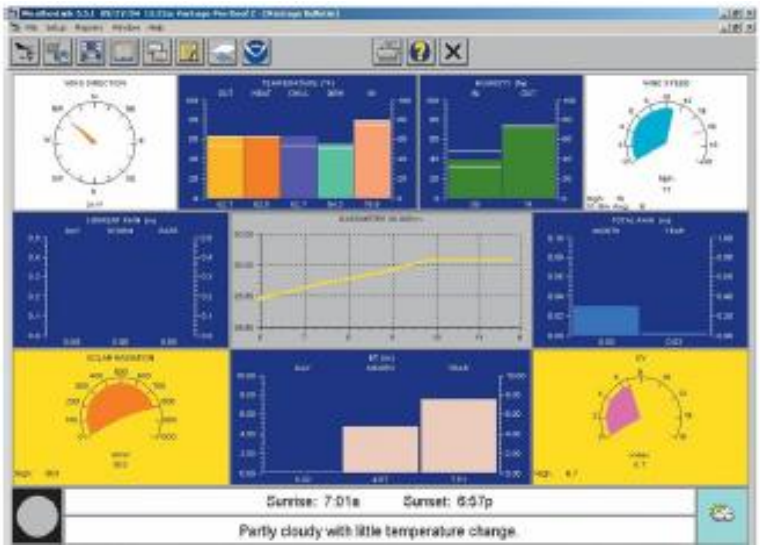


Figura 5. Panel frontal del software WHEATERLINK.

El equipo fue instalado a una altura aproximada de 35 [m] sobre el nivel del terreno del PTG.

Las mediciones fueron llevadas a cabo entre el 1 de Diciembre del 2011 y el 29 de Febrero del 2012 para un total de tres meses. Aunque evidentemente para este tipo de evaluación de recursos disponibles es necesario realizar mediciones de varios años, se deben tener en cuentas las siguientes consideraciones.

- **Tiempo del proyecto.** Debido a que a partir del diseño propuesto en el presente proyecto de grado, se realizará la adquisición de equipos que compondrán la microrred que hará parte del laboratorio de integración energética, y a los plazos con lo que cuenta el grupo de investigación GISEL para enviar la propuesta de compra a la vicerrectoría correspondiente de la universidad, las mediciones no pueden superar un periodo de tres meses.

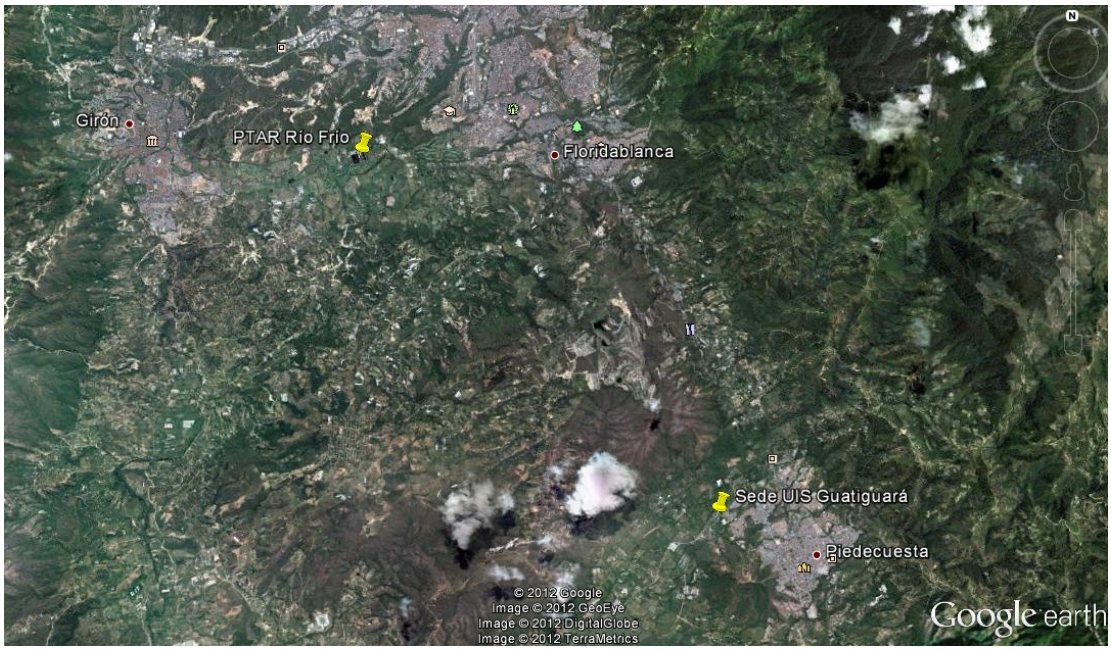
- **Tiempo de préstamo del equipo.** La unidad VANTAGE PRO 2 DAVIS, es utilizada por la E3T para la monitorización meteorológica del edificio de Ingeniería Eléctrica de la sede principal de la universidad, la cual espera

hacerse durante varios años. Teniendo en cuenta la intervención para el reforzamiento estructural del edificio, fue posible el préstamo del equipo que sin embargo debe ser devuelto una vez la intervención física permita la reinstalación de la unidad en el edificio de Ingeniería Eléctrica, ya que la E3T no cuenta con otras unidades adicionales de medición similar

- **Colombia se encuentra en la región tropical, donde no hay estaciones.** Aunque esto no garantiza que el comportamiento anual histórico meteorológico sea completamente estable, la variación es mucho menor que en países en los que hay estaciones. Esto permite que sea más apropiado dimensionar equipos con mediciones de corto tiempo.

Además de las mediciones realizadas con el equipo VANTANGE PRO 2 DAVIDS, se tuvo acceso a datos históricos de información meteorológica de la estación de medición de la CDMB (Corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga) ubicada en la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de Río Frío. Los datos fueron suministrados por la CDMB e incluyen registros de irradiancia, velocidad y dirección del viento del periodo de tiempo comprendido entre el 8 de Octubre del 2002 y el 22 de Octubre del 2007. La frecuencia de los datos es horaria, y aunque en algunos periodos de tiempo, por motivos de mantenimiento o percances en el equipo, hay ausencia de datos, en general la gran mayoría de días cuentan con esta información.

La estación de medición se encuentra ubicada en la PTAR de Río Frío a una distancia lineal de 10,36 [km] de la sede de la UIS de Guatiguará. La altitud de la PTAR de Río Frío es de 759 [m], mientras que la sede de la UIS tiene una altitud de 963 [m]. Entre los dos puntos, linealmente, la máxima altura tiene una elevación de 1200 [m]. En la Figura 6, se muestra una imagen satelital de la zona donde se encuentran demarcados ambos puntos y se observa la ubicación de ciudades cercanas como Floridablanca, Girón y Piedecuesta.



Fuente: www.maps.google.com

Figura 6. Foto satelital de la ubicación de la estación meteorológica de la CDMB.

Para el dimensionamiento de sistemas que requieren información meteorológica es necesario basarse en datos históricos de varios años. Evidentemente, no siempre es posible contar con esta información, bien sea porque no existe una estación o unidad de medición en el sitio de interés registrando esta información o porque las necesidades del proyecto no permiten la espera de los años adecuados para realizar estas mediciones.

Debido a esto, en algunas ocasiones es necesario analizar hasta qué punto es apropiado utilizar la información de la estación meteorológica más próxima. Para estos casos, existen algunos métodos que permiten transferir el historial de datos a partir de algún modelo, buscando que éste se aproxime al comportamiento de las variables del sitio de interés. Estos métodos se basan en el hecho de que para el mismo mes y a menudo para el mismo día, los factores que afectan las variables meteorológicas son bastante similares a lo largo de una región dada.

Para evaluar que tan apropiado puede ser utilizar datos de una estación cercana, deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos descritos en [11]:

- **El tamaño de la región debe considerarse pequeño.** Para el caso del proyecto, la distancia lineal entre la estación PTAR Río Frío y la sede de la UIS Guatiguará es de 10,36 [km], la cual es una distancia adecuada para aceptar este aspecto como apropiado.

- **Los mecanismos atmosféricos que gobiernan la precipitación y la nubosidad deben ser casi idénticos dentro de las partes analizadas de la región.** Tanto el punto en el que se encuentra ubicada la estación de la CDMB como la sede del edificio de laboratorios hacen parte del mismo departamento con igual piso térmico y, en general, iguales mecanismos atmosféricos. Se considera apropiado este aspecto.

- **La fisiología de la región sebe ser casi homogénea.** La altitud de la PTAR de Río Frío es de 759 [m], mientras que la sede de la UIS tiene una altitud de 963 [m]. Entre los dos puntos, linealmente, la máxima altura tiene una elevación de 1200 [m]. Este es el aspecto más crítico debido a la elevación que se encuentra entre ambos puntos, ya que esto puede afectar las variables meteorológicas, por lo que este aspecto se considera inapropiado.

- **Las condiciones del proyecto requieren la utilización de la información existente.** Este aspecto es bastante importante, debido a que las condiciones y requisitos del proyecto determinan la necesidad de trabajar con algún tipo de información guía, que permita el dimensionamiento requerido para el diseño. Esto puede justificar la utilización de los datos de alguna estación meteorológica cercana. En este caso, la estación de la CDMB ubicada en la PTAR Río Frío, es la estación

más cercana con la que cuenta esta entidad y el IDEAM (Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales de Colombia) con respecto a la sede en la que se encuentra el edificio de laboratorios.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriormente descritos, y que los datos obtenidos de parte de la CDMB fueron recolectados por la estación más cercana existente al punto de interés, se considera apropiada la utilización de estos datos y se realizará un análisis con respecto a los datos recolectados en el transcurso de tres meses con la unidad VANTAGE PRO 2 DAVIS.

2.2 TRATAMIENTO DE DATOS

Los datos recolectados tanto por la unidad de medición VANTAGE PRO 2 DAVIS como por la estación meteorológica de la CDMB permiten determinar el comportamiento histórico de la irradiancia en la zona, con la que se podrá definir y dimensionar la potencia que es posible obtener a través de la instalación de paneles solares.

La metodología que se utilizará para evaluar el recurso solar disponible consiste en el cálculo de las horas solar pico (HSP). Según se explica en [26] las HSP son una unidad comúnmente usada en el campo de la energía solar fotovoltaica, que permite estimar el potencial del recurso solar en determinada zona a partir de la medición de la irradiancia en el transcurso de los días.

El cálculo consiste en sumar o integrar los valores de irradiancia (W/m^2) en cada hora transcurrida, incluyendo tanto los valores de horas tempranas o tardes del día, así como los mayores valores del mediodía. El valor obtenido se divide en 1000 [W/m^2], que representa un hipotético sol con este valor de irradiancia. El resultado corresponde a las HSP, es decir, a las horas en las que se obtendría la

misma cantidad de energía de las mediciones, pero en este caso del hipotético sol de 1000 [W/m^2]. Evidentemente, las HSP no son iguales a las horas de sol.

Las HSP permiten calcular, dependiendo de la potencia nominal de los paneles seleccionados, un estimado de los kW-h disponibles para las cargas.

2.2.1 DATOS DE LA UNIDAD INSTALADA EN GUATIGUARÁ

Las mediciones realizadas con la unidad VANTAGE PRO 2 DAVIS, tienen una frecuencia horaria. La Figura 7, muestra el comportamiento de las HSP de cada día, así como su valor promedio.

El valor mínimo fue de 2,58 HSP y el máximo de 5,49 HSP. El valor promedio fue de 4,29 HSP. La desviación estándar de los datos en HSP fue de 0,77.

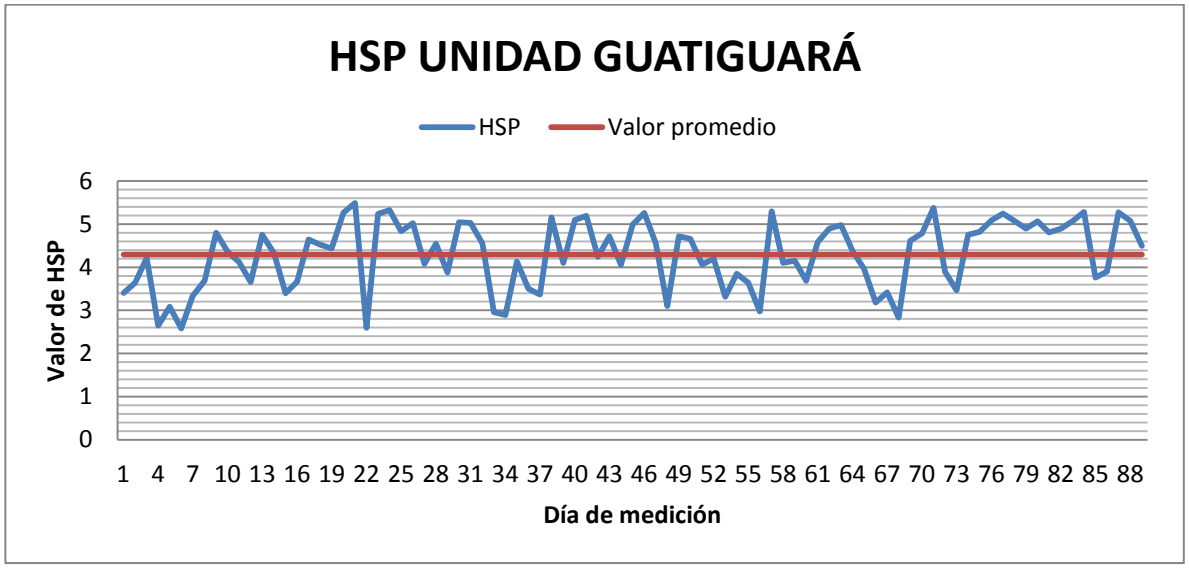


Figura 7. Datos en HSP de las mediciones de la unidad instalada en Guatiguará.

2.2.2 DATOS DE LA ESTACIÓN PTAR RÍO FRÍO

Las mediciones realizadas con la estación meteorológica de la CDMB en la PTAR Río Frío, tienen una frecuencia horaria. La Figura 8, muestra el comportamiento de las HSP de cada día, así como su valor promedio. Como se comentó anteriormente, los datos de muchos de los días del periodo de medición no se incluyeron debido a que la estación no registró información por percances con los sensores o por mantenimiento.

El valor mínimo fue de 1,49 HSP y el máximo de 7,98 HSP. El valor promedio fue de 5,43 HSP. La desviación estándar de los datos en HSP fue de 1,14.

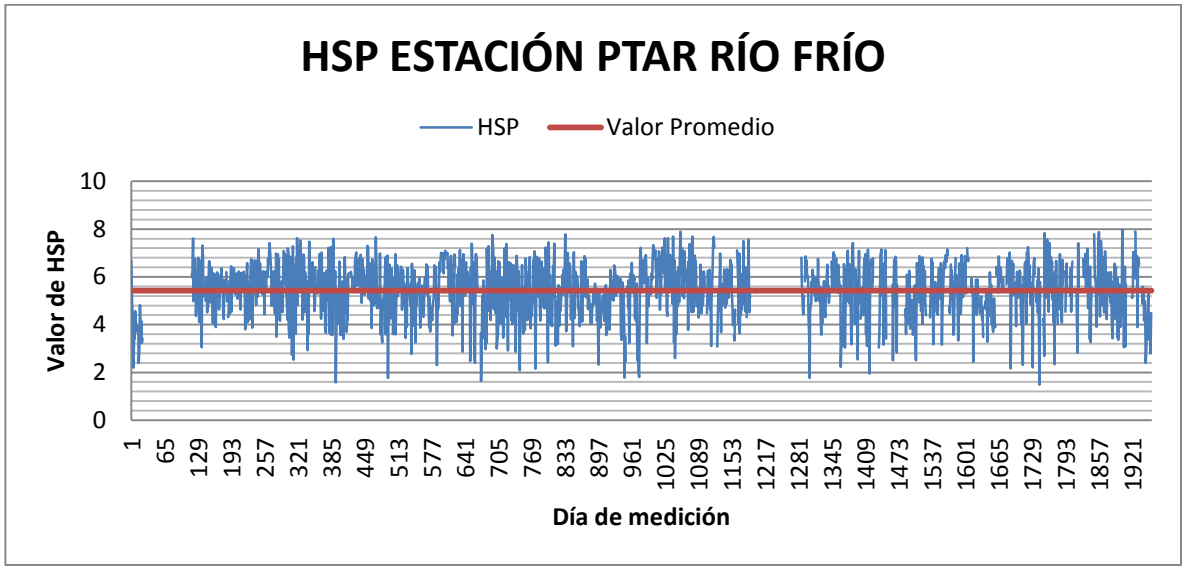


Figura 8. Datos en HSP de las mediciones de la estación de la CDMB en la PTAR Río Frío.

Se observa que los datos tomados por la estación meteorológica de la CDMB tienen un valor promedio y una desviación estándar mayor en comparación con los tomados por la unidad instalada en la sede de la UIS. Esta diferencia puede ser causada por muchos factores como la precisión del equipo de medición,

diferencias en las condiciones meteorológicas entre las dos locaciones debido a la fisiología del terreno o que debido a comportamientos anuales, los meses de medición de la unidad del edificio de laboratorios correspondieron a una tendencia baja de irradiancia solar.

A pesar de que existen diferencias entre el valor promedio y la desviación estándar, estas no se consideran críticas, como era de esperarse según el análisis realizado anteriormente. Debido a que es necesario adoptar un valor de HSP para realizar el dimensionamiento del sistema, se utilizará el valor de 4,29 HSP (valor promedio de la medición realizada por la unidad VANTAGE PRO 2 DAVIS) por ser éste el menor valor promedio medido y por consiguiente representar la situación de menor potencial solar.

2.2.3 DATOS DE TEMPERATURA

El historial de datos de temperatura se basa en las mediciones llevadas a cabo por la unidad instalada en Guatiguará, debido a que no fue posible contar con esta información en la estación de la CDMB. Los datos fueron tomados con frecuencia horaria y durante tres meses. La Figura 9, muestra la totalidad de datos recolectados, y su comportamiento oscilante se debe básicamente a la baja de temperatura nocturna diaria. La máxima temperatura registrada fue de 28,4 ^{o}C, mientras que la mínima temperatura fue de 17,7 ^{o}C. El valor promedio de temperatura fue de 22,8 ^{o}C. Se llevarán a cabo los cálculos con un valor entero de 23 ^{o}C.

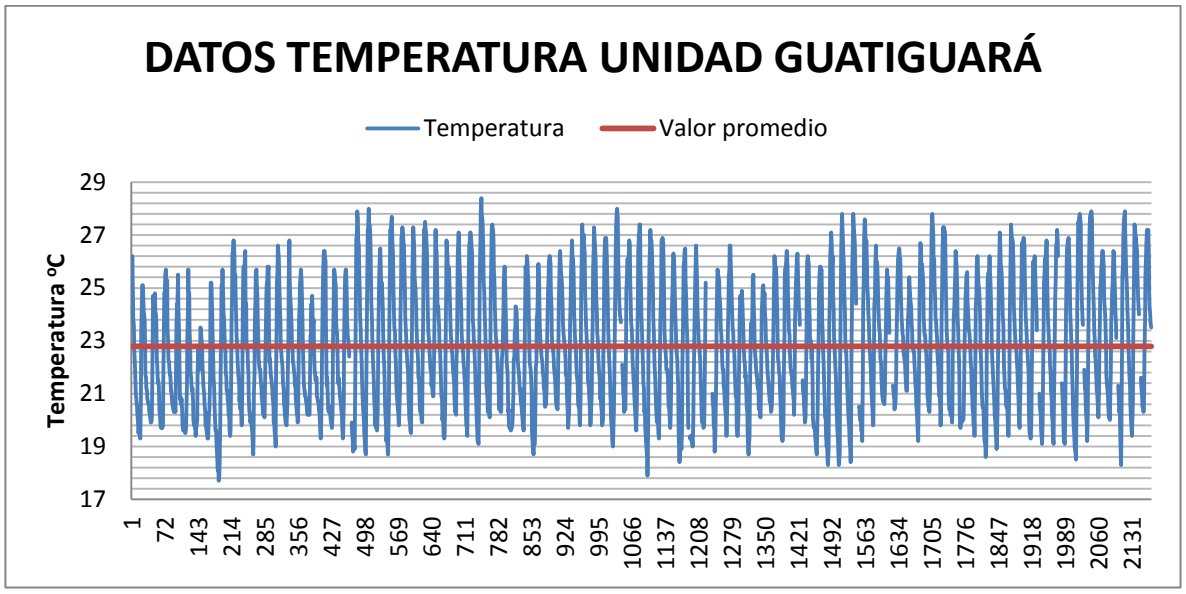


Figura 9. Datos de temperatura de las mediciones de la unidad instalada en Guatiguará.

3. EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO DISPONIBLE EN EL PARQUE TECNOLÓGICO DE GUATIGUARÁ

A continuación, se presentará un estudio sobre el viento, las condiciones climáticas en la sede del Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG) y el procedimiento de adquisición de los datos meteorológicos para la evaluación del potencial eólico. Este estudio permitirá establecer las características técnicas del sistema eólico a diseñar, como también el valor de potencia de generación esperada por dicho sistema.

3.1 GENERALIDADES DEL VIENTO

El viento es un proceso muy complejo que, sin embargo, puede ser descrito de manera sencilla. El viento es una forma de energía indirecta del sol; se produce por el calentamiento de masas de aires. El aire que se encuentra en las zonas más cálidas es menos denso por lo que asciende con facilidad, creando zonas de baja presión que son ocupadas por masas de aire frio, a este constante movimiento de aire con diferente temperatura se le conoce como viento. La energía eólica que se puede producir en un lugar depende de la velocidad del viento, la dirección y, en menor medida, de la densidad del aire.

VELOCIDAD DEL VIENTO

Como se indicó anteriormente, la velocidad del viento varía en función de la altura. Mediante la ley exponencial de Hellman es posible extrapolar la velocidad del viento para diferentes alturas, una vez conocido el valor de la velocidad a una altura determinada. La expresión para la ley de Hellman se puede observar en (4). La Tabla 1 presenta los valores de los coeficientes aproximados, dependiendo del tipo de terreno, para poder realizar la estimación de la velocidad del viento. Se

asumirá que $\propto = 0{,}3$ debido a que no existen edificios altos en la cercanía del PTG y el viento es recibido directamente de las cadenas montañosas aledañas [29].

$$V(h) = V_0(\frac{h}{h_0})^{\propto} \ (4)$$

Donde,

V_0: Velocidad del viento medida a la altura h_0. [m/s]

h_0: Altura conocida. [m]

$V(h)$: Velocidad del viento a la altura h. [m/s]

h: Altura a la que se desea conocer la velocidad del viento. [m]

$\propto$: Coeficiente de fricción o rugosidad del terreno. [-]

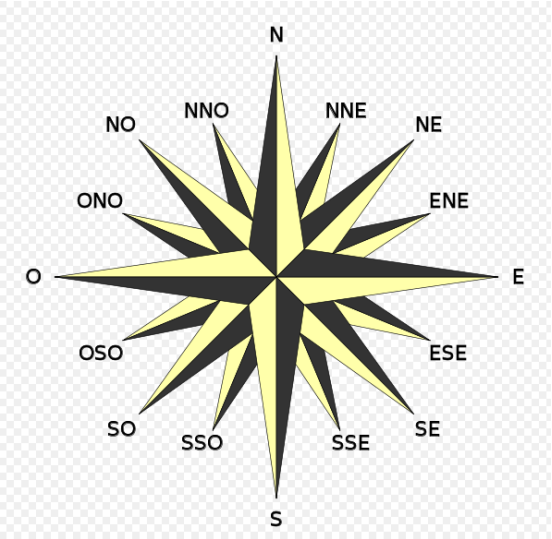
Tabla 1. Valores del coeficiente de Hellman ($\propto$).

Tipo de terreno	**Valor del coeficiente,** $\propto [-]$
Lagos, océanos y superficies suaves y duras	0,1
Césped	0,15
Terrenos de cultivos, setos, vallas o arbustos	0,2
Campo boscoso con mucho árboles	0,25
Pueblo pequeño con algunos árboles y arbustos	0,3
Área de la ciudad con edificios altos	0,4

DIRECCIÓN DEL VIENTO

La dirección del viento está definida por la dirección de donde proviene el viento, no hacia donde se dirige [18].

La dirección del viento se puede representar gráficamente mediante la rosa de los vientos, que se observa en la Figura 10. La rosa de los vientos típica presenta los cuatro rumbos cardinales N,S,E,O. Además de los cuatro rumbos laterales NE, SE, NO, SO y los ocho rumbos colaterales NNE, ENE, ESE, SSE, SSO, OSO,ONO y NNO.



Fuente: Tomado de http://es.wikipedia.org/wiki/Rosa_de_los_vientos

Figura 10. Rosa de los vientos.

DENSIDAD DEL VIENTO

Es la cantidad de masa de aire por unidad de volumen en la atmosfera. De acuerdo a los datos registrados por medio de la estación meteorológica VANTAGE PRO 2 DAVIS ubicada en las instalaciones del Parque Tecnológico de Guatiguará, el promedio aproximado de densidad corresponde a 1,0633 [Kg/m^3] para los meses de diciembre de 2011 a febrero de 2012. La estimación de este valor en un lugar determinado requiere del conocimiento de muchas otras variables y expresiones matemáticas complejas, por lo que se utiliza el valor promedio medido in-situ.

POTENCIA EÓLICA

Como se mencionó anteriormente, la potencia eólica en un lugar depende en gran medida de la velocidad del viento. El viento es aire en movimiento que posee energía cinética, los aerogeneradores permiten convertir esta energía en energía eléctrica. De acuerdo con la relación para la potencia eólica, la energía que se

puede generar depende del cubo de la velocidad del viento y del área de barrido de las aspas del aerogenerador, como también de las condiciones geográficas del lugar de emplazamiento. De la expresión (5), es posible concluir que la estimación de la velocidad del viento se debe hacer con incertidumbre baja, debido a que un error máximo del 10% en ésta, corresponde a un error máximo del 33% en la estimación de la potencia eólica esperada.

$$p_n = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad (5)$$

Donde,

A: Área de barrido de las palas del rotor. $[m^2]$
p_n: Potencia eólica generada. [W]
v: Velocidad del viento. [m/s]
ρ: Densidad del aire [Kg/m^3]

Para determinar la viabilidad de la instalación de aerogeneradores, se recomienda realizar mediciones de las condiciones de variabilidad del viento en el lugar, por lo menos durante un año. También, es necesario tener en cuenta otros parámetros como la variabilidad del viento con la altura, las condiciones geográficas del terreno, la turbulencia y el factor de rafagosidad [15]. Dependiendo del tamaño del parque eólico y del valor de inversión en el proyecto, se hace necesario ser más riguroso con el estudio previo para la determinación de la viabilidad del proyecto y de la energía que se espera pueda generar.

FRECUENCIA DEL VIENTO

Los tres aspectos más importantes al estudiar el perfil eólico de un lugar corresponden a la velocidad media del viento, las direcciones predominantes y el perfil vertical. Como se menciono anteriormente, para estudiar las direcciones predominantes se utiliza la rosa de los vientos. Mediante la Ley de Hellman, se

estudia el comportamiento vertical para la variación con respecto a la altura. Y finalmente, mediante los histogramas de velocidad se estudia el porcentaje de incidencia de las velocidades del viento.

Mediante estos gráficos es posible determinar cuáles son las velocidades del viento que se presentan con mayor frecuencia, el porcentaje de calma y la existencia de vientos fuertes. En forma general, la distribución porcentual de la velocidad del viento no es simétrica. Es decir, son escasos los vientos fuertes y mucho más comunes los vientos suaves y medios.

Existen dos funciones de probabilidad que se utilizan para describir el comportamiento del viento, la de Rayleigh y la de Weibull [15]. Estas funciones de probabilidad se adaptan adecuadamente a la forma de los histogramas de viento y son utilizadas cuando es necesario obtener una expresión analítica para la probabilidad del viento. La expresión de Weibull se ajusta mejor que la de Rayleigh, puesto que ésta es un caso particular. La expresión general de la función de Weibull se puede observar en (6).

$$h(V) = \frac{2V}{V_m} e^{-\left(\frac{V}{V_m}\right)^2} \quad (6)$$

De donde,

$h(V)$: Probabilidad del viento a la velocidad V.

V: Velocidad del viento. [m/s]

V_m: Velocidad media del viento. [m/s]

3.2 CLIMA DE GUATIGUARÁ

El Parque Tecnológico de Guatiguará (PTG) se encuentra localizado en Piedecuesta, zona metropolitana de Bucaramanga, en el nororiente colombiano. Situado en el valle conocido como Valle de Guatiguará, su extensión total es de 433 [km^2] en los cuales se puede observar un clima muy variado debido a la presencia de valles, mesetas, montañas, colinas y accidentes territoriales [2].

En la zona territorial donde se ubica el PTG se presenta un clima generalmente soleado, característico de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), la cual es un cinturón de baja presión que cubre toda la región cercana al Ecuador. Debido a esto la radiación solar es fuerte casi todo el año y no se presentan estaciones [16].

3.3 ANÁLISIS DE DATOS: ESTACIÓN METEOROLÓGICA EN EL PTG

A continuación se realizará un estudio detallado de la velocidad del viento, con los datos meteorológicos obtenidos mediante la instalación de la estación de monitorización en el PTG. Como se mencionó anteriormente, la altura de instalación del equipo es de 35 [m] aproximadamente.

Para este análisis no se hará un ajuste de los valores de la velocidad con respecto a la altura. Esto debido a que la altura de la cubierta técnica donde se instalarán los equipos es de aproximadamente 25 [m]. Así, asumiendo una altura del generador de aproximadamente 7 [m], la diferencia sería cercana a 3 [m] por lo que no se justifica una corrección de la velocidad del viento con respecto a este aspecto (esto sin considerar el diámetro de las aspas del rotor del aerogenerador). De las Figuras 11 a 26 se pueden observar los histogramas de velocidad para cada una de las 16 direcciones del viento en la altura de instalación del equipo de medición. Se presentan los histogramas solo para los meses de medición. De igual forma, más adelante se presenta el análisis de las condiciones de

variabilidad del viento para todo el año, después de realizar una extrapolación de los datos. Se hicieron mediciones por un total de 2116 horas, es decir; del 24,15% del total de horas del año, que corresponden a 8760 horas.

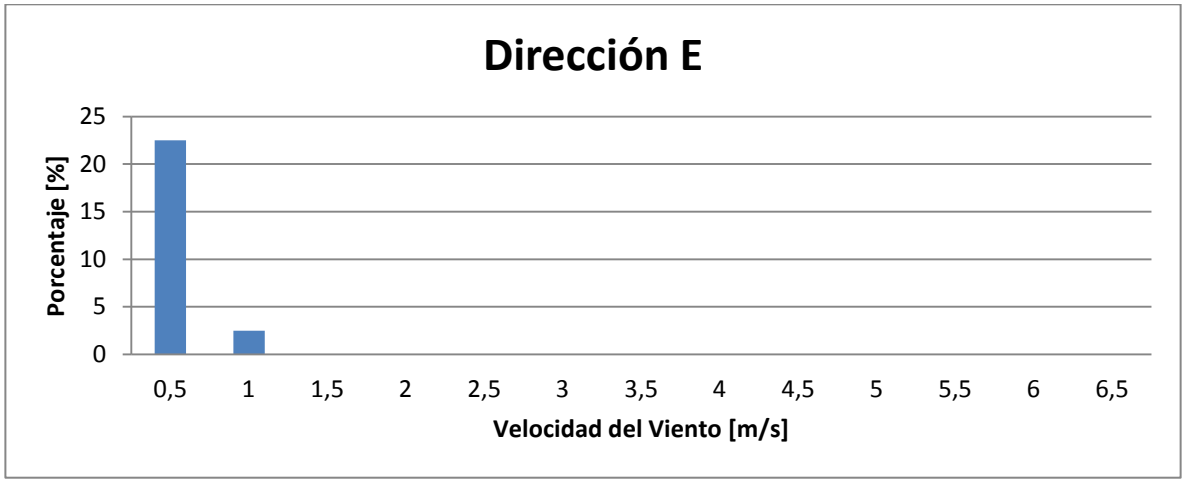


Figura 11. Histograma de viento - Dirección E.

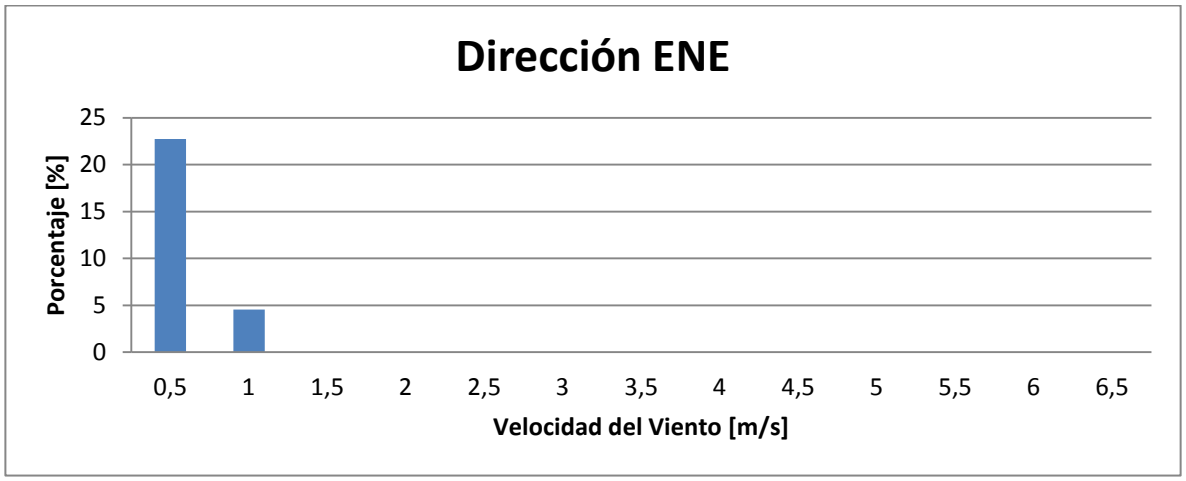


Figura 12. Histograma de viento - Dirección ENE.

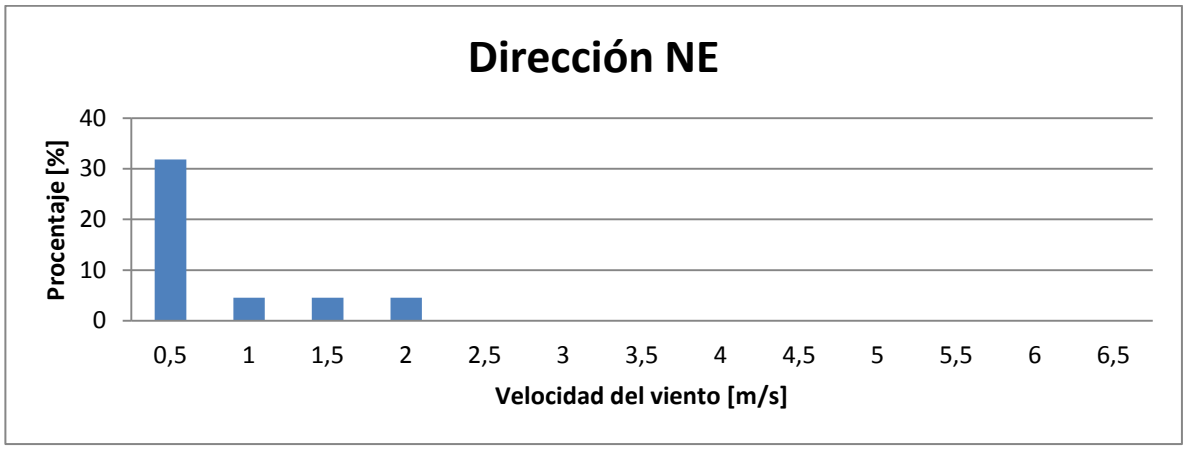


Figura 13. Histograma de viento - Dirección NE.

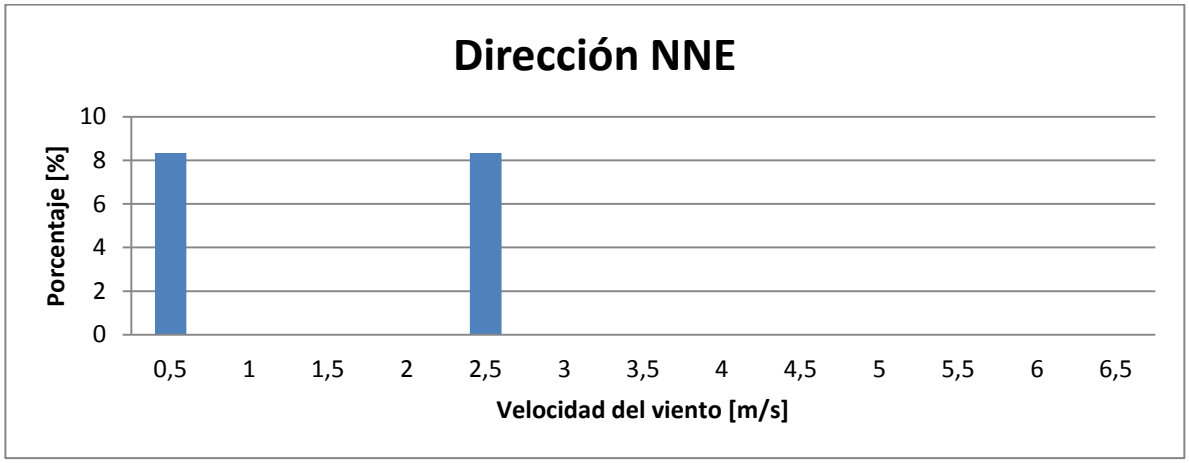


Figura 14. Histograma de viento - Dirección NNE.

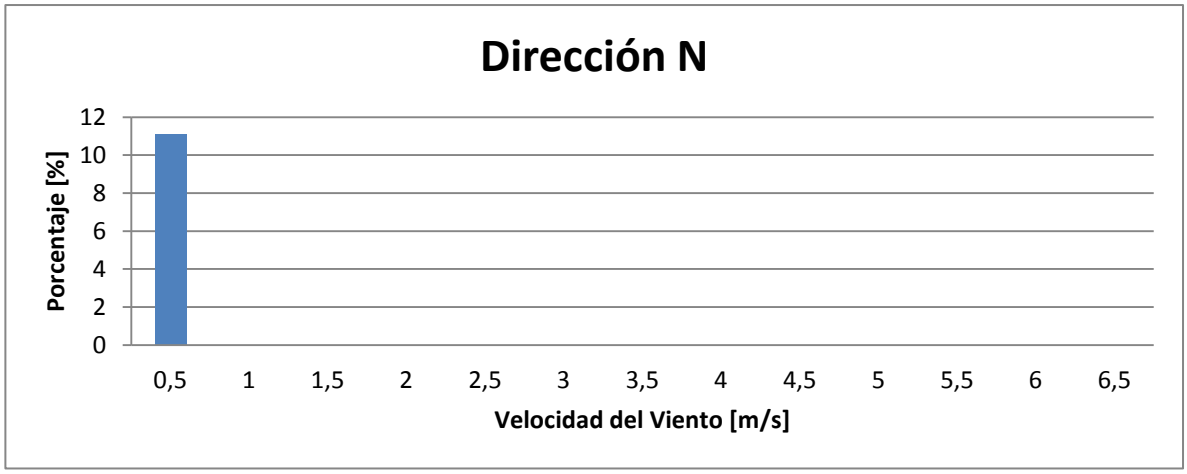


Figura 15. Histograma de viento - Dirección N.

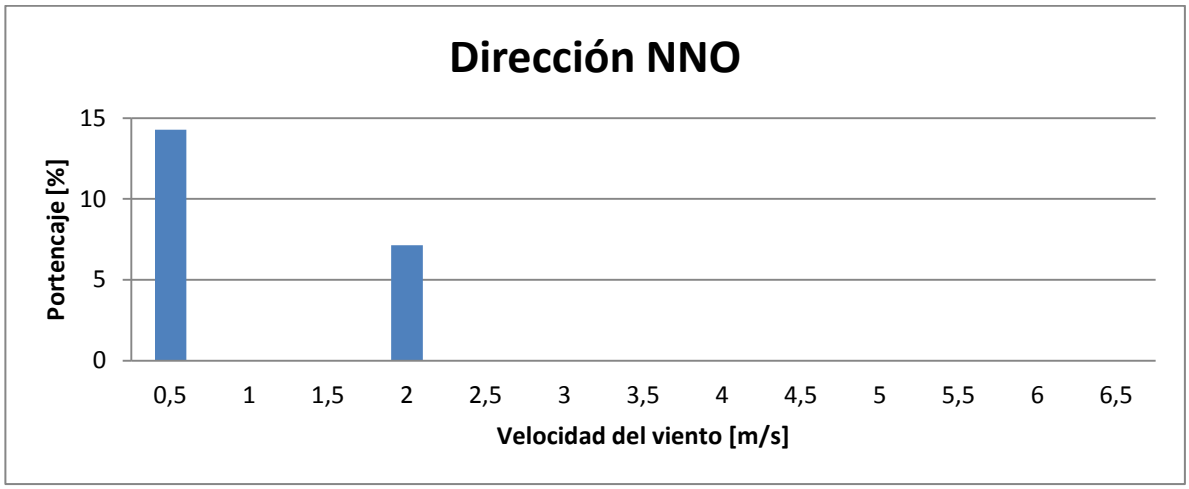


Figura 16. Histograma de viento - Dirección NNO.

Figura 17. Histograma de viento - Dirección NO.

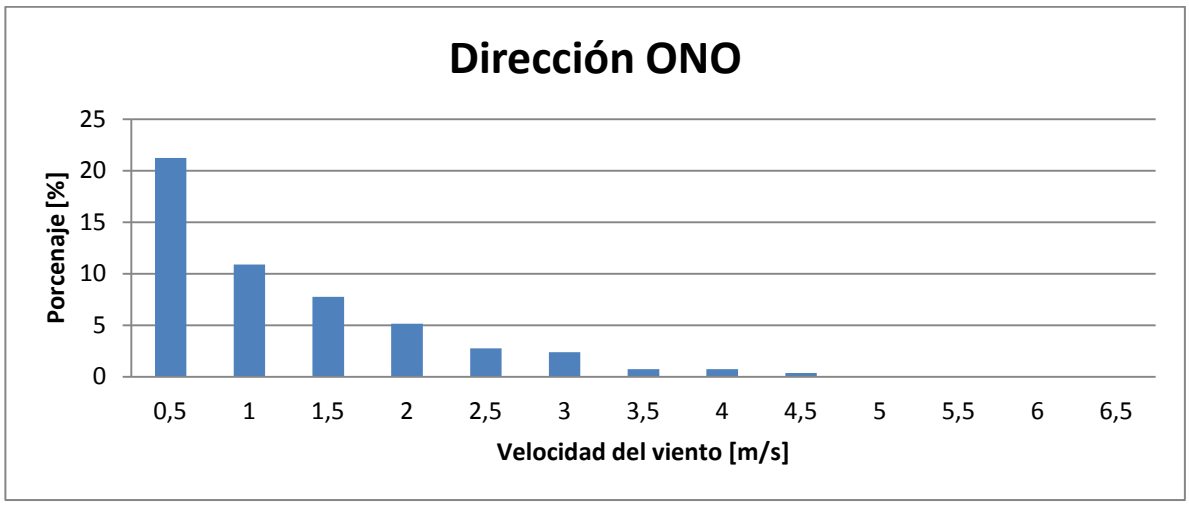


Figura 18. Histograma de viento - Dirección ONO.

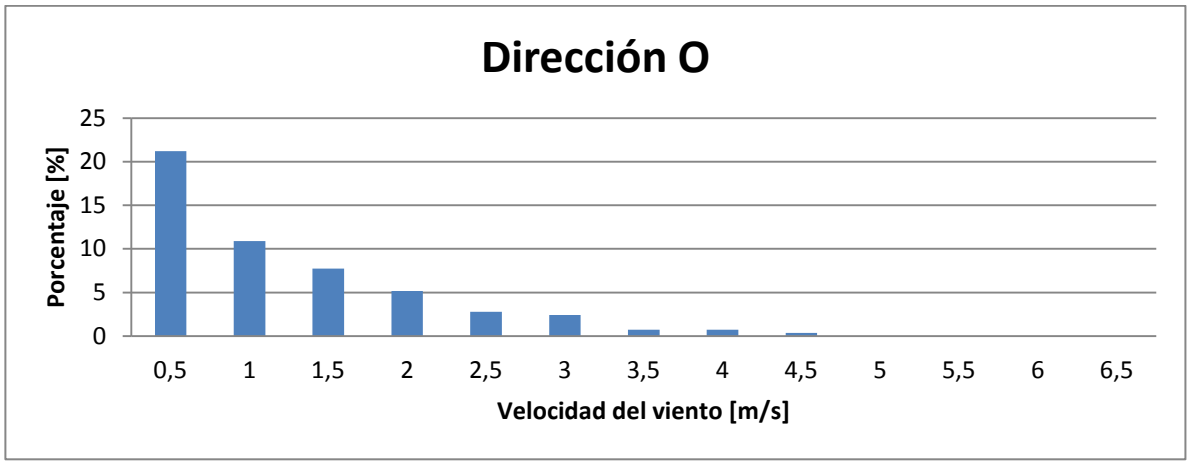


Figura 19. Histograma de viento - Dirección O.

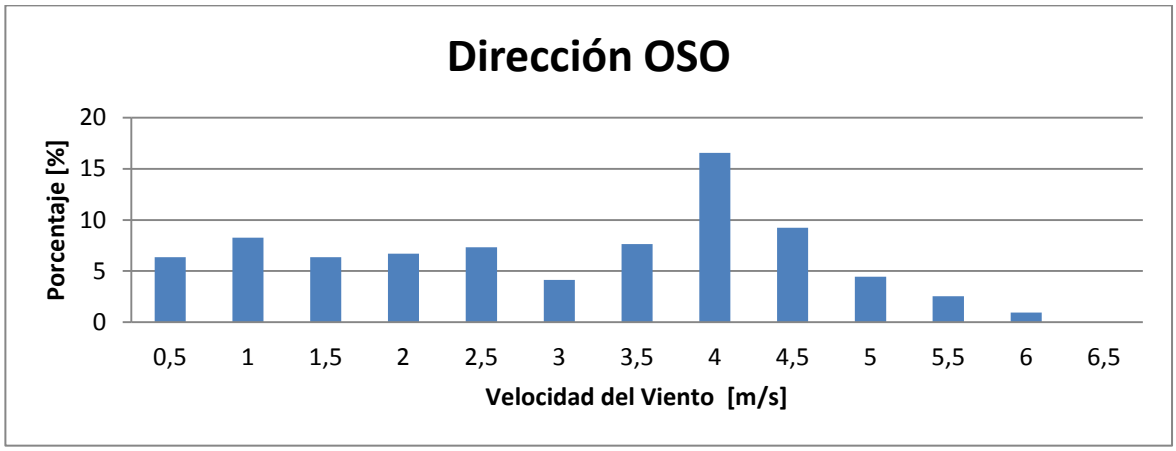


Figura 20. Histograma de viento - Dirección OSO.

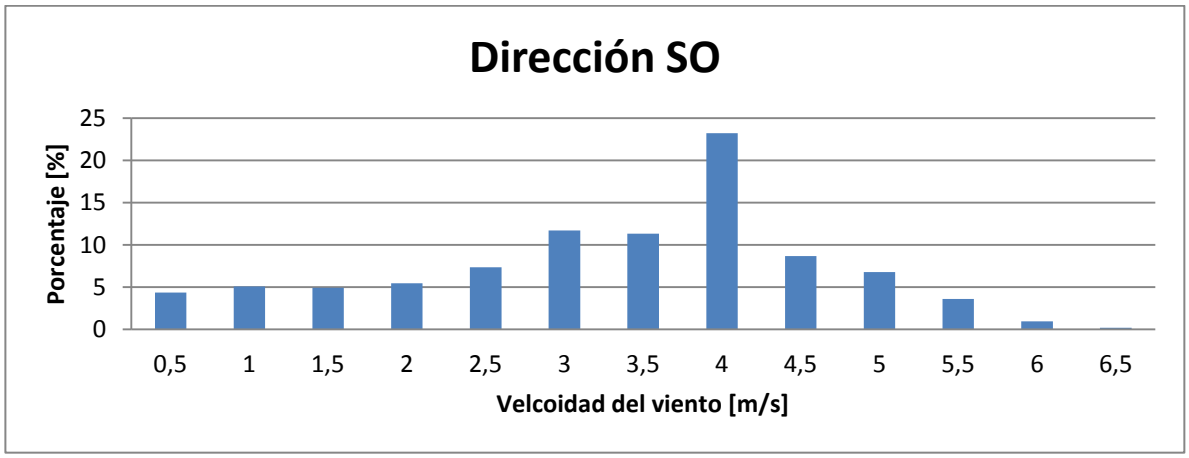


Figura 21. Histograma de viento - Dirección SW.

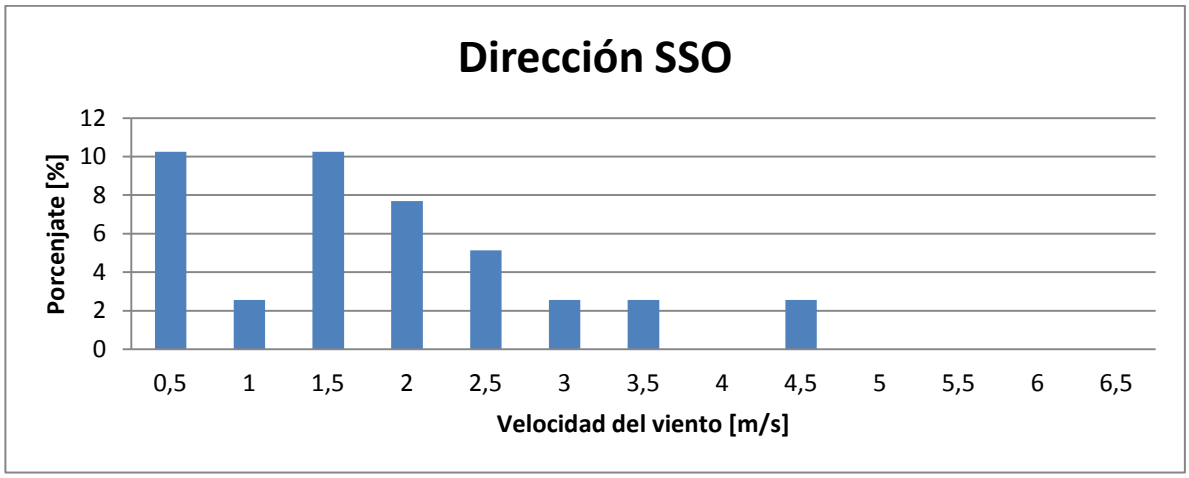


Figura 22. Histograma de viento - Dirección SSO.

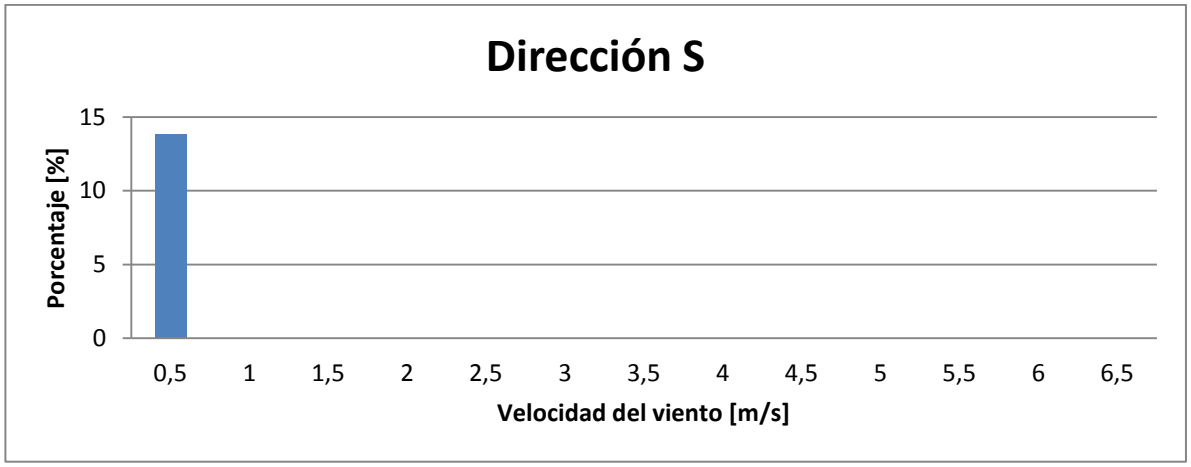


Figura 23. Histograma de viento - Dirección S.

Figura 24. Histograma de viento - Dirección SSE.

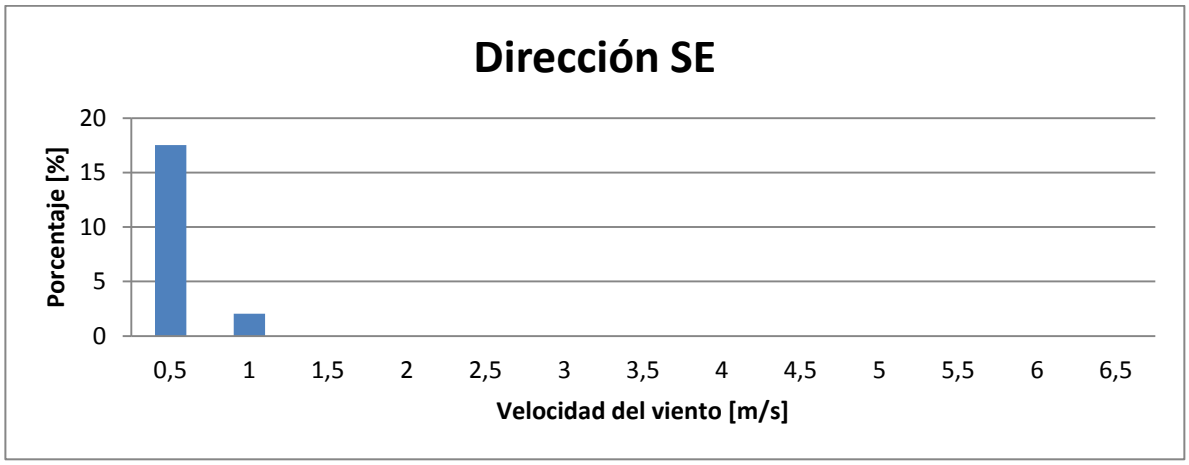


Figura 25. Histograma de viento - Dirección SE.

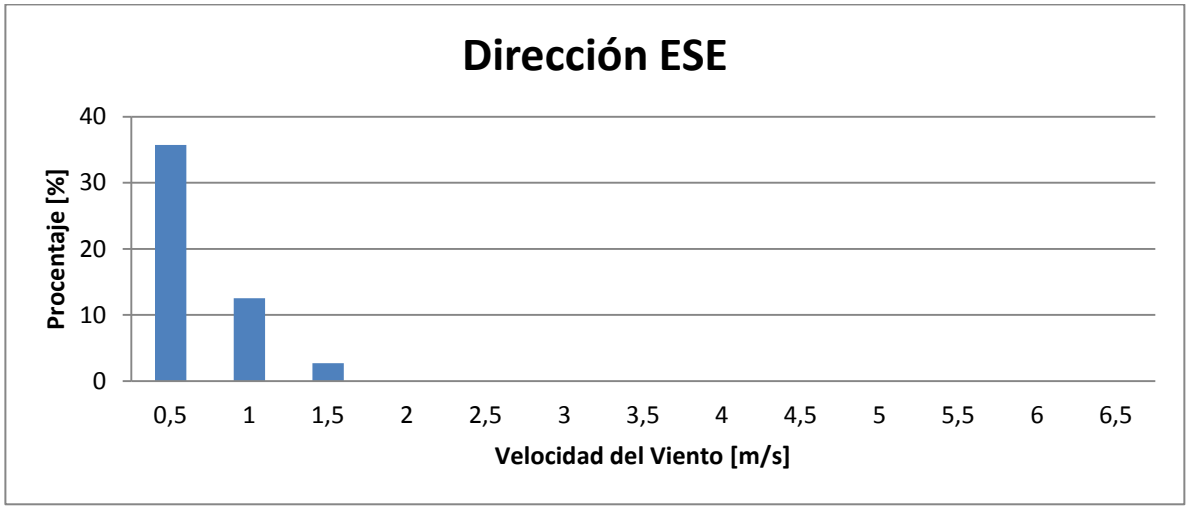


Figura 26. Histograma de viento - Dirección ESE.

De las anteriores figuras es posible concluir que la gran mayoría del potencial eólico en la ubicación del PTG se concentra en las direcciones ONO, O, OSO, SSO y SO, especialmente en esta última. La mayoría de los vientos son de bajas velocidades (aproximadamente de 0,5 [m/s]) y no logran sobrepasar los 6 [m/s]. De este análisis, es posible concluir que la ubicación del PTG no representa un lugar atractivo geográficamente para implementar parques eólicos de gran tamaño. Debido a esto, los aerogeneradores a instalar deben ser de baja potencia, con velocidades de arranque menores a 1 [m/s], de poco peso y con una altura de torre mayor a 5 [m]. Para poder determinar cuál de todas las direcciones

representa la más atractiva de forma que se pueda generar la mayor cantidad de potencia en todo el año, se realiza la interpolación de los datos para los meses con los que no se cuenta con mediciones. De esta forma, en las Figuras 27 y 28 se puede observar la distribución horaria y porcentual del viento por año.

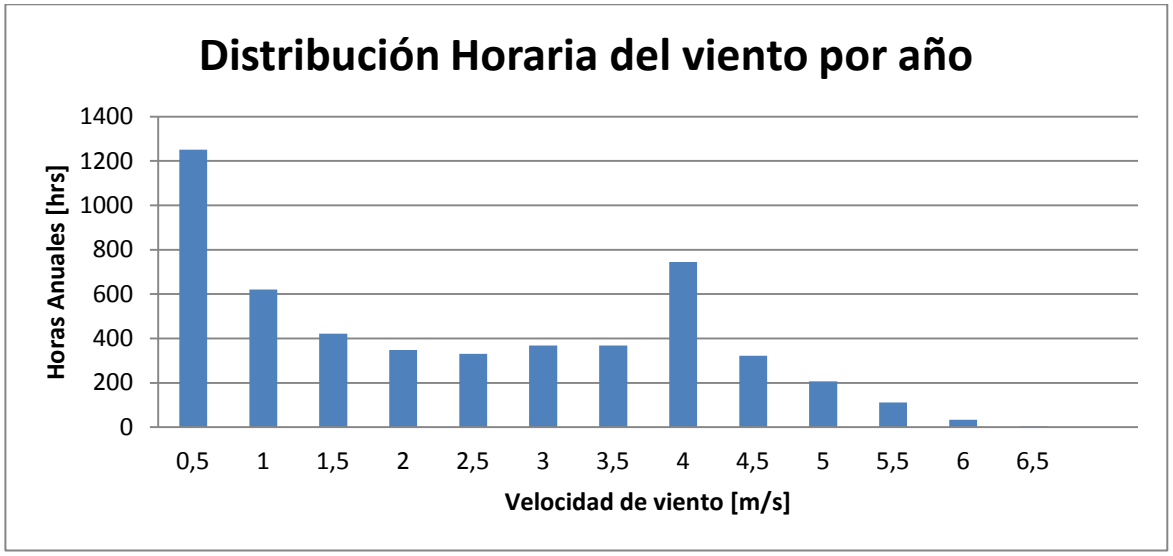


Figura 27. Distribución horaria del viento por año.

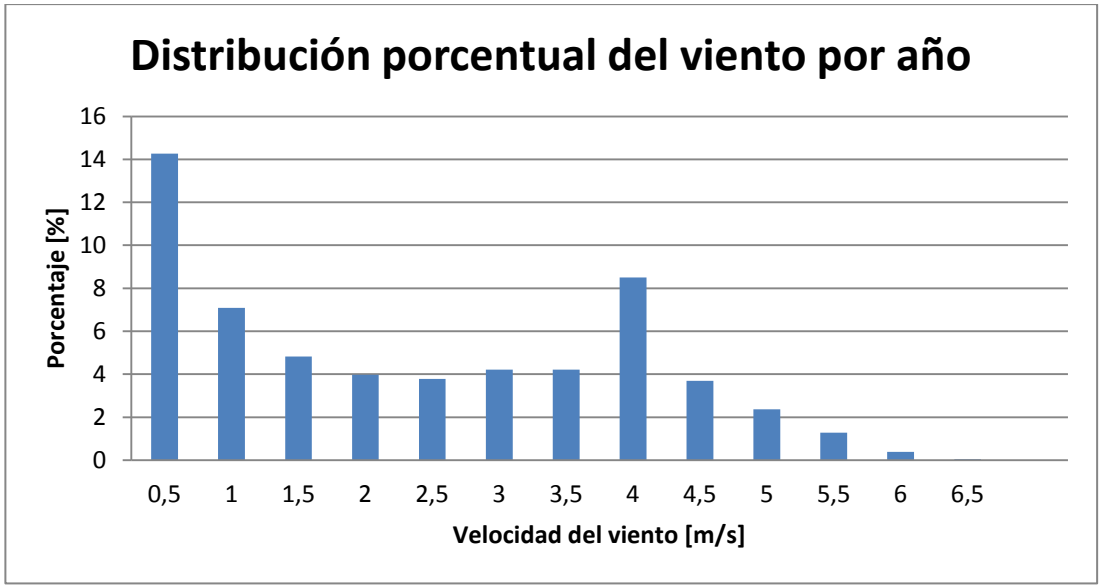


Figura 28. Distribución porcentual del viento por año.

Tabla 2. Distribución del viento por velocidad en el PTG por año.

MATRIZ DE VELOCIDAD Y DIRECCION DEL VIENTO [m/s] MEDICION ANUAL																		
Dirección		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14			
		0	0 < v < 0.5	0,5<v<1	1<v<1,5	1,5 <v< 2	2 <v< 2.5	2,5 <v< 3	3 <v <3.5	3,5 < v < 4	4 < v < 4.5	4,5 < v < 5	5 < v < 5,5	5,5 < v < 6	6 < v < 6.5	6,5 < v < 7	[hrs]	[%]
1	N	-	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	4,140	0,047
2	NNE	-	4,140	0,000	0,000	0,000	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,280	0,095
3	NE	-	28,979	4,140	4,140	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,399	0,473
4	ENE	-	20,699	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	24,839	0,284
5	E	-	37,259	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	41,399	0,473
6	ESE	-	165,595	57,958	12,420	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	235,974	2,694
7	SE	-	70,378	8,280	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	78,658	0,898
8	SSE	-	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	S	-	16,560	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	16,560	0,189
10	SSO	-	16,560	4,140	16,560	12,420	8,280	4,140	4,140	0,000	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	70,378	0,803
11	SO	-	95,217	111,777	107,637	120,057	161,456	256,673	248,393	509,206	190,435	149,036	78,658	20,699	4,140	0,000	2053,384	23,440
12	OSO	-	82,798	107,637	82,798	86,938	95,217	53,819	99,357	219,414	120,057	57,958	33,119	12,420	0,000	0,000	1051,531	12,004
13	O	-	476,087	244,253	173,875	115,917	62,098	53,819	16,560	16,560	8,280	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1167,448	13,327
14	ONO	-	215,274	74,518	24,839	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	318,771	3,639
15	NO	-	8,280	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	8,280	0,095
16	NNO	-	8,280	0,000	0,000	4,140	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	12,420	0,142
17	-	3626,541	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3626,541	41,399
[hrs]		3626,541	1250,246	620,983	422,268	347,750	331,191	368,450	368,450	745,180	322,911	206,994	111,777	33,119	4,140	0,000	8760,000	100,000
		41,399	14,272	7,089	4,820	3,970	3,781	4,206	4,206	8,507	3,686	2,363	1,276	0,378	0,047	0,000	100,000	

En la Tabla 2, se puede observar que la dirección SO concentra el 23,44% del total de horas anuales en las cuales se presenta viento en las instalaciones del PTG. En la dirección O también presenta un valor considerable de horas anuales. Además, se observa que el 41,39% de las horas totales del año no se presenta viento. Este valor es importante debido a que indica que en más de la cuarta parte del año no será útil el aerogenerador. No obstante, para la dirección SO se puede observar que el total de horas con vientos, 8,5 % corresponde a corrientes de aires con velocidades entre 3,5 y 4 [m/s] y el 7,09% con velocidades entre 0,5 y 1 [m/s]. De esta forma, si se instala un aerogenerador con una velocidad de arranque igual a 1 [m/s], se espera que en más del 37,24% de horas anuales se encuentre en funcionamiento y genere algún valor potencia. Si se instala un aerogenerador con una velocidad de arranque menor a 0,5 [m/s], se espera que en más del 44,32% de horas del año se genere potencia. Debido a las condiciones del viento se hace más atractiva y rentable la instalación de aerogeneradores con velocidades de arranque menores a 0,5 [m/s]. Teniendo en cuenta que el número totales de horas en las que la velocidad del viento se encuentra entre 3,5 y 4 [m/s] es igual a 2053,38 [hrs], no se considera esta medición como una ráfaga aleatoria, si no vientos de gran potencial energético de baja frecuencia.

La consolidación del recurso eólico se presenta en la Tabla 3, en ésta se puede observar que la dirección que concentra la mayor cantidad de potencial eólico corresponde a la dirección SO. Esta conclusión es coherente con los anteriores datos, debido a que es la dirección que concentra la mayor cantidad de horas de viento y donde se presentan ráfagas de viento con gran potencial eólico. En las Figuras 29 y 30 se puede observar la rosa de energía y la rosa de frecuencia para las direcciones del viento. En estas figuras confirma que la dirección SO concentra la mayor frecuencia de horas con viento, por lo tanto ésta representa la dirección con mayor potencial energético.

Tabla 3. Descripción consolidada del recurso eólico.

	Dirección	Energia Anual [kWh/m^2/año]	Vel, Media [m/s]	TIEMPO Datos medidos [hrs]	TIEMPO Datos proyectados [hrs]	Frecuencia [%]
1	N	0,000	0,40	1,00	4,14	0,05
2	NNE	0,004	1,30	2,00	8,28	0,09
3	NE	0,002	0,70	10,00	41,40	0,47
4	ENE	0,000	0,60	6,00	24,84	0,28
5	E	0,001	0,50	10,00	41,40	0,47
6	ESE	0,007	0,60	57,00	235,97	2,69
7	SE	0,001	0,50	19,00	78,66	0,90
8	SSE	0,000	0,00	0,00	0,00	0,00
9	S	0,000	0,40	4,00	16,56	0,19
10	SSO	0,048	2,00	17,00	70,38	0,80
11	SO	6,154	3,10	496,00	2053,38	23,44
12	OSO	2,799	2,80	254,00	1051,53	12,00
13	O	0,325	1,10	282,00	1167,45	13,33
14	ONO	0,012	0,60	77,00	318,77	3,64
15	NO	0,000	0,40	2,00	8,28	0,09
16	NNO	0,001	0,90	3,00	12,42	0,14
17	-	-	-	876,00	3626,54	41,40
Totales	-	9,355	0,99	2116,00	8760,00	100,00

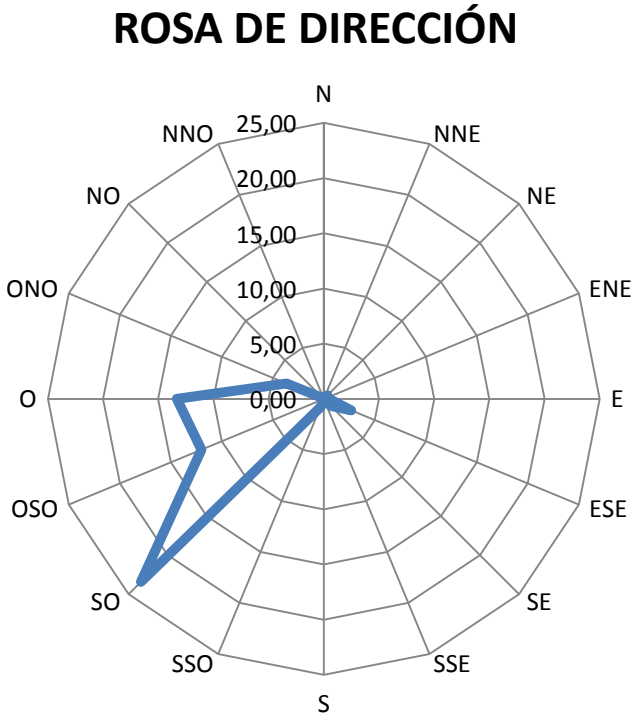


Figura 29. Rosa de frecuencia de dirección del viento.

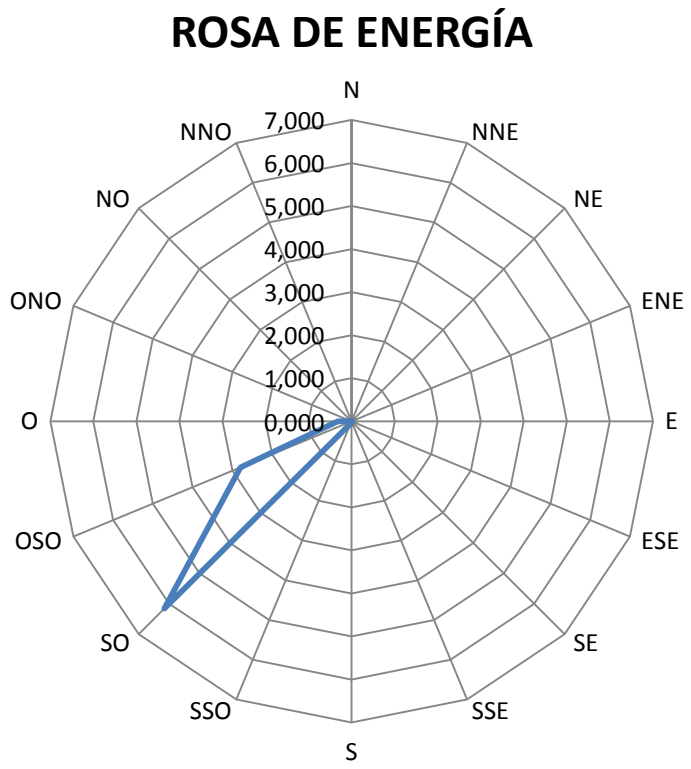


Figura 30. Rosa de energía anual [kWh/m^2/año]

3.4 ESTACIÓN METEOROLÓGICA DE LA CDMB Y ANÁLISIS DE DATOS

Como se describió anteriormente, la estación de medición de la CDMB se encuentra ubicada en la PTAR de Rio Frio a una distancia aproximadamente de 10,36 [km] de la sede UIS Guatiguará. La diferencia de altitud entre ambos puntos de medición es de 200 m (El PTG tiene una altitud de 963 [m] y la PTAR de Río Frio 179 [m]), sin embargo el punto más alto en la distancia líneal alcanza los 1200 m es decir, es mayor a la altitud de ambos lugares, por lo que se considera que estos datos no son apropiados para poder obtener conclusiones del comportamiento del viento en las instalaciones del PTG. Esto, debido a que las condiciones de velocidad y dirección del viento dependen en gran medida de la altitud del lugar y de la poca variabilidad de los frentes de viento en ambos lugares tal como se indica en [11]. No obstante, se realizará un estudio del

comportamiento del viento en la región donde se encuentra instalada la estación de medición del la CDMB. El objetivo es poder determinar el comportamiento y la variación de las condiciones del viento en la cercanía del PTG.

De los datos proporcionados por la CDMB, se cuenta con mediciones para los años 2002 al 2006 y 2011. El número de horas de medición para el año 2010 no permite realizar una extrapolación para el comportamiento del viento durante el año completo, por lo que se descarta usar las mediciones para este único año. De las Figuras 31 a 36, se pueden observar las horas de viento anuales para su correspondiente año.

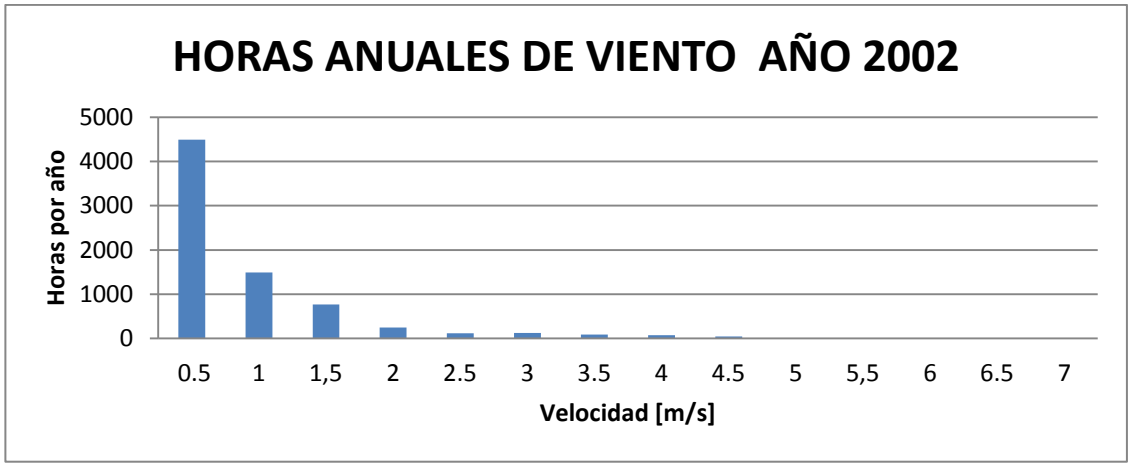


Figura 31. Distribución del viento por velocidad año 2002.

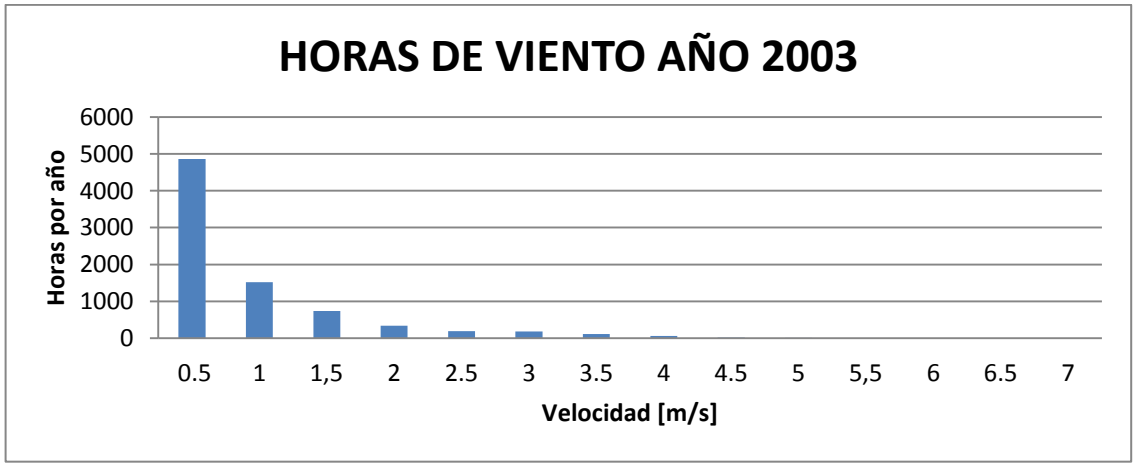


Figura 32. Distribución del viento por velocidad año 2003.

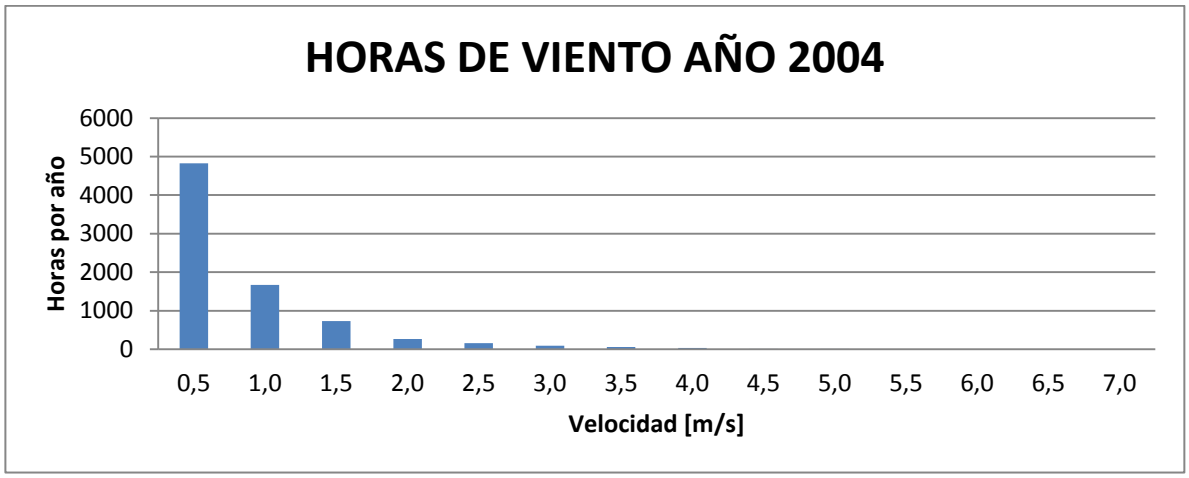


Figura 33. Distribución del viento por velocidad año 2004.

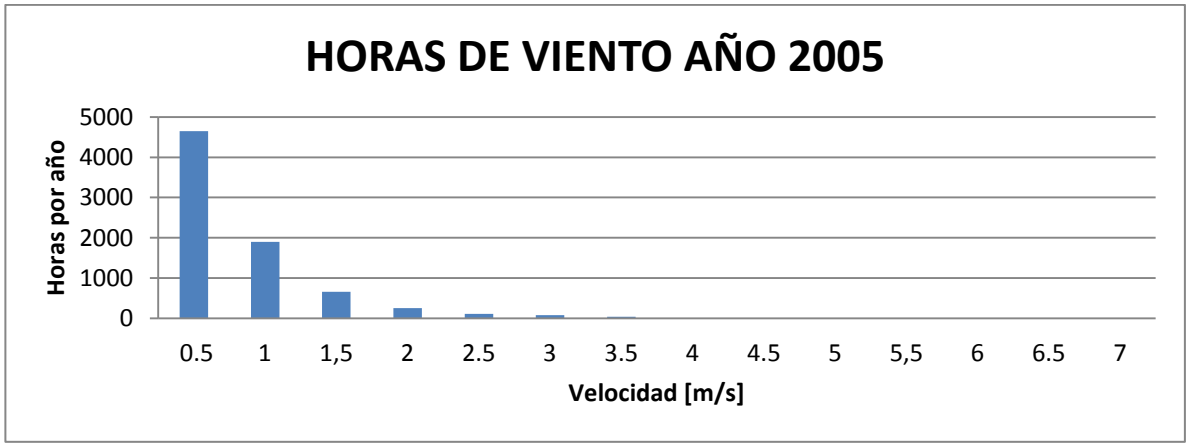


Figura 34. Distribución del viento por velocidad año 2005.

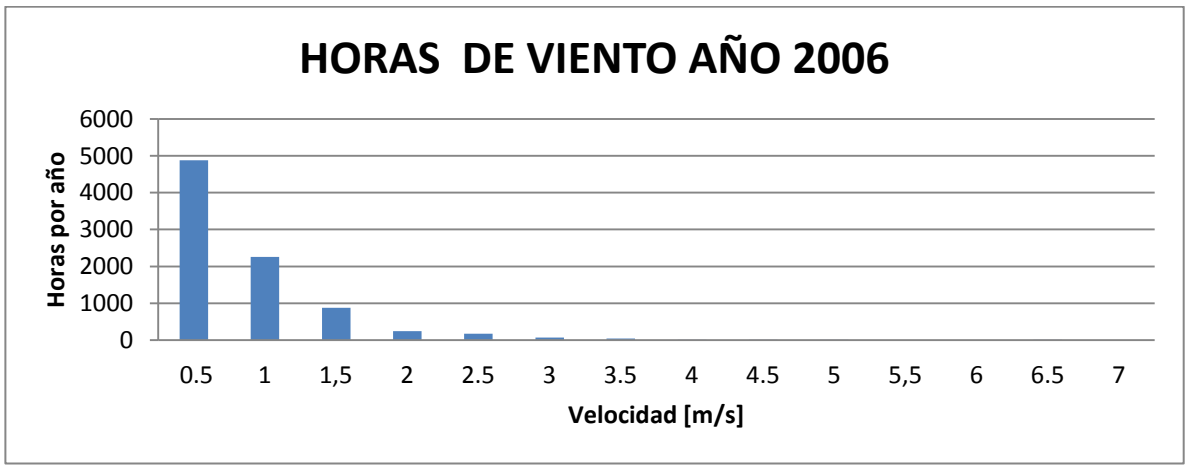


Figura 35. Distribución del viento por velocidad año 2006.

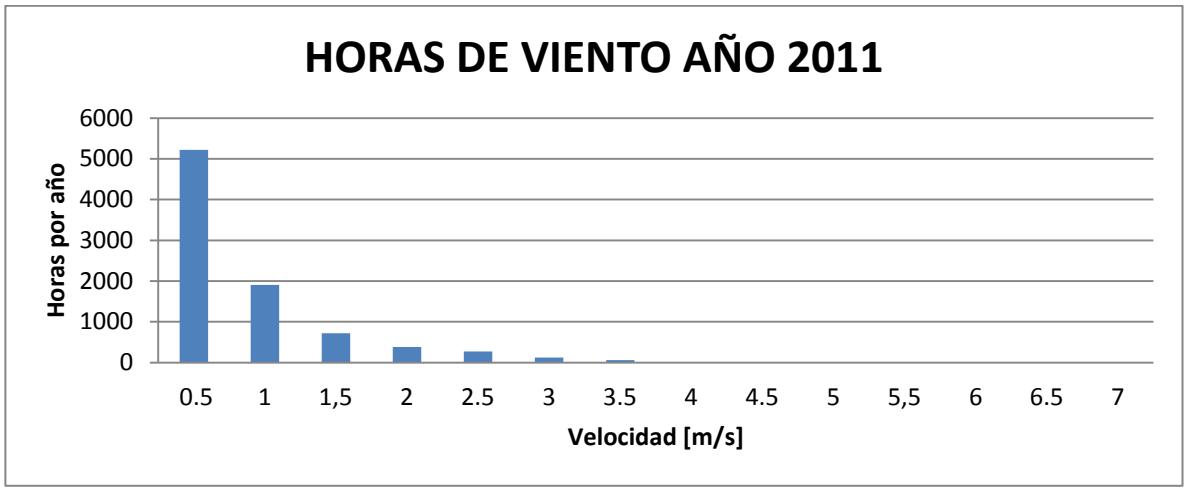


Figura 36. Distribución del viento por velocidad año 2011.

A pesar que la CDMB no cuenta con registros de la velocidad y dirección del viento para el total de horas anuales, los datos que fueron proporcionados pueden ser utilizados para obtener conclusiones anuales ya que las mediciones superan seis meses para cada año. Del comportamiento del viento en el periodo comprendido entre los años 2002 hasta 2011, se puede observar que la mayoría de horas en las cuales se registra viento, éste presenta una velocidad de 0,5 [m/s]. La región de Piedecuesta se caracteriza por vientos de bajas velocidades, como máximos de 1,5 [m/s]. Los vientos que superan esta velocidad son de baja frecuencia pero de gran potencial eólico.

De esta forma, es posible concluir que en la región cercana a Piedecuesta y a las instalaciones del PTG, el promedio de velocidad del viento no supera 1 [m/s]. Debido a esto, al instalar aerogeneradores para aprovechar la energía eólica disponible, es adecuado que éstos sean de bajas velocidades y bajo par de arranque.

Es importante resaltar que en la localización del PTG la distribución de velocidades del viento muestra que existen ráfagas con velocidades que superan los 3 [m/s] por un periodo de tiempo considerable. Por otro lado, en la ubicación de la estación de la CDMB no se presentan vientos de alto potencial eólico por

periodos que podrían considerarse largos teniendo en cuenta las condiciones geográficas del lugar. Esta diferencia indica que no es adecuada la utilización de estos datos para caracterizar las condiciones climáticas en las instalaciones del PTG, pues un error en la estimación de la velocidad del viento representa un error mayor en la estimación de la potencia eólica que puede ser producida.

Con respecto a la dirección del viento, se puede concluir que para los años 2002, 2003, 2004, y 2005 predominó la dirección SSO con un 14,70%, 16,032%, 11,80% y 9,82% del total de horas anual con viento, respectivamente. Mientras que para los años 2006 y 2011 la dirección predominante fue SO con un total de 16,825% y 10,245% del total de horas anuales con viento, respectivamente. De esta forma, las direcciones predominantes en la región, como se determinó anteriormente a través de las mediciones en el PTG, corresponden a SSO y SO. Estas direcciones son las que presentan mayor número de horas de viento, por lo que son las que presentan mayor potencial eólico.

3.5 CONCLUSIONES

A continuación se presentarán las conclusiones finales con respecto al estudio del potencial eólico de la zona geográfica del PTG. Se resaltan finalmente las siguientes características: dirección, velocidad y energía eólica que se puede generar.

DIRECCIÓN DEL VIENTO

Se concluye que el viento proviene mayoritariamente de la dirección SO. Las direcciones O, SO y OSO concentran el 48,77 % de horas de viento del lugar. El tiempo restante corresponde a las otras direcciones. Por lo que finalmente se establece que la dirección que mejor potencial energético presenta es SO, esto es

consecuente con la información suministrada en la Tabla 3 y los datos suministrados por la CDMB.

VELOCIDAD DEL VIENTO

El promedio de velocidad del viento en sitio es muy bajo, cercano a 1 [m/s]. Por lo que se concluye que la ubicación geográfica del PTG no es un sitio con gran potencial eólico para la instalación de grandes aerogeneradores. No obstante, se observa que el 23,44 % de horas totales del año el viento toma la dirección SO. Además, del total de horas en las cuales el viento se encuentra en esta dirección, el 44,32% superan los 0,5 [m/s]. Es importante resaltar que el 16,25% de las horas de viento en la dirección SO corresponden a velocidades superiores a 4 [m/s]. Es decir, se pueden percibir ráfagas de viento de alto potencial energético pero de baja frecuencia durante el año.

ENERGÍA EÓLICA

Para la determinación de la dirección que presenta el mayor potencial eólico, resulta necesario realizar una comparación entre la energía que se espera produzca la turbina eólica para cada dirección. La energía que se puede producir depende de muchas condiciones, entre estas la velocidad del viento y el número de horas totales de viento.

Se tiene que la dirección SO concentra el 65,78% de producción de energía, con una frecuencia de horas de viento de 23,44%. La dirección OSO concentra el 29,91% de la energía eólica con una frecuencia de horas de viento de 12%. La energía total anual que se esperaría generar para todas las direcciones corresponde a 9,355 [kWh/m^2/año], para un solo aerogenerador. Debido a que el diseño de la microrred contempla un sistema trifásico para mantener las fases balanceadas, se usarán tres aerogeneradores ubicados en la dirección SO.

4. OTROS SISTEMAS DE GENERACIÓN

Instalar otros sistemas de generación en las microrredes, además de celdas fotovoltaicas y aerogeneradores, es importante porque brinda confiabilidad al suministro sobre todo en casos en los que la microrred no tiene conexión a la red eléctrica (o el servicio es intermitente) o cuando el potencial eléctrico y la capacidad de almacenamiento no brindan suficientes días de autonomía a las cargas conectadas.

Existe gran variedad de sistemas de generación que se pueden conectar a una microrred y la selección de estos depende, entre otros aspectos, de las condiciones meteorológicas del sitio de instalación, los requerimientos de potencia, el nivel de confiabilidad, la disponibilidad de inversión y el objetivo final de la microrred.

Entre la bibliografía consultada se encontraron algunos ejemplos de microrredes piloto experimentales que además de aerogeneradores y paneles FV utilizan otros sistemas de generación. En [27] y [14] se encontraron los siguientes ejemplos:

- Microrred instalada en Kythnos, Grecia. Cuenta con unidades fotovoltaicas y un generador diesel para alimentar 12 casas monofásicas.
- Microrred instalada en Mannheim, Alemania. Cuenta con 5 sistemas FV instalados y una planta de potencia y calor para alimentar 480 hogares.
- Microrred de desarrollo y demostración de tecnologías de generación distribuida instalada por Labein – Tecnalia. Cuenta con 3 sistemas diferentes de paneles FV, generadores diesel, aerogeneradores y una microturbina. Además fue instalado un simulador de perturbaciones para transitorios programados a modo de evaluación.

Además de estos, pueden incluirse pequeños generadores hidráulicos, a base de gasolina, biomasa, biocombustibles, generación mareomotriz, undimotriz, geotérmica u otros equipos como aquellos que generan electricidad a partir de bicicletas estáticas.

Teniendo en cuenta los objetivos y las características de diseño que se expondrán más adelante (capítulo 5), se considero apropiado seleccionar un generador diesel como tercera fuente de generación para la microrred.

4.1 GENERADOR DIESEL

Un generador diesel está compuesto por un motor diesel y un generador eléctrico (también llamado alternador).

El motor diesel (también llamado motor de combustión interna) es un motor térmico en el que el encendido del combustible, gasóleo o diesel, se realiza a través de la elevación de la temperatura causada por la compresión de aire en el interior del cilindro y no mediante una chispa como sucede con los motores de gasolina. Su invención y patente se le reconocen al alemán Rudolf Diesel en el año de 1892.

Una de las principales ventajas de la utilización de los generadores diesel es el bajo consumo de combustible. Aunque actualmente el combustible diesel tiene un precio ligeramente superior al de la gasolina, los motores diesel tienen una densidad de energía superior, lo que permite mayor extracción de energía si se compara volumétricamente.

La instalación de un generador diesel es mucho más atractiva en comparación con un generador de gasolina por las siguientes razones [12]:

- Los generadores diesel requieren menor mantenimiento en comparación con los de gasolina. Además, debido a los avances tecnológicos, los

modelos modernos han superado en gran medida las desventajas de los modelos anteriores como nivel de ruido y costos de mantenimiento.

- Los generadores diesel son más resistentes y confiables.
- Como no se utiliza chispa en el proceso de encendido, no se requieren algunas piezas que suelen significar costos elevados en reparaciones y repuestos.
- Los generadores de gasolina queman combustible a mayores temperaturas por lo que su vida útil es significativamente más corta en comparación con los generadores diesel.

Este tipo de generadores son bastante resistentes y por lo tanto confiables. El uso adecuado y el mantenimiento periódico, permiten evitar la gran mayoría de daños e inconvenientes. De esta forma, siempre y cuando se mantenga el suministro de combustible, se podrá contar con una fuente de potencia estable para abastecer las cargas conectadas a la microrred.

Otro tipo de generación importante ante la cual debe evaluarse la selección del generador diesel, es el generador a gas natural.

El generador a gas puede ser una opción económica debido a su costo inicial, y sus costos de mantenimiento mucho más bajos por el menor tamaño de sus filtros. Sin embargo también deben tenerse en cuenta los siguientes aspectos:

- El consumo de combustible es menor en el generador diesel ya que en términos de valor calorífico el diesel es un combustible con mayor energía. Esto resulta en una variación de economía del consumo de hasta 12 a 75% utilizando diesel.
- El motor diesel es mucho más durable. Se diseña además para funcionar más horas en comparación a un generador de la misma potencia en base a gas natural.
- La instalación de un punto de gas natural para el suministro del equipo puede resultar no solo complicada sino peligrosa teniendo en cuenta la

naturaleza de los equipos que se albergan en el edificio de laboratorios. Además, el espacio destinado para la instalación del equipo, la terraza del edificio, dificulta más esta instalación.

- Debido a las características eléctricas de la microrred, se requiere un generador trifásico de baja potencia. En el caso de los generador en base a gas natural, es difícil conseguir un generador lo suficientemente pequeño como para no sobredimensionar las necesidades de generación. Es posible que la inversión sea mucho más alta de acuerdo a las necesidades.

Los generadores diesel, a diferencia de los paneles solares o aerogeneradores se encuentran fácilmente en las tiendas y distribuidoras de productos eléctricos de la ciudad. Teniendo en cuenta la gran cantidad de marcas en el mercado y que el diseño permita, hasta donde sea posible, características generales para realizar la compra a través de una licitación pública, se definirán las características del generador pero no se indicará ninguna marca específica.

Las principales características eléctricas que se definirán, son:

- **Número de fases:** De acuerdo al diseño que se presentará en el capítulo 5, el generador diesel debe ser trifásico para mantener un balance adecuado de las fases de la microrred.

- **Potencia eléctrica:** Teniendo en cuenta los potenciales energéticos anteriormente evaluados y las características nominales de los generadores elegidos se debe seleccionar una potencia coherente con las características de éstos. La función del generador diesel, es la de proveer energía a las cargas cuando los demás sistema de generación y almacenamiento no estén en condiciones de hacerlo (sistema de respaldo), por lo tanto, no requiere estar funcionando todo el tiempo. Sin embargo, es posible que para evaluar diferentes escenarios, una vez se

encuentre instalada la microrred, éste se inicie a la vez de los demás generadores, esta característica se analizará más adelante cuando se seleccionen los valores de carga (Capítulo 5. Diseño y caracterización de la microrred). Se consultaron más de 5 tiendas proveedoras de la ciudad buscando determinar los valores de potencia comunes dentro de los generadores ofrecidos. A partir de esta búsqueda y la descripción anterior se determinó que la potencia adecuada para el generador diesel para la microrred es de 7,5 KVA nominales, de los que se obtiene un valor nominal (asumiendo un factor de potencia de 0,8) de 6 KW

- **Nivel de tensión**: De acuerdo a los proveedores de la ciudad consultados, el nivel de tensión común para un generador diesel de las características anteriormente descritas es de 120 V por fase, 208 V entre líneas.

- **Frecuencia eléctrica:** La frecuencia eléctrica debe ser igual a la de la red de servicio público, es decir 60 Hz.

En la Tabla 4 se presentan las características del generador diesel.

Tabla 4. Características del generador diesel seleccionado.

Número de fases	3 Fases
Potencia eléctrica nominal	7,5 KVA / 6 KW
Nivel de tensión	120 V / 208 V
Frecuencia eléctrica	60 Hz

5. DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE LA MICRORRED

La microrred se localizará en el edificio de laboratorios de la sede de investigaciones de la Universidad Industrial de Santander UIS de Guatiguará. Ésta, hará parte del laboratorio 308 (Laboratorio de integración energética) administrado por el grupo de investigación de sistemas de energía eléctrica GISEL.

La microrred tiene varios objetivos enfocados a la investigación y aprendizaje de este tipo de tecnologías y sistemas:

- **Apropiación tecnológica.** Teniendo en cuenta el desarrollo en áreas como el uso de energías renovables, microrredes y la tendencia a convertir las redes eléctricas en redes inteligentes o smart grids, es importante que la E3T cuente con diversos espacios en los que sea posible observar, interactuar y conocer de cerca equipos y tecnologías relacionadas a estas temáticas.

- **Modelado y estudio de escenarios.** Con la instalación de esta microrred, será posible realizar seguimiento de su comportamiento, así como evaluar el rendimiento de la misma en diferentes escenarios climáticos y de carga.

- **Futuras expansiones.** La microrred diseñada es flexible a ampliaciones que permitan probar equipos nuevos, con mayor precisión y nuevas funciones. Además, una vez la legislación se adapte para tal fin, se podrá adecuar la microrred para la inyección y venta de energía sobrante a la red eléctrica.

A diferencia de los diseños convencionales de microrredes en los que se dimensionan los equipos para abastecer determinada carga, la microrred experimental del laboratorio de integración energética busca cumplir ciertas características de diseño que fueron definidas por los directores del proyecto y docentes del grupo de investigación.
Las características de diseño definidas son las siguientes:

- **Fuentes de generación.** La microrred debe contar con al menos tres fuentes de generación, de las cuales dos deben ser de energías renovables.

  En caso de que las mediciones de algún potencial energético determinen que la potencia generada es demasiado baja, debe tenerse en cuenta que la microrred tiene fines académicos y que por esto no es necesario realizar un análisis financiero para definir la conveniencia de instalar determinado equipo.

  De acuerdo a los objetivos de la microrred, se consideró que el uso de paneles fotovoltaicos es apropiado y se definió una potencia nominal de generación de éstos de aproximadamente 2 [kW]. Es necesario realizar un estudio del potencial eólico en el PTG. Se definió una potencia nominal de aproximadamente 3 [kW] para aerogeneradores.

- **Cargas.** La microrred debe contar con cargas en DC y AC. Éstas deben especificarse en potencia y los equipos pueden ser recomendados, sin embargo su instalación espera ser llevada a cabo como parte de otros proyectos y sistemas desarrollados para el laboratorio.

- **Conexión a la red.** La microrred debe tener la posibilidad de conectarse a la red, sin embargo, teniendo en cuenta que los equipos que permiten realizar el acople monitorizado y en tiempo real no son comunes en el

mercado, no es estrictamente necesario que ésta última característica se cumpla. Sin embargo, debe realizarse el diseño de manera que la red eléctrica abastezca las cargas en caso de que la energía obtenida a través de las fuentes de generación propias de la microrred no lo hagan.

- **Sistema trifásico.** La microrred debe ser de naturaleza trifásica. Aunque es posible que algunos sistemas (como los paneles fotovoltaicos) no generen de manera trifásica, existe la posibilidad de conectarlos de manera monofásica al sistema trifásico.

- **Medición.** La microrred debe incluir equipos de medición de las variables eléctricas más importantes en sus diferentes subsistemas, para que a partir de éstos se pueda hacer un control y seguimiento del comportamiento de la misma.

- **Monitorización remota.** Los equipos de alta tecnología que se instalarán para la implementación de la microrred, cuentan con un protocolo de comunicación y software definido y desarrollado por su fabricante. Como los equipos seleccionados provienen de diferentes fabricantes, resulta necesario en un futuro la integración de cada uno de los softwares mediante una sola herramienta. Esta herramienta debe permitir la monitorización de todos los parámetros críticos de la microrred en cada uno de los nodos establecidos como prioritarios. Además de permitir la monitorización y operación de la red de forma remota mediante el acceso vía web.

- **Licitación pública. L**a compra de los equipos se hará a través de licitación pública, por lo que es necesario establecer las especificaciones técnicas de manera genérica siempre que existan diversos modelos disponibles en el mercado que sean compatibles. Esta condición no aplica en caso de que las características requeridas para el diseño solo sean

cumplidas por un equipo determinado, caso en el que se hará necesaria la adquisición del mismo.

A partir de estas características, se realizó el siguiente esquema de la microrred, que incluye la estructura básica de diseño (Figura 37). La Tabla 5 incluye la nomenclatura correspondiente, además de las secciones en las que se especifica la selección de cada equipo o elemento.

De acuerdo a la clasificación por topologías presentada en (1.1.3 Topologías de microrredes) el diseño corresponde a una topología AC, debido a la naturaleza del sistema de conexión principal de distribución de energía.

Tabla 5. Nomenclatura del diseño.

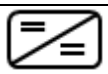
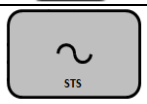
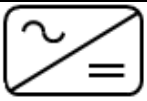
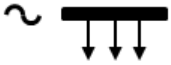
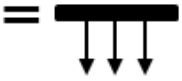
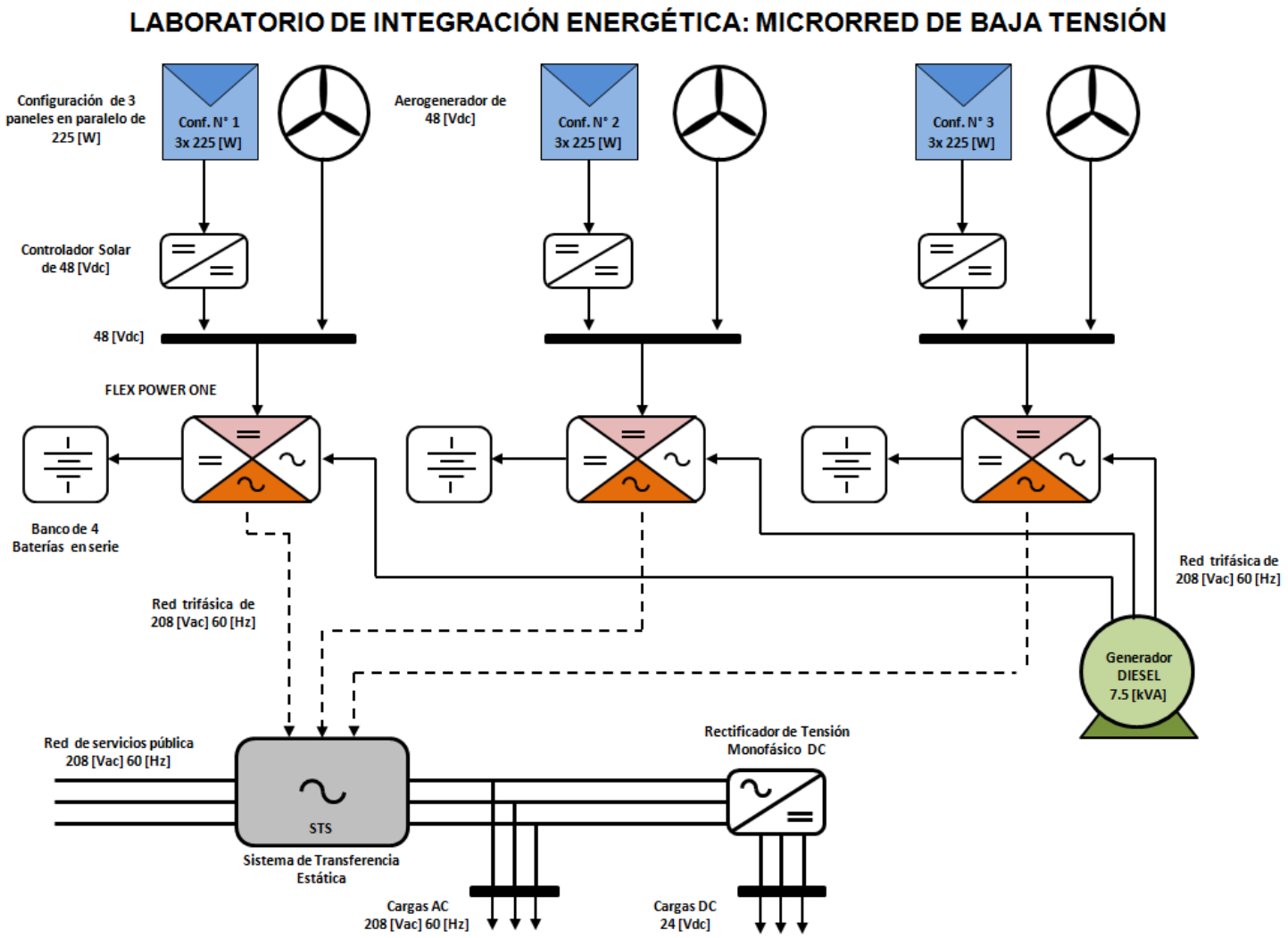
Símbolo	Elemento	Selección
	Configuración de paneles solares	Sección 6.1
	Aerogenerador	Sección 6.2
	Controlador solar	Sección 6.3
	Inversor / Regulador de Carga	Sección 6.4
	Banco de baterías	Sección 6.5
	Módulo de transferencia de carga (STS)	Sección 6.6
	Rectificador	Sección 6.7
	Generador diesel	Sección 4.1
	Cargas AC	Sección 5.1
	Cargas DC	Sección 5.1

Figura 37. Estructura básica de la microrred.



5.1 CARGAS

De acuerdo a las características de diseño anteriormente especificadas y a la estructura básica de la microrred, es necesario definir el valor de potencia de las cargas en DC y AC. Sin embargo, y como se indicó anteriormente, su instalación espera ser llevada a cabo como parte de otros proyectos y sistemas desarrollados para el laboratorio.

Para seleccionar el valor de las cargas se tendrán en cuenta tanto los valores nominales de los sistemas de generación, como las evaluaciones de los recursos energéticos llevadas a cabo anteriormente. La determinación de la capacidad del sistema depende en gran medida de la potencia que puedan generar los sistemas de energía renovables conectados a la microrred.

Para el cálculo de los kW-h semanales correspondientes al sistema fotovoltaico se tendrá en cuenta el valor de HSP calculado en el Capítulo 2 (evaluación del recurso solar disponible en el parque tecnológico de Guatiguará) y el mínimo valor de potencia para máxima irradiancia de la configuración total de acuerdo a la sección 6.1.6 (modelado del panel solar). Este valor corresponde al mínimo valor de potencia que se alcanzará en alguno de los 5 modelos de paneles que se seleccionaron en la sección 6.1 (selección de los paneles solares) para 1000 [W/m^2]. Se selecciona este valor porque representa la menor condición de generación de la configuración, evitando el sobredimensionamiento de las cargas en caso de ser elegido el correspondiente modelo de panel.

Con estos valores y teniendo en cuenta que la configuración total cuenta con 9 paneles (3 por fase) según se indica en la sección 6.1.7 (configuración de los paneles) se calcula la potencia estimada en kW-h semanales de la siguiente manera:

$$P_{panel} * N_{paneles} * HSP * Dias_{semana} = 196{,}97 * 9 * 4{,}29 * 7$$
$$= 53{,}24\ kW - h\ (semanales)(7)$$

Para el cálculo de la potencia estimada de los aerogeneradores, se tendrá en cuenta el valor de energía calculado de acuerdo a la potencia del aerogenerador seleccionado (Wind Arrow TRUE-NORTH POWER) en la sección 6.2 (selección de los aerogeneradores). En la sección 6.2.3. (selección técnica) se presenta en la Tabla 27 la suma de los valores de acuerdo a la tabla de potencia de este aerogenerador y de las horas obtenidas de la extrapolación de los datos recolectados con la unidad de medición instalada en el PTG para la dirección de mayor potencial eólico.

Teniendo en cuenta que en total se instalarán tres aerogeneradores, uno por fase, se calcula la potencia estimada en kW-h semanales de la siguiente forma:

$$\frac{TOTAL\ W - h_{aerogen} * N_{aerogen}}{Semanas_{Año}} = \frac{146886 * 3}{52} = 8{,}474\ kW - h\ (semanales)(8)$$

Para el cálculo de los kW-h semanales correspondientes al generador diesel, se tendrá en cuenta el valor de potencia nominal del mismo (7,5 [KVA] / 6 [KW]) definidos en la sección 4.1 (Generador diesel).
Para la asignación de horas de funcionamiento semanales debe tenerse en cuenta las características y objetivos de la microrred descritos anteriormente en esta sección. Debido a que:

- Las cargas son controladas, es decir, hacen parte de la construcción de escenarios a evaluar (pueden no ser constantes).
- Se espera que en su mayoría la generación de potencia sea provista por las fuentes de energías renovables instaladas y los bancos de baterías.
- Debido a su baja potencia, el generador se considera pequeño, por lo que no se recomiendan funcionamientos en periodos largos.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, se asumirá un uso del generador diesel de 14 horas semanales, el número de horas de funcionamiento del generador diesel es determinado mediante las recomendaciones de óptimo funcionamiento del distribuidor. El valor estimado de kW-h semanales se obtiene de la siguiente forma:

$$P_{Nominal} * H_{semanales} = 6 * 14 = 84\ kW - h \quad (9)$$

Esta energía producida, se espera que sea almacenada y suministrada en su mayoría por el banco de baterías teniendo en cuenta la aleatoriedad de los sistemas eólico y solar y de igual forma de la utilización del generador diesel. El banco de baterías que se instale debe tener la capacidad de almacenamiento de toda la energía producida por los sistemas eólico y solar. Así, debido a que la generación de estos sistemas no es constante, almacenando la energía generada se garantiza un suministro constante a la carga.

El cálculo de estos valores estimados, permite obtener un valor que representa la cantidad de kW-h en una semana que cada uno de los sistemas de generación pudiese generar. Sin embargo en los sistemas eólico y solar, por depender de condiciones variables, y en la generación diesel, por depender de unas horas mínimas determinadas de funcionamiento que pueden no ser estrictamente cumplidas, es probable que no se genere la cantidad indicada anteriormente. Por esto, y teniendo en cuenta estas características, se dimensionará el valor total de carga (sin factores de ineficiencia) de la siguiente manera:

$$L_{Weekly} = (kW - h_{EÓLICA} + kW - h_{SOLAR}) * 0{,}6 + kW - h_{Diesel} * 0{,}8$$
$$= (8{,}474 + 53{,}24) * 0{,}6 + 84 * 0{,}8$$

$$L_{Weekly} = 104{,}2\ kW - h \quad (10)$$

La determinación de la potencia total que generará la microrred con esta expresión, permite obtener un margen de operación de seguridad para el manejo de cargas.

Como la microrred contará con dos tipos de cargas, AC y DC, es necesario distribuir la energía para tal fin. Para esto, se definirán dos condiciones: La primera corresponde a los factores de ineficiencia relacionados a cada tipo de carga, para los que se usará los valores de 25% y 20% para AC y DC respectivamente. Buscando una segunda condición que permita calcular un valor exacto y definiendo una relación entre cargas que evite que la gran mayoría de energía destinada a las cargas sea utilizada para solo un tipo, se estableció que la carga en DC fuese igual al 60% de la carga en AC. Las expresiones de estas condiciones así como los valores calculados se presentan a continuación:

$$L_{SEMANAL} = L_{AC} * 1{,}25 + L_{DC} * 1{,}2 \quad (11)$$

$$L_{DC} = L_{AC} * 0{,}6 \quad (12)$$

$$L_{AC} = 52.8\ kW - h\ ;\ L_{DC} = 31{,}7\ kW - h \quad (13)$$

El cálculo estimado de los kW-h diarios se presenta a continuación:

$$\frac{L_{AC\ SEMANAL}}{7} = L_{AC\ DIARIO} = \frac{52{,}8}{7} = 7{,}54\ kW - h \quad (14)$$

$$\frac{L_{DC\ SEMANAL}}{7} = L_{DC\ DIARIO} = \frac{31{,}7}{7} = 4{,}52\ kw - h \quad (15)$$

Es necesario distribuir la energía estimada en horas de funcionamiento diario. Para esto, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Evidentemente, existen muchas combinaciones de carga y horas de funcionamiento que permiten lograr tales cantidades de energía (kW-h) diaria.
- El presente proyecto propone un diseño de microrred entre el que se incluye los valores de carga a instalar, las cuales harán parte de otros proyectos así como de estudios de escenarios.

Debido a esto, se consideró adecuado definir valores de carga instalada para funcionamientos de 8 horas diarias. Se seleccionó este valor de horas de funcionamiento debido a que reúne características importantes como ser un valor medianamente alto dentro del rango de combinaciones posibles a través de las cuales se puede obtener la cantidad de energía diaria correspondiente (Ver Figura 38 y Tabla 6) lo cual permite dimensionar convenientemente otros elementos de la microrred, además de ser un valor de horas promedio adecuado de funcionamiento para plena carga.

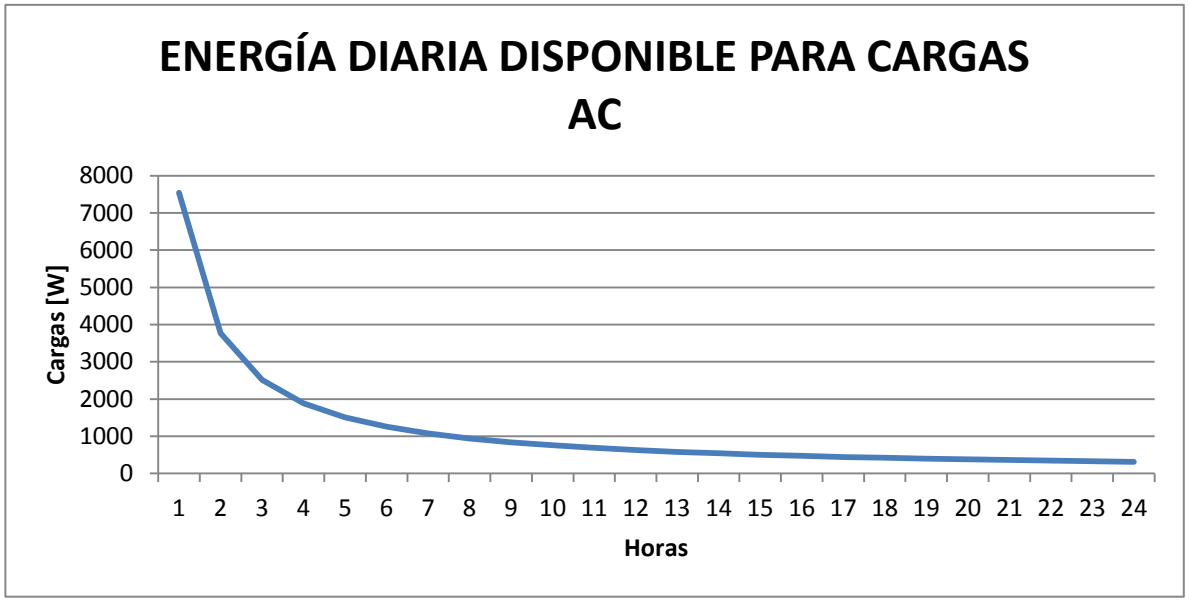


Figura 38. Combinaciones posibles de energía diaria para cargas AC.

Tabla 6. Combinaciones posibles de energía diaria para cargas AC.

Carga [W]	Horas	Energía [kW-h]
7540	1	7,54
3770	2	7,54
2513	3	7,54
1885	4	7,54
1508	5	7,54
1257	6	7,54
1077	7	7,54
943	**8**	**7,54**
838	9	7,54
754	10	7,54
685	11	7,54
628	12	7,54
580	13	7,54
539	14	7,54
503	15	7,54
471	16	7,54
444	17	7,54
419	18	7,54
397	19	7,54
377	20	7,54
359	21	7,54
343	22	7,54
328	23	7,54
314	24	7,54

A partir de esto, se definen las cargas de diseño de la siguiente forma:

$$\frac{W-h\,(diarios)}{8} = Carga = \frac{7540}{8} = 943\,W\,(AC) \quad (16)$$

$$\frac{W-h\,(diarios)}{8} = Carga = \frac{4520}{8} = 565\,W\,(DC) \quad (17)$$

Finalmente es importante recalcar que los valores de carga calculados corresponden a las cargas que se recomiendan instalar y mediante las cuales se realizarán otros cálculos de diseño, dimensionamiento y selección de equipos. No obstante, es posible que la carga instalada sea mayor o menor de acuerdo a las necesidades futuras del laboratorio, para lo cual es necesario verificar que las

fuentes de generación y almacenamiento estén en capacidad de proporcionar la potencia necesaria, y de igual forma, que las expansiones se mantengan en los rangos de funcionamiento adecuado de elementos como conductores y protecciones. Buscando la previsión y seguridad del sistema, se adoptaron los factores anteriormente expuestos.

6. SELECCIÓN DE EQUIPOS DISPONIBLES EN EL MERCADO

A continuación se llevará a cabo la selección de los equipos disponibles en el mercado que harán parte de la microrred. Para esto se tendrá en cuenta el diseño de la estructura básica presentada en la Figura 37 y la Tabla 5 de nomenclatura correspondiente de la sección anterior.

6.1 SELECCIÓN DE LOS PANELES SOLARES

Para el proceso de selección de los paneles solares que se utilizarán en la instalación fotovoltaica se hace uso de la metodología presentada en [18]. Esta metodología consta de varios pasos que se presentarán a continuación, con el fin de obtener como resultado las características técnicas del panel fotovoltaico adecuado para el diseño.

6.1.1 DEFINICIÓN DE MARCAS COMERCIALES

Se realizó una búsqueda para determinar las marcas y modelos más comunes en el mercado de paneles solares. Las marcas de mayor difusión encontradas son las siguientes:

- ✓ JS SOLAR
- ✓ SCHOTT
- ✓ SUNTECH
- ✓ SUNPOWER
- ✓ EVERGREEN
- ✓ SOLAR REC
- ✓ KYOCERA
- ✓ SOLAR WORLD

6.1.2 SELECCIÓN DE LOS MODELOS DE PANELES

Se realizó una búsqueda de modelos en las páginas de internet de las marcas anteriormente nombradas y en las de algunas importantes tiendas y distribuidores. Tras esta búsqueda, se recopilaron catálogos e información de los modelos de paneles. En la búsqueda solo se incluyeron paneles de potencia mayor a 180 [W] ya que se desea reducir la inversión en el número de paneles solares manteniendo un valor de generación adecuado. En la Tabla 7 se presenta la recopilación de los paneles solares que cumplen con estas características.

Tabla 7. Modelos de paneles solares seleccionados.

MARCA	MODELO	[W]
SUNPOWER	SPR-205-BLK	205
SUNPOWER	SPR-238R-WHT-D	238
JS SOLAR	JS 260-300P72-24	300
JS SOLAR	JS 230-255M60-24	255
JS SOLAR	JS 200-240P60-24	240
JS SOLAR	JS 260-330M72-24	330
JS SOLAR	JS 180-200D72-24	200
SOLAR WORLD	SW 225-245 POLY	225
SOLAR WORLD	SW 230-245 MONO	230
SOLAR WORLD	SW 245 POLY	245
EVERGREEN	ES-200-fa2b	200
EVERGREEN	ES-210-fa3b	210
EVERGREEN	ES-215-fa3b	215
SUNTECH	STP225-24-Vb-1	225
SUNTECH	STP280-24-Vb-1	280
SUNTECH	STP180S-24/Ab-1	180
KYOCERA	KD205GX-LPU	205
KYOCERA	KD225GX-LPB	225
SOLAR REC	REC215PE-US	215
SOLARE REC	REC225 PE-US	225
SOLAR REC	REC235PE-US	235
SCHOTT	POLY-225	225

6.1.3 VALORACIÓN TÉCNICO-COMERCIAL

En total se hizo una selección de 22 modelos de paneles que cumplen con las características básicas de diseño. Estas características corresponden a: composición poli-cristalina o Mono-cristalina en celdas y tensión de salida nominal de 24 [V]. Para depurar la lista de paneles seleccionados, se realiza un análisis basándose en tres aspectos importantes: costo, oferta comercial y área por configuración de generación.

[1] COSTO

El costo es un factor importante en el análisis y selección de un dispositivo pues éste garantiza la viabilidad de su implementación en el proyecto. Por lo general se realiza un análisis de los modelos disponibles en el mercado comparando precio y eficiencia. Se encuentra que los paneles de mayor eficiencia (Valores entre 16% y 20%) generalmente tienen alto costo por unidad, mientras que los de eficiencia media (valores cercanos al 13%-14%) presentan un valor comercialmente moderado y por ende, competitivo para la implementación [18]. Se consideran adecuados para el proyecto los paneles solares que presenten un costo de generación por debajo de 3,2 [USD/W]. Este valor se reconoce como un criterio del diseñador.

Es importante resaltar que la selección del panel de menor costo no implica la decisión más acertada, debido a que es normal que los precios varíen en el tiempo y que en el momento de realizar la compra éste no necesariamente siga siendo el de menor valor. Suele ser más adecuado seleccionar un rango de precios determinado, según lo indica la metodología presentada en [18].

[2] OFERTA COMERCIAL

Este criterio permite analizar la disponibilidad comercial de los modelos, incluyendo la posibilidad de que el panel pueda ser adquirido por medio de un

distribuidor en Colombia y no se realice la importación directa del mismo para reducir costos de compra e impuestos.

[3] ÁREA DE CONFIGURACIÓN POR GENERACIÓN

El área de la terraza donde se conectarán los paneles solares, se convierte en un aspecto importante para la selección de estos. Las configuraciones de paneles en serie y en paralelos son requeridas para poder suministrar la tensión y la corriente necesaria para el correcto funcionamiento del inversor.

Las configuraciones se diseñan con tensión de circuito abierto (U_{OC}). Debido a esto, el valor de tensión de circuito abierto debe ser considerablemente alto para garantizar que se reduzcan el número de paneles conectados en serie para alcanzar la tensión de operación del inversor y así reducir el área que ocuparan los paneles en la terraza del PTG. Así, el modelo de panel seleccionado debe poseer un valor de tensión de circuito abierto considerablemente alto, con el fin de reducir el número de conexiones en serie debido al área limitada de la terraza y cumplir las especificaciones de conexión del inversor.

6.1.4 SELECCIÓN DEL PANEL

En la selección final del panel fotovoltaico se debe garantizar que exista una pluralidad de fabricantes para un modelo con características similares. De los paneles determinados como aptos para el proyecto, se observa que la presentación de 225 [W] se puede encontrar en varios modelos comerciales. Además, las características de todos los modelos de los diferentes fabricantes son similares. En la Tabla 8 se presentan las características de los paneles de 225 [W] para los fabricantes consultados.

Tabla 8. Paneles solares fotovoltaicos seleccionados.

N	Marca	Modelo	[W]	$\eta[\%]$	Largo [m]	Ancho [m]	V_{oc}	I_{SC}	Peso [Kg]
1	SOLAR WORLD	SW 225 POLY	225	13,64	1,665	0,991	36,7	8,15	22,5
2	SUNTECH	STP225-24-Vb-1	225	13,42	1,675	1,00	37,3	8,13	21,2

3	KYOCERA	KD225GX-LPB	225	15,04	1,662	0,9	36,9	8,18	21,0
4	SOLAR REC	REC225 PE-US	225	13,64	1,665	0,991	36,6	8,40	22,0
5	SCHOTT	POLY-225	225	13,45	1,685	0,993	36,7	8,24	23,0

6.1.5 DEFINICIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PARA DISEÑO

Las especificaciones finales del panel fotovoltaico de diseño, corresponden a los de mayor valor para cada una de las características de los 5 paneles que se muestran anteriormente (a excepción del área que se calcula con el máximo valor de largo y ancho). De esta forma, se garantiza que existirá una pluralidad de ofertas comerciales permitiendo que el diseño sea adecuado para cualquiera de las opciones planteadas anteriormente. Las características que se muestran en la Tabla 9, se especificarán en la licitación pública asociada a la adquisición de los paneles solares del proyecto.

Tabla 9. Características finales de diseño.

Característica	Valor
Potencia nominal [W]	225
Voc [V]	37,30
Isc [A]	8,40
η[%]	15,04
Largo [m]	1,685
Ancho [m]	1,00
Área [m^2]	1,685
Peso [kg]	23

6.1.6 MODELADO DEL PANEL SOLAR

Las especificaciones encontradas en los catálogos correspondientes a los paneles solares seleccionados, así como en los catálogos de estos dispositivos en general, son características verificadas por los fabricantes para condiciones especificas denominadas STC por su nombre en inglés (Standard Test Conditions), éstas

corresponden a una temperatura de operación de 25 [^{o}C], radiación solar de 1000 [W/m2] y masa de aire de 1,5 [AM]. Evidentemente, las condiciones variarán dependiendo del lugar en el cual se requiera operar el panel y para esto es necesario calcular el efecto que produce este cambio de condiciones sobre las especificaciones del equipo.

Existen diferentes tipos de modelos, en los que puede tenerse en cuenta o no, el efecto de ciertas variables. Para el proyecto se tendrá en cuenta la dependencia de la radiación solar y la temperatura ambiente, sobre parámetros como tensión, corriente y potencia generada por los paneles, a través del modelo dinámico presentado en [5] y [30]. Este modelo sencillo y preciso, describe la variación de los parámetros de interés, a través de variables que no requieren ser medidas en laboratorios especializados y que en cambio, se encuentran dentro de la información brindada por los fabricantes.
A continuación, se presentarán las ecuaciones correspondientes a este modelo. Los siguientes son algunos parámetros básicos utilizados:

Tabla 10. Parámetros generales del modelo.

Parámetros generales del modelo	
K Constante de Boltzman	1,381 x 10 $^{-23}$ [J/K]
Tr Temperatura de referencia	25 [^{o}C]
q Carga eléctrica del electrón	1,602 x 10 $^{-19}$ [C]

Para evaluar las ecuaciones del modelo, se requieren algunos parámetros característicos de cada panel. En este caso, se usará como ejemplo el panel SOLAR WORLD SW 225 POLY.

Tabla 11. Parámetros característicos del panel solar SOLAR WORLD SW 225

Parámetros característicos del panel solar SOLAR WORLD SW 225	
V_{mpr} Tensión de máxima potencia en SCT	29,7 [V]
I_{mpr} Corriente de máxima potencia en SCT	7,59 [A]
V_{OCr} Tensión de circuito abierto en SCT	37,3 [V]
I_{SCr} Corriente de corto circuito en SCT	8,13 [A]

N_S Número de celdas del panel solar	60
Temperatura NOCT	47 [^oC]
I_{mp800} Corriente de celdas en NOCT[6]	6,07 [A]
α_{SC} Coeficiente térmico porcentual de corriente de corto circuito	No aplica
β_{OC} Coeficiente térmico porcentual de tensión de circuito abierto	No aplica
$\partial I_{SCR} / \partial T$ Coeficiente térmico de corriente de corto circuito	0,00042 [1/A]
$\partial V_{OCR} / \partial T$ Coeficiente térmico de tensión de circuito abierto	-0,0033 [1/V]
A Área del panel solar	1,675 [m^2]

Potencial térmico[7]:

$$V_T = \frac{n \cdot k \cdot (T_r + 273)}{q} \quad (18)$$

Tensión de circuito abierto normalizada:

$$v_{oc} = \frac{V_{OCr}}{V_T \cdot N_S} \quad (19)$$

Factor de forma:

$$FF_O = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0{,}72)}{1 + v_{oc}} \quad (20)$$

Potencia máxima nominal:

$$P_{maxr} = V_{mpr} \cdot I_{mpr} \quad (21)$$

Resistencia serie:

$$R_S = \frac{V_{OCr}}{I_{SCr}} - \frac{P_{maxr}}{FF_o \cdot {I_{SCr}}^2} \quad (22)$$

Coeficiente térmico de corriente de máxima potencia:

$$\propto_{mp} = \left(\frac{I_{mp800}}{0{,}8 \cdot I_{mpr}} - 1\right)\left(\frac{1}{NOCT - T_r}\right) \quad (23)$$

[6] Temperatura de operación nominal de la célula, en inglés Normal operating cell temperature. Corresponde a la temperatura que alcanza la célula en condiciones SOC o de operación estándar (el valor suele oscilar entre 45°C y 49°C). Estas condiciones son: radiación de 0,8 kw/m^2, a 20 °C de temperatura ambiente y velocidad media del viento de 1 m/seg, con la célula o el módulo en un estado de circuito eléctrico abierto, el viento orientado en paralelo al plano de la matriz, y todas las partes de la matriz totalmente expuestas al viento.

[7] El valor de n debe calcularse a través de un proceso iterativo en el que se determina el valor mediante el cual Vm sea igual a Vmpr para condiciones SCT. Este valor oscila entre 1 y 2, aunque mayormente entre 1,6 y 2.

Temperatura de operación de las celdas fotovoltaicas:

$$T_{cell} = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G \quad (24)$$

Corriente de corto circuito en función de la radiación solar y la temperatura de operación:

$$I_{SC} = I_{SCr} \frac{G}{1000} \left(1 + \propto_{SC} \cdot (T_{cell} - T_r)\right) \quad (25)$$

Corriente de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación:

$$I_m = I_{mpr} \frac{G}{1000} \left(1 + \propto_{mp} \cdot (T_{cell} - T_r)\right) \quad (26)$$

Tensión de circuito abierto en función de la radiación solar y la temperatura de operación:

$$V_{OC} = V_{OCr} \cdot \left(1 + \beta_{OC} \cdot (T_{cell} - T_r)\right) + V_T \cdot N_S \cdot ln \frac{I_{SC}}{I_{SCr}} \quad (27)$$

Tensión de máxima potencia en función de la radiación solar y la temperatura de operación:

$$V_m = V_T \cdot N_S \cdot \ln\left(1 + \frac{I_{SC} - I_m}{I_{SC}} (e^{\frac{VOC}{VT \cdot N_S}} - 1)\right) - I_m \cdot R_S \quad (28)$$

Tensión del panel solar en función de la radiación solar y la temperatura de operación.

$$V = V_T \cdot N_S \cdot \ln\left(1 + \frac{I_{SC} - I}{I_{SC}} (e^{\frac{VOC}{VT \cdot N_S}} - 1)\right) - I \cdot R_S \quad (29)$$

Eficiencia del panel en porcentaje:

$$\eta = \frac{Pmaxr}{G \cdot A} \cdot 100\% \quad (30)$$

Inicialmente, se calculan los valores de corriente, tensión y potencia, asumiendo una temperatura de funcionamiento en las celdas de 25 ^{o}C. La potencia máxima, se calcula con la ecuación presentada anteriormente excepto cuando la radiación es igual a 1000 [W/m^2] donde se asume que es de 225 W como indica cada catálogo.

La Tabla 12 presenta los valores característicos del panel SOLAR WORLD SW 225 para diferentes valores de radiación solar.

Tabla 12. Valores característicos del panel SOLAR WORLD SW 225 para condiciones SCT.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Tcell [^{o}C]	ɳ [%]
1000	37,30	8,13	29,56	7,59	225,0	25,0	13,4
800	36,61	6,50	28,75	6,07	174,6	25,0	13,0
600	35,73	4,88	27,74	4,55	126,3	25,0	12,57
400	34,48	3,25	26,37	3,04	80,0	25,0	11,94
200	32,34	1,63	24,10	1,52	36,6	25,0	10,92

En la Figura 39, se presentan las curvas correspondientes a los valores característicos del panel SOLAR WORLD SW 255 anteriormente calculados.

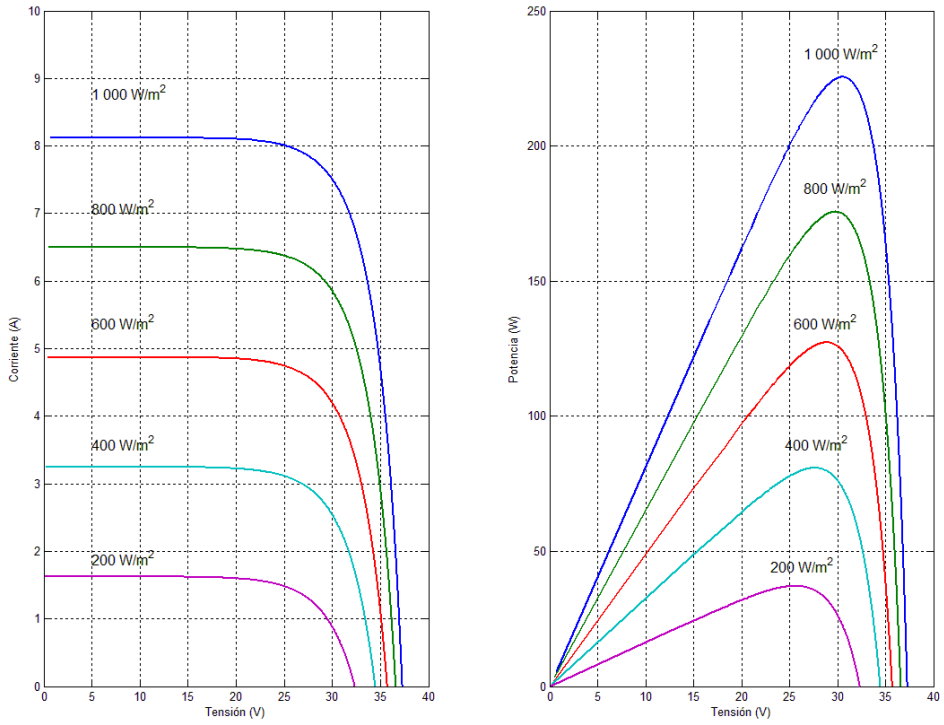


Figura 39. Curva característica del panel solar SOLAR WORLD SW 255 en condiciones SCT.

En la Tabla 13 se presentan los parámetros de los demás paneles solares.

Tabla 13. Parámetros de los paneles solares seleccionados.

PARÁMETROS		SOLAR WORLD	SUNTECH	KYOCERA	SOLAR REC	SCHOTT
		SW 225 POLY	STP225-24-vb-1	KD225GX-LPB	REC225 PE-US	POLY-225
V_{mpr}	Tensión de máxima potencia en SCT	29,7 [V]	29,6 [V]	29,8 [V]	29,1 [V]	29,8 [V]
I_{mpr}	Corriente de máxima potencia en SCT	7,59 [A]	7,61 [A]	7,55 [A]	7,7 [A]	7,55 [A]
V_{OCr}	Tensión de circuito abierto en SCT	37,3 [V]	36,7 [V]	36,9 [V]	36,8 [V]	36,7 [V]
I_{SCr}	Corriente de corto circuito en SCT	8,13 [A]	8,15 [A]	8,18 [A]	8,2 [A]	8,24 [A]
N_S	Número de celdas del panel solar	60	60	60	60	60
NOCT	Temperatura NOCT	47 [^{O}C]	45 [^{O}C]	47,9 [^{O}C]	47,5 [^{O}C]	47,2 [^{O}C]
I_{mp800}	Corriente de celdas en NOCT	6,07 [A]	6,12 [A]	6,04 [A]	_	5,985 [A]
α_{SC}	Coeficiente térmico porcentual de corriente de corto circuito	0,00042 [1/A]	0,00045 [1/A]	0,00060 [1/A]	0,00074 [1/A]	0,0002998 [1/A]
β_{OC}	Coeficiente térmico porcentual de tensión de circuito abierto	-0,0033[1/V]	-0,0034 [1/V]	-0,0036 [1/V]	-0,0034[1/V]	-0,00335[1/V]
$\partial I_{SCR} / \partial T$	Coeficiente térmico de corriente de corto circuito	-	-	4,91 [mA/^{O}C]	-	2,47 [mA/^{O}C]
$\partial V_{OCR} / \partial T$	Coeficiente térmico de tensión de circuito abierto	-	-	-133 [mA/^{O}C]	-	-123 [mV/^{O}C]
A	Área del panel solar	1,65 [m^2]	1,675 [m^2]	1,5 [m^2]	1,65 [m^2]	1,67 m^2]

Las Tablas 14, 15, 16 y 17 presentan los valores característicos de los restantes paneles solares fotovoltaicos seleccionados.

Tabla 14. Valores característicos del panel solar SUN TECH STP225-24-vb-1 para condiciones SCT.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Tcell [^{o}C]	η [%]
1000	36,70	8,15	29,55	7,61	225,0	25,0	12,18
800	36,05	6,52	28,74	6,09	175,0	25,0	11,84
600	35,20	4,89	27,73	4,57	126,6	25,0	11,43
400	34,02	3,26	26,39	3,04	80,3	25,0	10,87
200	31,99	1,63	24,20	1,52	36,8	25,0	9,97

Tabla 15. Valores característicos del panel solar KYOCERA KD225GX-LPB para condiciones SCT.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Tcell [^{o}C]	η [%]
1000	36,90	8,18	29,81	7,55	225,0	25,0	15,0
800	36,26	6,54	29,13	6,04	176,0	25,0	14,7
600	35,44	4,91	28,26	4,53	128,0	25,0	14,2
400	34,29	3,27	27,06	3,02	81,7	25,0	13,6
200	32,31	1,64	25,04	1,51	37,8	25,0	12,6

Tabla 16. Valores característicos del panel solar SOLAR REC REC225 PE-US para condiciones SCT.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Tcell [^{o}C]	η [%]
1000	36,80	8,20	29,10	7,70	225,0	25,0	13,6
800	36,11	6,56	28,22	6,16	173,8	25,0	13,2
600	35,23	4,92	27,15	4,62	125,0	25,0	12,7
400	33,98	3,28	25,72	3,08	79,2	25,0	12,0
200	31,84	1,64	23,40	1,54	36,0	25,0	10,9

Tabla 17. Valores característicos del panel solar SCHOTT POLY-225 para condiciones SCT.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Tcell [^{o}C]	η [%]
1000	36,70	8,24	29,80	7,55	225,0	25,0	13,45
800	36,08	6,59	29,18	6,04	176,22	25,0	13,17
600	35,27	4,94	28,37	4,53	128,51	25,0	12,80
400	34,14	3,30	27,23	3,02	82,25	25,0	12,29
200	32,21	1,65	25,30	1,51	38,20	25,0	11,42

En condiciones de operación normal, la temperatura del panel aumenta dependiendo de la del entorno, como se puede apreciar en las ecuaciones del modelo. Esto, afecta los valores característicos.

Este efecto, como explica [18], ocurre por la naturaleza del material semiconductor del que están compuestos los paneles, los cuales ante la variación de temperatura

producen un cambio en las variables eléctricas del dispositivo. Este aumento puede ser significativo, por lo que la variación, por ejemplo en zonas tropicales, debe considerarse para proyectar la generación del sistema fotovoltaico.

La sección 690 de la NTC-2050 (Sistemas solares fotovoltaicos) indica que el cálculo de la corriente del circuito de la fuente fotovoltaica, usada para dimensionar conductores y protecciones, debe hacerse con el valor nominal de la corriente de cortocircuito. Como se analizó anteriormente, el aumento de la temperatura en el panel solar causada por la temperatura ambiente, produce un incremento de la corriente de corto circuito. Como se observa en las graficas de condiciones SCT, la corriente es proporcional a la radiación aplicada.

Teniendo en cuenta estos dos efectos, se considerará como valor nominal el valor de corriente de corto circuito I_{SC} corregido por temperatura y a una radiación de 1000 W/m^2.

A partir del análisis de datos obtenidos de la medición realizada con la estación meteorológica en la sede de la universidad en Guatiguará, se decide asumir como temperatura ambiente el valor de 23 [^{o}C]. (Ver 2.2.3 Datos de temperatura)

La Tabla 18 presenta los valores característicos del panel SOLAR WORLD SW 225 para diferentes valores de radiación solar, a una temperatura ambiente de 23 [^{O}C].

Se asume el valor de eficiencia relativa, como el cociente porcentual entre la eficiencia para determinada radiación en condiciones SCT y en condiciones típicas de la zona.

Tabla 18. Valores característicos del panel SOLAR WORLD SW 225 para condiciones típicas de la zona.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Ta [^{o}C]	Tcell [^{o}C]	η [%]	η rel [%]
1000	33,43	8,24	26,24	7,59	199,0	23,0	56,75	11,88	88,68
800	33,57	6,57	26,14	6,07	158,7	23,0	50,00	11,84	90,88

600	33,50	4,91	25,84	4,55	117,6	23,0	43,25	11,70	93,13
400	33,07	3,27	25,17	3,03	76,4	23,0	36,50	11,40	95,46
200	31,76	1,63	23,61	1,52	35,8	23,0	29,75	10,68	97.95

En la Figura 40, se presentan las curvas correspondientes a los valores característicos del panel SOLAR WORLD SW 255 para condiciones típicas de la zona, anteriormente calculados.

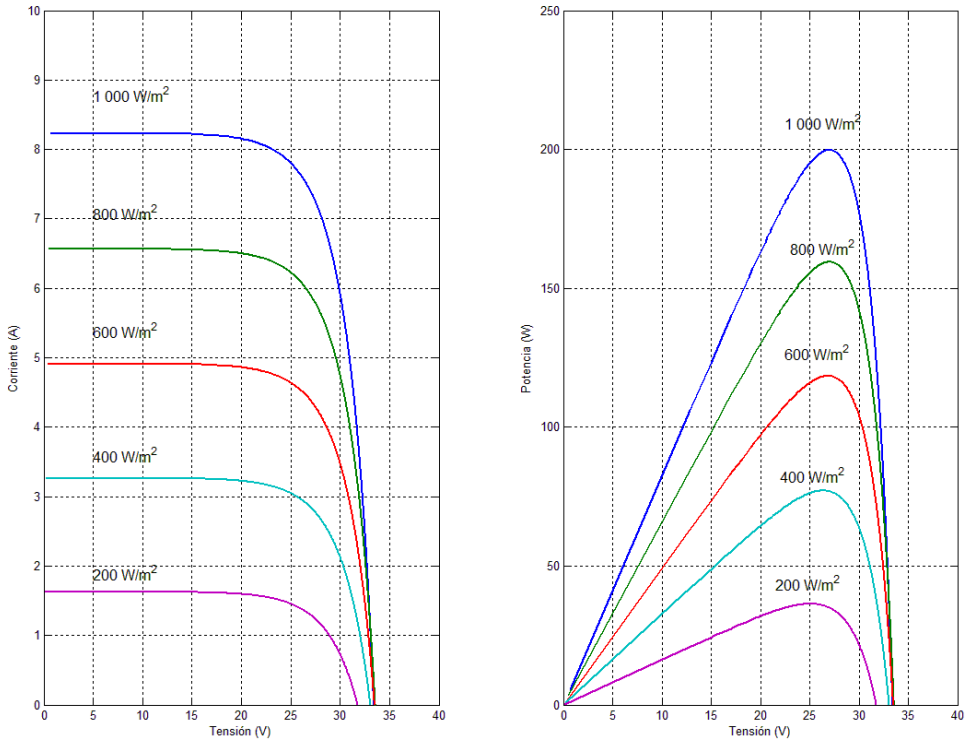


Figura 40. Curva característica del panel solar SOLAR WORLD SW 255 en condiciones típicas de la zona.

Como se describió anteriormente, es posible apreciar la variación en los valores causada por el efecto de la temperatura ambiente sobre los paneles solares. En la Figura 41 se aprecia la comparación de estas curvas en condiciones SCT y condiciones típicas de la zona, para radiaciones de 1000 [W/m^2] y 600 [W/m^2].

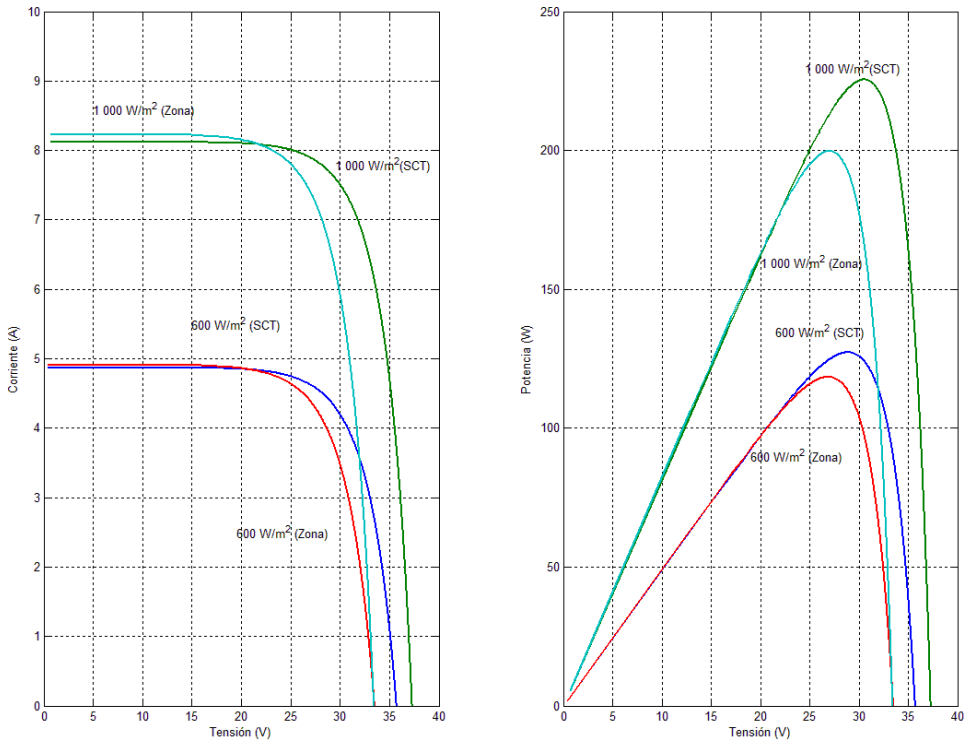


Figura 41. Comparación de las curvas características del panel solar SOLAR WORLD SW 255 en condiciones SCT y condiciones típicas de la zona.

Las Tablas 19, 20, 21 y 22 presentan los valores característicos de los restantes paneles solares fotovoltaicos seleccionados para condiciones típicas de la zona.

Tabla 19. Valores característicos del panel solar SUN TECH STP225-24-vb-1 para condiciones típicas de la zona

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Ta [^{o}C]	Tcell [^{o}C]	ɳ [%]	ɳ rel [%]
1000	33,09	8,26	26,16	7,69	200,6	23,0	54,25	10,86	89,16

800	33,21	6,59	26,07	6,12	159,7	23,0	48,00	10,81	91,27
600	33,14	4,93	25,79	4,59	118,3	23,0	41,75	10,67	93,41
400	32,72	3,27	25,17	3,05	76,8	23,0	35,50	10,40	95,66
200	31,46	1,63	23,71	1,52	36,12	23,0	29,25	9,78	98,08

Tabla 20. Valores característicos del panel solar KYOCERA KD225GX-LPB para condiciones típicas de la zona.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Ta [^{o}C]	Tcell [^{o}C]	η [%]	η rel [%]
1000	32,59	8,34	26,09	7,55	196,97	23,0	57,87	11,76	87,53
800	32,87	6,65	26,21	6,04	158,30	23,0	50,90	11,81	89,98
600	32,96	4,96	26,14	4,53	118,42	23,0	43,92	11,78	92,49
400	32,72	3,26	25,73	3,02	77,70	23,0	36,95	11,60	95,07
200	31,66	1,64	24,49	1,51	36,98	23,0	29,97	11,03	97,80

Tabla 21. Valores característicos del panel solar SOLAR REC REC225 PE-US para condiciones típicas de la zona.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Ta [^{o}C]	Tcell [^{o}C]	η [%]	η rel [%]
1000	32,82	8,40	26,80	7,50	201,09	23,0	57,37	12,20	89,79
800	32,98	6,68	26,50	6,03	159,94	23,0	50,50	12,13	92,02
600	32,94	4,98	25,96	4,55	118,18	23,0	43,63	11,95	94,22
400	32,53	3,31	25,02	3,05	76,34	23,0	36,75	11,58	96,38
200	31,24	1,65	23,13	1,53	35,49	23,0	29,86	10,77	98,49

Tabla 22. Valores característicos del panel solar SCHOTT POLY-225 para condiciones típicas de la zona.

G [W/m^2]	Voc [V]	Isc [A]	Vmp [V]	Imp [A]	Pmpp [W]	Ta [^{o}C]	Tcell [^{o}C]	η [%]	η rel [%]
1000	32,80	8,32	26,51	7,45	197,52	23,0	57,00	11,80	87,78
800	33,00	6,64	26,59	5,98	158,97	23,0	50,20	11,88	90,21
600	33,03	4,97	26,49	4,50	119,11	23,0	43,40	11,86	92,68
400	32,73	3,30	26,06	3,00	78,32	23,0	36,60	11,70	95,22
200	31,62	1,65	24,81	1,50	37,40	23,0	29,80	11,17	97,89

A partir de las tablas calculadas, se presentarán los valores máximos de los paneles preseleccionados para las variables de interés, que permitirán más adelante la selección de otros equipos. Estos valores se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores máximos de diferentes variables de los paneles preseleccionados para radiación de 1000 W/m^2.

Isc máx para condiciones SCT	8,24 [A]
Isc máx para condiciones de la zona	8,40 [A]
Voc máx para condiciones SCT	37,3 [V]
Voc máx para condiciones de la zona	33,43 [V]

6.1.7 CONFIGURACIÓN DE PANELES

De acuerdo a las características acordadas de diseño, la generación solar total debe ser de valores nominales cercanos a 2 [kW]. Debido a que se seleccionaron paneles de 225 [W] la cantidad total de paneles se calcula de la siguiente forma:

$$\frac{P_{TOTAL}}{P_{PANEL}} = \frac{2000}{225} = 8{,}88 \approx 9\ Paneles \quad (31)$$

De acuerdo al diseño presentado en el capítulo 5, es necesario distribuir los paneles para conformar un sistema trifásico. Cada fase contará con 3 paneles.

La configuración, de tres paneles, tiene dos posibles opciones de ser conectado de acuerdo a las leyes de circuitos de Kirchoff, las cuales se presentan en la Figura 42.

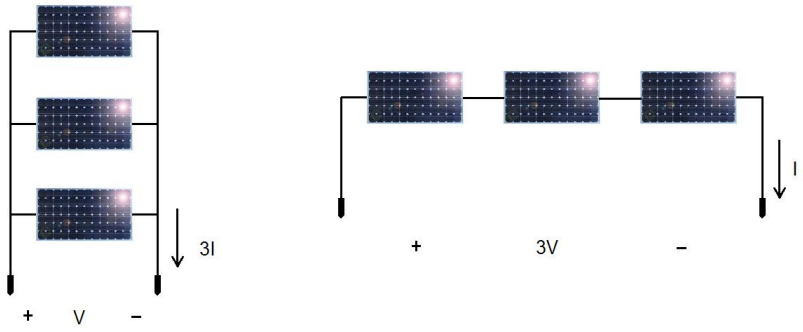


Figura 42. Posibilidades de configuraciones de paneles solares.

En la opción de la izquierda, como se indica en la Figura 42, la conexión en paralelo de los paneles mantendrá la tensión pero se sumarán las corrientes. Por el contrario, en la configuración de la derecha, la corriente se mantiene debido a la conexión en serie pero la tensión será el triple con respecto a la de un panel individual.

A pesar de que ambas configuraciones son igual de válidas, se seleccionará para la instalación **la configuración de paneles en paralelo** (A la izquierda en la Figura 42). Éste es más confiable ya que en caso de que alguno de los paneles llegue a presentar algún inconveniente de funcionamiento, los demás paneles no se verán afectados. La generación se ve reducida pero se mantiene continua mientras se hace la revisión y posterior mantenimiento. En las siguientes secciones se seleccionarán los demás equipos teniendo en cuenta los valores de acuerdo a esta configuración.

En la Tabla 24 se muestran los valores de las variables de diseño para la configuración por fase seleccionada.

Tabla 24. Valores máximos de diferentes variables de la configuración de paneles por fase para radiación de 1000 W/m^2.

Isc máx para condiciones SCT	24,72 [A]
Isc máx para condiciones de la zona	25,20 [A]

Voc máx para condiciones SCT	37,3 [V]
Voc máx para condiciones de la zona	33,43 [V]
Potencia nominal del arreglo	675 [W]

6.2 SELECCIÓN DE LOS AEROGENERADORES

A continuación se describe el proceso de selección del aerogenerador. Teniendo en cuenta que la mayoría del tiempo el viento que atraviesa el PTG presenta velocidades bajas, se debe buscar seleccionar un aerogenerador con una velocidad de arranque inferior a 1 [m/s] con el fin de que el sistema opere la mayor cantidad de tiempo posible. De esta forma, se hace una búsqueda en el mercado de aerogeneradores de baja potencia. Es decir, aerogeneradores cuya potencia máxima sea de 3 [kW].

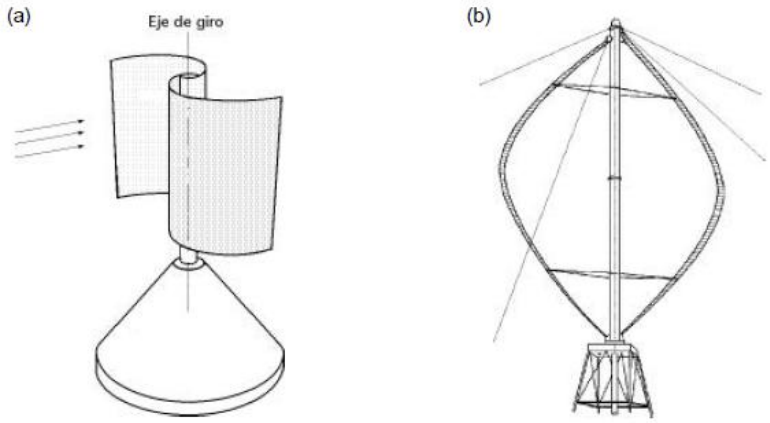
6.2.1 GENERALIDADES DE LAS TURBINAS EÓLICAS

Las turbinas eólicas o aerogeneradores son dispositivos utilizados para convertir energía eólica en energía eléctrica. Su principio básico de funcionamiento consiste en la rotación de varias aspas conectadas al rotor de un generador eléctrico. La potencia que puede generar un aerogenerador depende en gran medida de las condiciones del viento en el lugar de emplazamiento de la turbina. Como se explica en [8], la potencia generada por un aerogenerador depende de su curva de potencia. Esta curva de potencia es una de las características más significativas de un aerogenerador, ya que cada equipo cuenta con una curva única dependiendo de las características de fabricación y operación.

Los aerogeneradores de clasifican de acuerdo a la posición del eje de giro del rotor de la turbina [8]. Así, los aerogeneradores se pueden clasificar en dos grandes grupos: los aerogeneradores de eje horizontal o HAWT y los generadores de eje vertical o VAWT.

En los aerogeneradores HAWT, el eje de rotación es paralelo a la dirección del viento. Estos aerogeneradores a su vez se clasifican de acuerdo a la velocidad del viento. De esta forma se tienen aerogeneradores lentos, rápidos y de velocidad intermedia. Los aerogeneradores HAWT de velocidad intermedia presentan entre 3 y 6 aspas, y son utilizados en lugares donde las condiciones del viento no son favorables y generalmente son de baja potencia.

Los aerogeneradores VAWT, presentan el eje de rotación perpendicular a la dirección del viento. Existen dos diseños básicos [8]. El tipo Savonius se compone de dos semicilindros de igual diámetro situados paralelamente con respecto al eje de giro (Figura 43 a). El tipo Darrieus está formado por dos o tres palas de perfil aerodinámico y presenta muchas características similares a los de eje horizontal, presentando un par de arranque bajo (Figura 43 b).



Fuente: AEROGENERADORES INFERIORES A 100 kW. Maria Jose Cuestas. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. España. 2008.

Figura 43. Tipos de aerogeneradores VAWT.

Los aerogeneradores comerciales que se encuentran disponibles en el mercado presentan la etapa de adecuación eléctrica, especialmente los de baja potencia. Así, el consumidor solo debe preocuparse por realizar la correcta conexión. Esta conexión puede ser a 12 [V], 24 [V] o 48 [V] e ir directamente a un banco de baterías. De igual forma también se puede realizar una conexión a un inversor de

tipo *grid-tied* para la inyección en tiempo real de la energía a la red o uno tipo *grid-off* para la inyección directa a algún equipo o sistema.

6.2.2 REVISIÓN TECNOLÓGICA

Para la revisión técnica de los aerogeneradores disponibles en el mercado, se parte de la investigación realizada en [18]. Del total de aerogeneradores de baja potencia (< 3 [kW]), se observa que el 81% son de ejes horizontales y el 19 % de ejes verticales. No obstante, se determina que debido a las bajas velocidades del viento en las instalaciones del PTG el tipo de aerogenerador que mejor se adapta a dichas condiciones corresponde a uno de eje horizontal de velocidad media y bajo par de arranque.

Se tendrán en cuenta los criterios expuestos en [18], los cuales establecen que de acuerdo a las características del viento, solo es posible instalar aerogeneradores con velocidad de arranque menor a 1 [m/s] (por las bajas velocidades del viento). En la Tabla 25 se muestran los aerogeneradores que cumplen con las condiciones establecidas anteriormente. La potencia anual [kWh] se estima con base a las curvas de potencia de cada aerogenerador y las condiciones del viento en el PTG.

Tabla 25. Generadores HAWT con velocidades de arranque menores a 1 [m/s].

N	Modelo	Marca	Salida	Potencia [W]	Pcc Anual [kWh]	Vel. Min. [m/s]	Costo [USD]
1	AF-250D	Aerofortis	24 Vdc-off grid charger MPPT	250	117,63	0,5	1500
2	AF-600D	Aerofortis	24 Vdc-off grid charger MPPT	600	235,22	0,7	4400
3	Bornay600	Bornay	12,24,48 Vdc con regulador	600	89,68	1	4600
4	Bornay1500	Bornay	12,24,48 Vdc con regulador	1500	327,54	1	6000
5	Bee800	Bornay	12,24,48 Vdc con regulador	800	142,46	1	4800
6	ECO-500W	SUN ECO Solar and Wind Power	24 Vdc y 220 vac	500	47,95	1	3300
7	Wind Arrow 1000	TRUE-NORTH Power NG Inc	24-48 Vdc Controller	1000	144,68	0,1	3100

6.2.3 SELECCIÓN TÉCNICA

Después de un análisis económico y técnico de los modelos que cumplen con las características requeridas por el proyecto en el PTG, se considera que el modelo Wind Arrow 1000 de la empresa TRUE-NORTH Power NG Inc es el más apropiado. En la Tabla 26 se puede observar un resumen del estudio económico para todos los aerogeneradores seleccionados. El modelo Wind Arrow 1000, con las condiciones de viento en las instalaciones del PTG produciría alrededor de 146,88 [kWh] en un año (ver Tabla 27). Otro criterio importante para su selección es el bajo costo del watt generado. Así, para este aerogenerador el costo de 21,4 USD por [kWh] anual representa un valor competitivo, considerando que las inversiones realizadas para los sistemas de energía eólica y solar se recuperan en un periodo de 15 a 20 años. Teniendo en cuenta los impuestos y la ganancia del

proveedor se considera que el precio total del aerogenerador será mayor al precio establecido por el distribuidor.

Tabla 26. Generadores HAWT con velocidades de arranque menores a 1 [m/s], análisis económico.

Modelo	Marca	USD/Potencia [USD/W]	Potencia [W]	Pcc Anual [USD/kWh]	Vel. Min. [m/s]
AF-250D	Aerofortis	6,0	250	12,75	0,5
AF-600D	Aerofortis	7,33	600	18,70	0,7
Bornay600	Bornay	7,66	600	51,29	1
Bornay1500	Bornay	4,0	1500	18,31	1
Bee800	Bornay	6,0	800	33,69	1
ECO-500W	SUN ECO Solar and Wind Power	6,6	500	68,82	1
Wind Arrow 1000	TRUE-NORTH Power NG Inc	3,1	1000	21,4	0,1

Tabla 27. Energía anual de acuerdo a la curva de potencia del aerogenerador Wind Arrow 1000 TRUE-NORTH POWER calculada para la dirección SO.

Aerogenerador Seleccionado		
Potencia [W]	**Horas**	**Energia Wh**
20	95,217	1904,34
22	111,777	2459,09
30	107,637	3229,11
35	120,057	4202,00
37	161,456	5973,87
39	256,673	10010,25
60	148,393	8903,58
90	509,206	45828,54
100	190,435	19043,50
170	149,036	25336,12
190	78,658	14945,02
200	20,699	4139,80
220	4,140	910,80
	Total [Wh]	**146886**

Buscando mantener un balance adecuado de la generación en las fases de la microrred y generar el valor esperado de acuerdo a las características de diseño

planteadas anteriormente, se debe instalar un aerogenerador por fase. Es decir, se debe adquirir un total de tres aerogeneradores.

6.3 SELECCIÓN DE LOS CONTROLADORES SOLARES

Los controladores solares o convertidores DC/DC [22], son equipos que permiten, independientemente de la tensión de salida de la configuración de paneles, mantener determinado valor de tensión eléctrica en sus terminales, facilitando su conexión a otros equipos, proveyendo una carga confiable a las baterías, un control de carga y de regulación por desvío.

Para seleccionar adecuadamente este equipo, es necesario revisar dentro de los productos ofrecidos en el mercado, aquellos cuyos rangos de tensión de entrada y de corriente correspondan a los valores calculados para las configuraciones de paneles.

De la búsqueda de modelos de controladores solares, se recomiendan la utilización de los equipos presentados en la Tabla 28.

Tabla 28. Controladores solares seleccionados.

N	Marca	Modelo	Pot. Máx. [W]	V nom salida [V]	I entr. Máx [A]	V entr. Máx [V]	RDS MPPT* [V]	Corte baja tens. [V]	η[%]
1	Wellsee	WS-MPPT50	2400	48	50	110	48-80	42	95
2	Morningstar	Tristar-45	4000	48	45	125	-	9	-

* RDS MPPT: Rango de seguimiento MPPT.

Como se puede observar, ambos controladores cumplen con un valor adecuado de corriente de entrada, según los valores calculados en la sección anterior. Ambos modelos presentan una tensión nominal de salida de 48 [V], valor de interés para la selección del equipo de la siguiente sección. Sin embargo, el controlador de marca Morningstar modelo Tristar - 45 tiene una tensión de entrada

máxima de 125 [V] y una tensión de corte de 9 [V], rangos que son adecuados al valor de tensión del arreglo de paneles seleccionado.

De acuerdo al diseño de la microrred presentando en el Capítulo 5, se debe adquirir un controlador solar por fase, es decir un total de tres controladores para el sistema general.

6.4 SELECCIÓN DE LOS REGULADORES / INVERSORES

A continuación se presenta la selección de una unidad que integra ambos equipos:

6.4.1 SELECCIÓN DEL REGULADOR

Para el correcto funcionamiento de la microrred, es necesario instalar reguladores de carga entre la conexión de los sistemas de generación (incluso si su tensión ha sido adecuada mediante un convertidor DC/DC) y las baterías o acumuladores. Teniendo en cuenta que los sistemas de generación pueden producir tensiones mayores a los valores nominales de las baterías el regulador de carga cumple la función de proteger y regular la tensión ante estas sobrecargas. Además es el encargado de controlar el proceso de carga y descarga de los sistemas de acumulación.

Las características proporcionadas por los fabricantes en las hojas de datos de los reguladores de carga, permiten seleccionar el dispositivo correcto dependiendo del diseño de la instalación eléctrica. Dentro de las hojas de características de los dispositivos se puede encontrar:

- Características físicas del regulador: Material, peso, tamaño y dimensión.
- Características eléctricas.

- Normas y estándares de seguridad aprobados.

Además de estas características, es importante tener en cuenta para la selección del regulador, el tipo de batería que se puede conectar a la salida y todas las alarmas que proporciona ante una eventual sobretensión.

De las características proporcionadas por el fabricante en las hojas de datos de los reguladores, las de mayor importancia se describen a continuación:

- **Tensión nominal:** Es la tensión nominal de trabajo que corresponde con la tensión nominal de la configuración de baterías. La tensión nominal del regulador debe tener un valor tal que pueda ser igual o mayor la configuración en paralelo y serie de baterías para poder suministrar la potencia necesaria en la carga.
- **Intensidad máxima recibida:** Es la intensidad máxima en Amperes (A) que el regulador puede recibir a la entrada, proveniente del sistema de generación, del sistema de paneles solares o de un convertidor DC/DC.
- **Intensidad máxima de consumo:** Es la intensidad máxima en Amperes (A) que el regulador puede proporcionar a la parte de la instalación donde se conectaran los equipos de usuario.
- **Sobrecarga admisible:** Porcentaje sobre el valor nominal que soporta el regulador sin romperse.
- **Autoconsumo:** Intensidad de corriente en miliamperes (mA) que el regulador requiere para su propio funcionamiento. Este valor es de gran importancia en sistemas aislados de la red y en zonas apartadas de conexión por que puede considerarse como una pérdida del sistema.
- **Perdida máxima generación/consumo:** Es un valor relacionado con las caídas internas de tensión. Es importante porque puede llegar a modificar las tensiones de trabajo y produce pérdidas de energía.

Es posible que la hoja de datos de algún fabricante no incluya todas las anteriores características, sin embargo las cuatro primeras son suficientes para seleccionar adecuadamente un equipo dentro de un sistema.

6.4.2 SELECCIÓN DEL INVERSOR

El inversor es el equipo electrónico utilizado para convertir la corriente continua producida por los paneles solares y el aerogenerador, en corriente alterna.

Una de las características más importantes de los inversores disponibles en el mercado es su capacidad de operar aun si ha ocurrido una falla en la red eléctrica. Los inversores *gried-tied,* son capaces de producir una onda de tensión de salida en concordancia en tensión y frecuencia con la señal de la red eléctrica. Sin embargo, inmediatamente después de que el inversor no detecta tensión proveniente de la red, éste se desconecta por lo que no es posible que un inversor *gried-tied* opere en isla o desconectado de la red eléctrica.

Según las características de diseño de la microrred detalladas en el Capítulo 5, se debe seleccionar un inversor acorde a los parámetros de las configuraciones de paneles por fase y de la configuración de baterías correspondiente. El inversor requerido, debe permitir la conexión de las baterías y de cargas de corriente continua, además debe ser *gried-off* para permitir la operación de la microrred en modo de isla.

6.4.3 SELECCIÓN TÉCNICA

Una vez finalizada la revisión de equipos ofrecidos en el mercado, se encontró que el equipo FLEX POWER ONE de la empresa Out Back Power, cuenta con todas las características apropiadas de acuerdo al diseño de la microrred.

El modelo FP1-2 está compuesto por [19]:

- Un inversor VFX3648. Inversor ventilado con las características mostradas en la Tabla 29 [20]:

Tabla 29. Características del inversor VFX3648.

Tensión nominal entrada CC	48 VDC
Potencia nominal a 25 ^{O}C	3600 VA
Tensión AC / Frecuencia	120 VAC / 60 Hz
Corriente nominal salida CA	30 A AC
Eficiencia	93 %
Distorsión armónica máxima	5 %
Corriente máxima de salida	70 A AC (Pico) / 50 A AC (RMS)
Capacidad de sobrecarga (5 seg)	5000 VA
Capacidad de sobrecarga (30 min)	4000 VA
Rango de tensión de entrada en CC	42 a 68 VDC
Corriente continua de carga a la batería	45 A DC

- 2 Cajas AC – DC DE 120 VAC con protecciones (175 ADC).
- 1 Regulador mppt FLEX MAX 80 (Controlador de carga) con las características mostradas en la tabla 30 [21]:

Tabla 30. Características del regulador FLEX MAX 80.

Tensiones nominales de baterías	12, 24, 36, 48 o 60 V (Seleccionable)
Corriente máxima de salida	80 A 104 ^{O}F
Máximos valores de tensión y potencia para configuraciones de paneles en STC	12 VDC 1250 Watts 24 VDC 2500 Watts 48 VDC 5000 Watts 60 VDC 6250 Watts
Eficiencia	97,5 %

- 1 Display de control y programación MATE 2. Proporciona una pantalla de lectura de operación, permite controlar y ajustar todos los parámetros y también coordinar la operación del sistema entero para maximizar su funcionamiento. Pantalla iluminada de 4 líneas LCD y 80 caracteres, memoria permanente, calendario y reloj en tiempo real, programación de operación del inversor en base al día y la hora.

- Sistema de comunicación HUB4, mediante el que todos los productos de Outback que conforman el sistema son coordinados y gestionados desde el MATE (Display). Incluye cables de interconexión Ethernet standart con terminales RJ45. Puede conectarse hasta 4 productos más el display.

- FLEXnet DC que permite monitorizar el sistema de corriente continua, proporcionando información sobre el estado, eficiencia y funcionamiento del sistema. Mantiene un registro histórico de 128 días de información. Permite visualizar la corriente producida y consumida instantáneamente por el sistema así como la carga y descarga del banco de baterías, los totales de energía consumida, producida y la carga del banco de baterías para el día en curso.

- Protecciones de sobretensión para aplicaciones 120 [V], 60 [Hz].

De acuerdo al diseño de la microrred presentando en el Capítulo 5, se debe adquirir un FLEX POWER ONE modelo FP1-2 por fase, es decir un total de tres equipos para el sistema general.

6.5 SELECCIÓN DE LAS BATERÍAS

Las baterías cumplen la función de almacenar la energía generada por los paneles solares, el sistema eólico y demás fuentes de generación. La curva de generación de estos sistemas depende directamente de las condiciones climáticas por lo que las baterías simplemente estabilizan esta generación en un valor definido en el diseño.

Las baterías son recargadas desde los paneles solares o los aerogeneradores a través del regulador de carga, estas deben entregar la corriente necesaria a la salida para el correcto funcionamiento de la carga. Uno de los parámetros más

importantes para seleccionar una batería es la *capacidad.* Ésta se define según [7], como la cantidad de electricidad que puede lograrse en una descarga completa del acumulador partiendo de un estado de carga total del mismo. Se mide en amperes por hora (Ah), y se calcula como el producto de la intensidad de descarga del acumulador durante el tiempo en el que se está actuando.

Además de la capacidad, es necesario considerar otros parámetros de las baterías. Los más importantes son:

- **Eficiencia de carga:** Es la relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía útil. Se espera que este valor sea lo más cercano al 100%, lo que indicaría que toda la energía adquirida en la recarga es usada en la salida de la instalación.
- **Profundidad de descarga:** Cantidad de energía, en porcentaje, que se obtiene de la batería durante una descarga, partiendo del acumulador totalmente cargado. Está relacionado con la vida útil del acumulador. Si los ciclos de descarga son cortos, la duración del acumulador será mayor que si se somete a ciclos de descarga profundos.

Otras características que se deben tener en cuenta para seleccionar los acumuladores son:

- Buena resistencia al proceso de carga-descarga.
- Bajo costo de mantenimiento.
- Buen funcionamiento para corrientes pequeñas.
- Amplia reserva de electrolito.

6.5.1 CÁLCULO DE LAS BATERÍAS

Para calcular el valor de capacidad de A-h de las baterías, de acuerdo a la metodología presentada en [17], se tendrá en cuenta el valor de kw-h semanales

totales (sin factores de ineficiencia). A partir de éste, se calculará el valor diario de kw-h totales de la carga.

$$\frac{L_{Weekly}}{7} = \frac{104{,}2\ kW - h}{7} = 14.88\ kW - h \quad (32)$$

Se seleccionará una tensión de sistema de almacenamiento de 48 [V]. Con este valor se calcula el total de A-h diarios.

$$\frac{14{,}88\ kW - h}{48\ V} = 310\ A - h \quad (33)$$

Para dimensionar correctamente las baterías se debe asignar un valor de días de autonomía. Según el IDEA (Instituto de Diversificación y Ahorro de Energía Español) el valor mínimo debe ser de 3 días, sin embargo dependiendo de la aplicación, es adecuado seleccionar hasta 10 días de autonomía. Para el proyecto se seleccionará un total de 4 días de autonomía.

De esta forma, la capacidad ampermétrica del sistema se calcula de la siguiente forma.

$$310\ A - h * 4 = 1240\ A - h \quad (34)$$

Teniendo en cuenta el diseño de microrred presentado en el Capítulo 5, la capacidad ampermétrica del sistema de almacenamiento debe ser distribuida en cada unas de las 3 fases. De acuerdo a esto, el valor correspondiente por fase será igual a 413,3 A – h. Para poder utilizar el menor número de baterías posibles por fase se considera usar baterías con capacidad ampermétrica elevada. Además, el fabricante de la unidad FLEX POWER ONE recomienda el uso de baterías con capacidad ampermétrica mayor a 200 A-h para garantizar la correcta transferencia de potencia desde la unidad a la carga.

6.5.2 SELECCIÓN TÉCNICA

Se llevó a cabo la revisión de los equipos disponibles en el mercado, donde existe gran diversidad de modelos. Dentro de las características principales para la selección de los modelos de baterías se consideran la tensión de operación de 12, 24 o 48 [V] y la capacidad ampermétrica mayor a 200 [A-h]. Estas dos características son las que determinan la primera clasificación de los diferentes modelos disponibles. Además, es necesario considerar para la selección el tipo de material de fabricación de las baterías.

En el mercado existen acumuladores de tipo gel, AGM, tubular estacionaria y de arranque. Se descartan las baterías del tipo arranque pues no están diseñadas para ciclos de carga y descarga profundos y son de corto tiempo de vida útil. Las baterías tubular estacionaria presentan ciclos de carga y descarga profundos y tiempo de vida largo, sin embargo, su principal desventaja es su elevado costo y la poca disponibilidad en el mercado. Las baterías de tipo gel presentan ciclos de carga y descarga profundo y son de bajo mantenimiento. No obstante, se deterioran rápidamente bajo condiciones de operación extrema de V-I. Las baterías del tipo AGM pueden cargarse a tensiones mayores a su valor nominal sin que esto afecte su funcionamiento o deteriore el equipo. Además, poseen la característica de entregar y absorber tasas más altas de corriente que otro tipo de baterías.

En la Tabla 31 se presenta un resumen de lo modelos de baterías que cumplen con las características establecidas. El costo por unidad de cada batería fue suministrado por el distribuidor de productos para sistemas eólicos y solares, Renovables Andalucía consultado en Marzo del 2012 [4].

Tabla 31. Modelos de baterías disponibles en el mercado.

Modelo	Fabricante	Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Tipo	Precio [€]
BTO-3 TOPzS 265-04	Tab Battery	12	345	Tubular estacionaria	804,71
BL-BLE-12-400	Effekta	12	400	Litio	3781,82
BS5000-B1015-03	Rolls	12	503	AGM	1288,12
BGEL-BAT412201100-08	Victron	12	220	Gel	555,78
BOP-6 OPzS 300-04	Tab Battery	12	450	Tubular estacionaria	1216,34

De los modelos encontrados en el mercado que cumplen con las características del diseño, se selecciona el modelo BS5000-B1015-03 del fabricante Rolls. Este acumulador es del tipo AGM, es de fabricación específica para sistemas solares y eólicos. Las baterías del tipo tubular estacionaria y las de litio no se seleccionan debido al alto costo por unidad y la poca disponibilidad en el mercado. Debido a que el modelo seleccionado presenta una capacidad ampermétrica de 503 A-h, se reduce el número de baterías necesarias para suministrar los 413,3 A-h determinados anteriormente. Así, la conexión a realizar por cada fase consta de cuatro baterías en serie de 12 [V]. Mediante esta conexión se logra que la tensión de operación del conjunto sea de 48 [V] y proporcionen una capacidad total de 503 A-h.

Se requieren 4 baterías por fase para un total de 12 baterías en todo el sistema.

En la Tabla 32 se presenta una descripción básica de las características de operación del acumulador seleccionado de fabricante Rolls.

Tabla 32. Características técnicas de la batería del fabricante Rolls.

Modelo	BS5000-B1015-03
Tensión [V]	12
Capacidad [Ah]	503
Tipo	AGM
Precio [€]	1288,12

Vida útil con una profundidad de descarga del 50%	3200 ciclos
Garantía	10 años
Vida útil	15 años aprox.

6.6 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CARGA

El sistema de transferencia de potencia es el eje central de la microrred. Es el encargado de coordinar la entrega de potencia proveniente de los sistemas de generación distribuida y de la red hacia la carga, con el objetivo de mantener el flujo de potencia de forma ininterrumpida. Por las condiciones del diseño de la microrred presentadas anteriormente, el sistema de transferencia de potencia debe ser trifásico, con conexión a tierra y neutro. Además, debe tener la capacidad de transferir la alimentación de la carga a los sistemas de generación mediante energía renovables o a la red eléctrica, aún cuando estos dos sistemas no se encuentren en fase entre sí.

Si la tensión proveniente de la unidad FLEX POWER ONE, resultado de la potencia generada por el sistema eólico, solar y el motor diesel, no se encuentra en fase con la señal de la red, el sistema de transferencia de potencia debe realizar la transferencia de la fuente de alimentación en el menor tiempo posible

con el fin de evitar la introducción de huecos de tensión en la señal que se le proporciona a la carga.

Los módulos de transferencia de potencia están incorporados con microprocesadores internos para la programación de la transferencia, dependiendo de los valores de medición de la calidad de la potencia suministrada a la carga y de los diferentes parámetros de las fuentes de entrada. El microprocesador interno cumple la función del controlador general de la microrred. Además, es el encargado de transmitir toda la información actual del sistema y de los eventos programados mediante los diferentes protocolos, RS232, RS485 o Ethernet. No obstante, el equipo cuenta con la opción para la transferencia manual en caso de falla del sistema del microprocesador.

Es importante resaltar, que el equipo seleccionado debe poseer la función “break before make”. Esta función, permite desconectar la fuente de la carga antes de realizar la transición hacia la segunda fuente de generación lo que permite garantizar que la red y los sistemas de generación se encontraran aislados en el momento de transición.

6.6.1 SELECCIÓN TÉCNICA

De los equipos disponibles en el mercado, se seleccionó el Sistema Estático de Transferencia (STS) del fabricante SOCOMEC. Se seleccionó este equipo debido a que posee dos modos básicos de operación: con sincronización de las dos fuentes de alimentación con un tiempo máximo de transferencia de 3 [ms]. El STS STATYS-100 es un sistema de transferencia trifásico, con tensión de alimentación para las fuentes de 208-220 [V], puerto de comunicación RS232 y TCP/Ethernet, frecuencia de operación de 60 [Hz] y rango de frecuencia de entrada programable hasta ± 5 [Hz], medidores de tensión, fase y frecuencia de las señales de las fuentes redundantes y de las condiciones de alimentación de la carga [13].

Además, de la transferencia automática y programada mediante el microprocesador de 32 bits, posee controles para realizar la transferencia de alimentación de la carga de forma manual. En la Tabla 33 se presentan las especificaciones técnicas del modulo STATYS-100.

Tabla 33. **Especificaciones técnicas del STATYS**

	Tensión de entrada	208-220 [V]
	Corriente de salida	100 [A]
	Factor de potencia de la carga	Sin restricciones
	Tiempo máximo de transferencia con sincronismo	3 [ms]
	Tipos de transferencia	Modo de transferencia síncrono y asíncrono
		Modo de transferencia síncrono exclusivo
		Modo de conmutación de limitación de corriente transitoria
		Tiempo de transferencia calibrado
	Protocolo de comunicación	RS232/ TCP/Ethernet
	Panel frontal	LCD
	Grado de protección	Clase CB/PC
	Peso	70 [Kg]
	Monitorización de parámetros	Tensión fuente 1 y fuente 2, frecuencia fuente 1 y fuente 2, sincronismo, temperatura, balance de fases, grado de fases.

6.7 SELECCIÓN DEL RECTIFICADOR

El equipo cumple la función de transformar la energía eléctrica proveniente de la unidad FLEX POWER ONE a tensión DC para proporcionar alimentación a las cargas. De las características de diseño, la unidad de rectificación de tensión debe proporcionar una salida de tensión de 24 [V] a una carga máxima de 565 [W]. Con

el valor de tensión de entrada de 120 [VAC], y considerando carga máxima, se tiene que la corriente de entrada puede tener un valor máximo de 4,7 [A]. Este valor de corriente es el resultado de considerar que uno de los rectificadores tuviese que proporcionar toda la potencia a la carga. Con respecto a la corriente de salida, si se considera carga máxima, a tensión de 24 [V] la corriente que se espera seria de 23,54 [A]. Estos valores de corriente, tensión y potencia representan las condiciones mínimas que debe cumplir el modelo de rectificador seleccionado.

Debido a que para valores bajos de potencia no se encuentran disponibles en el mercado rectificadores trifásicos con tensión de salida de 24 [V] y tensión de entrada de 120 [V], entre fase-neutro, se propone utilizar tres rectificadores iguales, uno para cada fase. La interconexión de estos rectificadores será hacia un nodo común, con el fin de prever futuras fallas. Así, si falla uno de los rectificadores los dos restantes deben estar en la capacidad de proporcionar la potencia que la carga requiera.
En la Tabla 34 se presentan las especificaciones técnicas del rectificador seleccionado, que corresponde al modelo HRP-600-24 de la empresa TRC Electronics INC. Este rectificador es Single Output con potencia máxima de salida de 600 [W].

Tabla 34. Especificaciones técnicas del rectificador HRP-600-24.

	Tensión DC	24 [V]
	Rango de corriente de salida	0-27 [A]
	Potencia	600 [W]
	Tensión de entrada	87-220 [VAC]
	Rango de frecuencia de entrada	47-63 [Hz]
	Corriente de entrada	8 A / 115 [VAC]

	Eficiencia	88%

6.8 SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN

La función principal de los medidores es servir de interfaz para conocer el valor de los parámetros de la calidad de la energía eléctrica en cada uno de los tramos de la microrred. Esto, con el fin de monitorizar los valores de entrada y salida de los equipos, para así mantener la operación dentro del rango especificado por cada fabricante de manera que los equipos no sufran daños. Para la selección los equipos de medición es necesario tener en cuenta los valores de corriente máxima (de dimensionamiento) que se pueden presentar en cada uno de los tramos que conforman la estructura de la microrred.

Parámetros como tensión, corriente, frecuencia y potencia, permiten conocer el comportamiento cambiante de la energía que se produce en los sistemas locales de generación, y como se distribuye dicha energía dentro del sistema. Así, los medidores ubicados en los nodos de transferencia de energía permiten robustecer la estructura de la microrred y analizar el consumo de la energía en las cargas DC y AC. Uno de los objetivos de los medidores es poder conocer la distribución de la energía para mejorar la eficiencia del sistema al conocer como es la transferencia de la misma hacia las cargas y como se encuentra el balance de las fases ante el consumo.

Para hacer uso del mismo medidor en todos los ramales donde la corriente es de forma AC, se realiza una selección técnica teniendo en cuenta la mayor magnitud que se puede presentar en un tramo de este tipo de señal. El medidor debe ser capaz de tolerar dicha intensidad de corriente. No obstante, como los medidores disponibles en el mercado no presentan estas características, los fabricantes

recomiendan la conexión de transformadores de corriente (CT) a la entrada de los diferentes medidores para garantizar que los dispositivos operen de forma adecuada.

6.8.1 SELECCIÓN TECNICA

El modelo de medidor para la señal DC seleccionado corresponde al PZ300-DE del fabricante Shangai Acrel Lta. En la Tabla 35 se pueden observar las especificaciones técnicas para este equipo.

Tabla 35. Especificaciones Técnicas del medidor PZ300-DE

Gama de medición de corriente	Directo	5 [mA] a 10 [A]
	Con reductor tipo shunt	0-9999 [A]
Gama de medición de tensión	0-10000 [V]	
Exactitud	Clase 0,5 S	
Tensión de conexión	36-48 VDC, 85-265 VAC	
Protocolo	RS485- MODBUS	
Parámetros	Corriente, voltaje, potencia, energía.	

Como recomienda el fabricante del medidor de corriente directa PZ300-DE, para hacer la conexión del medidor para corrientes mayores a 10 [A], se utiliza un desviador tipo shunt de 75 [mV]. Este desviador, básicamente es una resistencia de alta precisión que permite solo el paso del valor máximo de corriente admisible por el medidor, desviando la corriente restante. Se conecta en paralelo con el medidor, la caída de tensión del dispositivo no supera los 75 [mV] por lo que no altera el funcionamiento del sistema. En la Tabla 36 se puede observar las características básicas del dispositivo.

Tabla 36. Especificaciones Técnicas del derivador shunt.

	Tipo	Shunt
	Caída de tensión	75 [mV]
	Corriente máxima de desviación	100 [A]
	Consumo	<1 mW

Tabla 37. Especificaciones Técnicas del medidor PowerLogic PM710.

	Tipo	Trifásico	
	Corriente de entrada con CT	Primario	5 [A] a 32000 [A]
		Secundario	1 [A] a 5 [A].
	Rango de corriente para medición.	5 [mA] a 6 [A]	
	Rango de tension Ph-N	10-277 [V]	
	Rango de tension Ph-Ph	10 – 480 [V]	
	Rango de frecuencia	45-65 [Hz]	
	Fuente de alimentación	100-415 [VAC] / 5 [VA]	
	Comunicación	RS485/MODBUS	

Como es necesario seleccionar un transformador de corriente para realizar la conexión del medidor de AC, se realiza una búsqueda de los equipos disponibles en el mercado para su selección. De la Tabla 39 se observa que el valor máximo se espera sea de 30 [A] en el tramo H. Se selecciona un transformador de corriente con relación 100/5 y corriente nominal del secundario de 5 [A] como lo recomienda el fabricante. En la Tabla 38 se presentan las especificaciones técnicas del modelo PowerLogic CT TI 100/5.

Tabla 38. Transformador de corriente PowerLogic CT TI 100/5.

	Corriente del secundario del TI	5 [A]
	Corriente del primario del TI	100/5
	Tensión asignada de empleo	<720 [V] 50 /60 [Hz]
	Montaje	Soporte DIN Placa de montaje
	Calibre In	100 [A]
	Peso	2 [Kg]

7. DISEÑO DE LAS INSTALACIÓNES ELÉCTRICAS

Para realizar el diseño de las instalaciones eléctricas de la microrred, es necesario tener en cuenta la normativa correspondiente. En este caso, la norma NTC – 2050 o Código Eléctrico Colombiano. Para este tipo de instalaciones, resulta conveniente atender además otras normativas como la NEC (National Electrical Code) en su sección 690.

Para el cálculo y dimensionamiento de ductos, conductores y protecciones se analizan los valores de corriente y características de cada tramo. Para esto, se presenta inicialmente en este capítulo el análisis del flujo eléctrico del sistema para posteriormente realizar el diseño de la instalación eléctrica.

7.1 ANÁLISIS DE FLUJOS

Este análisis permite definir los valores de tensiones y corrientes nominales a partir de los cuales se dimensionarán y seleccionarán elementos que componen la instalación eléctrica.

La Figura 44, incluye un diagrama con la asignación de letras para identificar cada tramo, así como los valores nominales de tensión. En el caso de los tramos en DC, solo se muestra una de las tres líneas que son idénticas y que van conectadas a cada una de las fases de los elementos trifásicos. Los símbolos utilizados son los mismos de la Figura 37, cuya nomenclatura está especificada en la Tabla 5.

Los valores de tensión nominal se seleccionaron de acuerdo a la tensión correspondiente en cada tramo, según las salidas de los equipos conectados a las mismas. La tensión de 38 [VDC] a la salida de la configuración de paneles (tramo

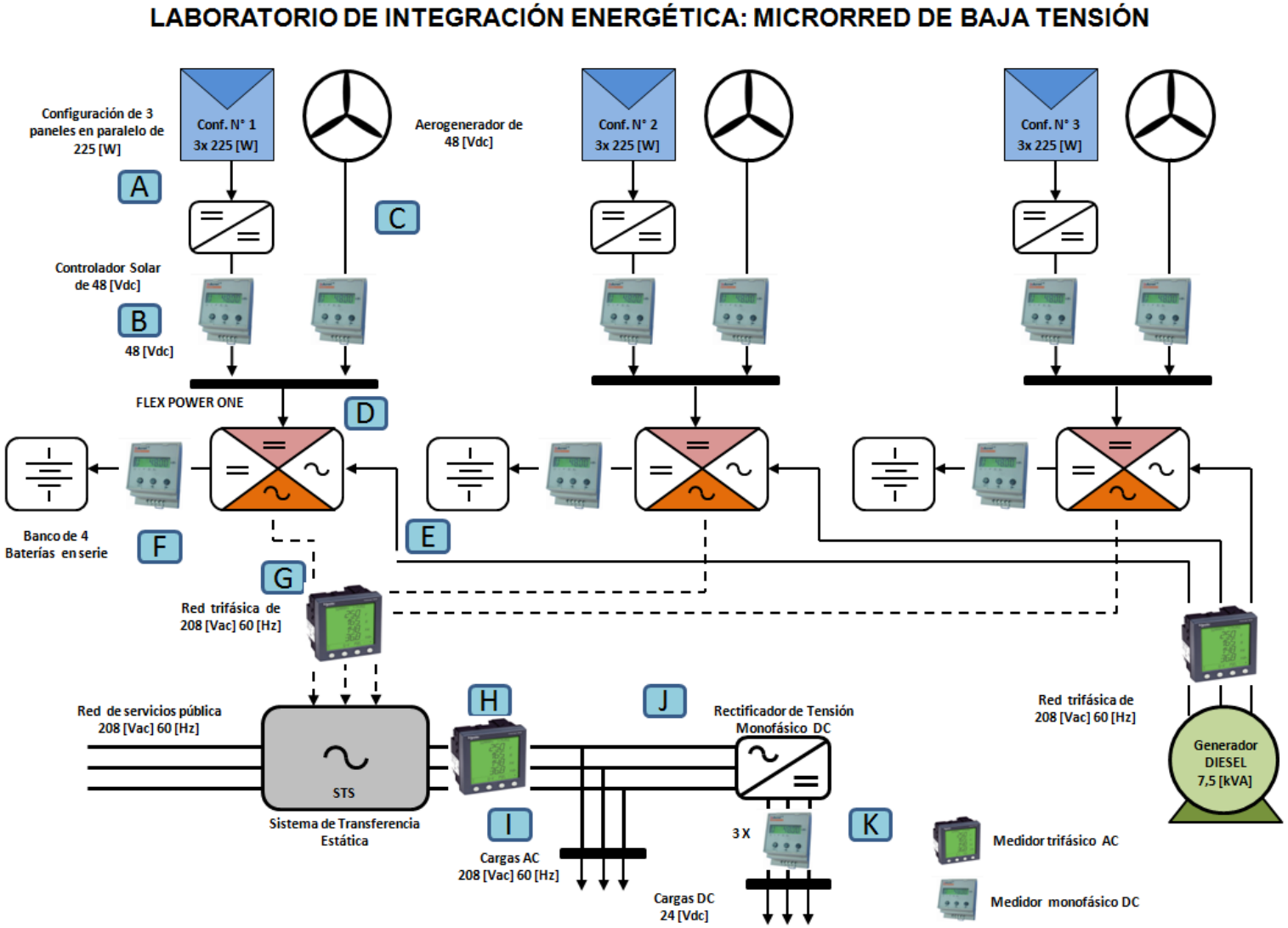
A) corresponde a la tensión Voc máxima para condiciones SCT calculada a través del modelo de la sección 6.1.6 (Modelado del panel solar) y presentada en la Tabla 24.

La tensión de los tramos E, G, H, I y J corresponden al valor línea a neutro. La microrred está compuesta por un sistema en AC trifásico de tensión línea a línea de 208 V.

Para seleccionar las corrientes de dimensionamiento, se consideraron los valores nominales de potencia de los equipos y, en el caso de la generación, los valores nominales y los obtenidos a través del modelado de los paneles.

A continuación, se presentan los cálculos realizados.

Figura 44. Diagrama de flujos de la microrred



CORRIENTES DE DIMENSIONAMIENTO DE LAS CONFIGURACIONES DE PANELES, AEROGENERADORES Y GENERADOR DIESEL.

Para el tramo A, se tuvo en cuenta el valor de corriente Isc máxima para condiciones en la zona presentado en la Tabla 24 y calculado a través del modelo de la sección 6.1.7 (Modelado del panel solar) igual a 25,2 [A].

Para el tramo B, se calculó la corriente manteniendo el valor de potencia y a través de la relación de potencias del controlador solar.

$$I_{SC\ B} = \frac{I_{SC\ A} * V_{n\ A}}{V_{n\ B}} = \frac{25{,}2 * 38}{48} = 20\ A \quad (35)$$

Para el tramo C, se calculó la corriente a partir del valor nominal de potencia del aerogenerador de la siguiente forma:

$$I_{SC\ C} = \frac{Pn}{Vn} = \frac{1000}{48} = 20{,}83\ A \quad (36)$$

CORRIENTES DIMENSIONAMIENTO PARA LAS SALIDAS Y ENTRADAS DEL EQUIPO FLEX POWER ONE

Los tramos conectados directamente al equipo FLEX POWER ONE se calcularon teniendo en cuenta el valor de potencia nominal del mismo. Como se observa en las especificaciones indicadas en la Tabla 29, tiene un valor de potencia nominal de 3600 [W].

Para los tramos D, E, F, G y H, las corrientes se calcularon según la ecuación 37, teniendo en cuenta los niveles de tensión propios de cada tramo. Los valores de estas corrientes son mostradas en la tabla 39.

$$I_{SC\ TRAMO} = \frac{Pn\ FP1}{Vn\ tramo} = \frac{3600}{Vn\ tramo}\ (37)$$

Las corrientes de dimensionamiento de estos tramos se calculan de esta forma, previendo futuras expansiones de manera que el sistema sea utilizado hasta sus valores nominales. En el caso del tramo D, la corriente de dimensionamiento no se calcula como la suma de la corriente del tramo B y C, asumiendo que las expansiones se harán conectando, por ejemplo, nuevas fuentes de generación en DC a la barra entre estos tramos.

CORRIENTES DE DIMENSIONAMIENTO PARA LAS CARGAS

Las corriente de dimensionamiento de los tramos conectados a las cargas, se calculan a través del valor de potencia definido para estas en la sección 5.1. (Cargas) y el valor de potencia nominal del rectificador definido en la sección 6.7 (selección del rectificador).

El cálculo tipo se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$I_{SC\ TRAMO} = \frac{Pn}{Vn} =\ (38)$$

El tramo I, tiene una potencia nominal de 943 W y una tensión de 120 V. La corriente de dimensionamiento es igual a 18,76 A.

Para los tramos J y K se tuvo en cuenta la potencia nominal del rectificador, que corresponde a 600 W, teniendo en cuenta los valores de tensión nominales, se calcularon las corrientes de dimensionamiento: 5 A y 35 A respectivamente.

7.2 SELECCIÓN DE CONDUCTORES Y DUCTOS

Para la selección de estos elementos, se tendrán en cuenta factores como: el valor de corriente de dimensionamiento obtenido del análisis de flujos de la sección anterior para determinar si la capacidad ampermétrica del conductor es adecuada, la ubicación del tramo (intemperie) y las pérdidas por efecto Joule de manera que no superen el 5% acumulado desde cualquier elemento de generación (configuraciones de paneles, aerogeneradores, generador diesel o baterías) hasta cualquiera de las cargas de la microrred.

Para los tramos expuestos a la intemperie se seleccionan conductores USE-2 y ductos EMT (de acuerdo al artículo 690–31 b de la NTC 2050). Para los tramos que se encuentran en el interior del edificio se seleccionan conductores THW.

Para este tipo de sistemas no es necesario utilizar el método tradicional de regulación para seleccionar el calibre del conductor debido a que las características de la unidad FLEX POWER ONE y los convertidores, garantizan que la tensión de operación se mantenga siempre y cuando la tensión del tramo varíe en los rangos apropiados. Además, las distancias de los tramos son suficientemente cortas como para que estos rangos se cumplan adecuadamente.

Las perdidas por efecto Joule se calcularon a través de la siguiente ecuación:

$$P_{Joule}(\%) = \frac{200 * R * I_n}{V_n} = \frac{200 * \rho * l * I_n}{S * V_n} \qquad (39)$$

Para el cobre, se utiliza un valor de resistividad ρ igual a 0,017241 [Ω*mm^2/m] tomado de [24]. Los valores de resistencia de los conductores para DC se tomaron de acuerdo a las tablas encontradas en [6].

Tabla 39. Dimensionamiento y selección de conductores.

Tramo	Señal	Longitud [m]	Datos de dimensionamiento			Datos del conductor			
			Intemperie	I sc [A]	1,25* Isc [A]	Calibre mínimo	TIPO	Calibre Selecc.	Pp %
A	DC	30	SI	25,2	31,5	#10	USE-2	#2	2,08
B	DC	6	NO	20	25	#10	THW	#4	0,42
C	DC	35	SI	20,83	26	#10	USE -2	#2	1,59
D	DC	5	NO	75	93,75	#3	THW	#2	0,82
E	AC	35	SI	30	37,5	#8	USE-2	#8	2,08
F	DC	8	NO	75	93,75	#3	THW	#2	1,31
G	AC	5	NO	30	37,5	#8	THW	#8	0,30
H	AC	5	NO	30	37,5	#8	THW	#8	0,30
I	AC	5	NO	7,85	9,8	#14	THW	#14	0,31
J	AC	5	NO	5	6,25	#14	THW	#14	0,20
K	DC	5	NO	25	31,25	#10	THW	#4	0,87

Perdidas de potencia acumuladas desde los elementos de generación hacia las cargas más lejanas												
Pp% Tramo	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**K**	**TOTAL %**
Paneles	X	X		X			X	X		X	X	4,98
Aerogenerador			X	X			X	X		X	X	4,07
Gen Diesel					X		X	X		X	X	3,75
Baterías						X	X	X		X	X	2,97

Para la selección de ductos de la microrred, se tuvo en cuenta lo estipulado en la sección 690 de la NTC para el sistema solar fotovoltaico.

El artículo 690-4 b, indica que los circuitos de las fuentes fotovoltaicas y los circuitos de salida fotovoltaica no deben instalarse en las mismas canalizaciones, bandejas portacables, cajas de salida, etc. junto a alimentadores de otros sistemas excepto cuando estos estén conectados entre sí. En este caso, los bajantes de los sistemas eólico y fotovoltaico de la terraza podrían compartir bandejas portacables existentes.

Los equipos de generación ubicados en la terraza (arreglos de paneles, aerogeneradores y generador diesel) se conectarán mediante ductos en el área expuesta hasta el ducto técnico del piso, desde donde se conectarán los bajantes a través de las bandejas portacables existentes.

Los elementos al interior del laboratorio se conectarán a través de bandejas portables. En los planos anexos se indica en detalle la disposición de los equipos.

En la Tabla 40, se indican los tamaños de los ductos seleccionados de acuerdo a la tabla C1 del apéndice C de la NTC 2050.

Tabla 40. Dimensionamiento y selección de los ductos.

Tramo	Señal	Conductor		Ducto	
		Calibre	Tipo	Φ [pulg]	Tipo
A	DC	6 * #2	USE-2	1 ½	EMT
C	DC	6 * #2	USE-2	1 ½	EMT
E	AC	4 * #8	USE-2	1	EMT

7.3 SELECCIÓN DE PROTECCIONES

La selección de protecciones se lleva a cabo teniendo en cuenta la corriente de dimensionamiento de cada tramo.

Se seleccionaron protecciones contra sobrecorrientes (fusibles e interruptores automáticos) en cada tramo dependiendo de las corrientes de dimensionamiento.

Para el tramo A, conectado a los paneles solares, se selecciona además un bloqueo de flujo inverso (diodo de bloqueo) necesario para las situaciones en las que, debido a inconvenientes de funcionamiento o niveles muy bajos de radiación, los paneles son percibidos por el sistema como cargas.

Para el tramo E se seleccionaron dos totalizadores trifásicos de 40 KA (capacidad de ruptura), para proteger el sistema de sobrecorrientes y de fallas en el generador diesel.

Para proteger el sistema de sobretensiones, se seleccionaron DPS categoría C en los tramos E y H.

Tabla 41. Dimensionamiento y selección de protecciones.

Tramo	Señal	Longitud [m]	Datos de dimensionamiento				Protección - Corriente			
			Intemperie	Vn [V]	I sc [A]	1,25* Isc [A]	Tipo	I nom [A]	Dispositivo	
A	DC	30	SI	38	25,2	31,5	Fusible Breaker (P-N) Diodo de bloqueo	40 32 32	OEZ ABB -	PV14 40A Gg S802PV-S32 Diodo de 32 A
B	DC	6	NO	48	20	25	Breaker (P-N)	32	ABB	S802PV-S32
C	DC	35	SI	48	20,83	26	Breaker (P-N)	32	ABB	S802PV-S32
D	DC	5	NO	48	75	93,75	Breaker (P-N)	100	ABB	S802PV-S100
E	AC	35	SI	120	30	37,5	Totalizador 3Φ Totalizador 3Φ DPS 220/127V	40 40 80K	- - -	Tot. 40A Tot. 40A DPS Cat. C
F	DC	8	NO	48	75	93,75	Breaker (P-N)	100	ABB	S802PV-S100
G	AC	5	NO	120	30	37,5	Breaker mono	40	ABB	S201-C40
H	AC	5	NO	120	30	37,5	Breaker mono DPS 220/127V	40 80K	ABB -	S201-C40 DPS Cat. C
I	AC	5	NO	120	7,85	9,8	Breaker mono	10	ABB	S201-C10
J	AC	5	NO	120	5	6,25	Breaker mono	8	ABB	S201-C8
K	DC	5	NO	24	25	31,25	Breaker (P-N)	32	ABB	S802PV-S32

7.4 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Para el diseño del sistema de puesta a tierra se debe tener en cuenta las indicaciones en la sección 690 (en especial el ítem E) y el artículo 250-95 de la NTC-2050.

Los equipos ubicados en la terraza estarán conectados al sistema de puesta a tierra del edificio para equipos sensibles mediante un conductor aislado de Cu # 8 THHN tipo cable vehículo con tubería metálica EMT de ½" en áreas expuestas. Todos los equipos se conectarán mediante una barra de tierras ubicada en la cubierta y se instalará un único bajante. Éste debe ser un conductor aislado de Cu # 6 THHN tipo cable vehículo y se ubicará en la bandeja existente en los ductos técnicos verticales.

Por su parte, todos los equipos de la microrred deberán estar equipotencializados a través de la tierra de seguridad no aislada, mediante un conductor #8 tipo cable vehículo.

Se pueden observar más detalles en el plano anexo que incluye el diagrama unifilar de la microrred.

7.5 SELECCIÓN DE TABLEROS ELÉCTRICOS

Para la microrred se utilizarán tableros eléctricos y gabinetes para albergar protecciones y barras. La Tabla 42, incluye la descripción de los tableros y gabinetes utilizados. La ubicación tanto en detalle físico como dentro del diagrama unifilar de la microrred se encuentra en los planos anexos.

Tabla 42. Caracterización de los tableros eléctricos.

Tablero	Descripción	Tipo	Tensión [V]	Flujo	Sentido	Conductor		Protecciones de corriente	
TG-DC	Gabiente metálico de 1,20 * 60 cm. Incluye protecciones y barraje DC en platino de Cu de ¾" * 3/16" (180 A). Tres parejas de barras.	DC	48	B	In	#4	THW	Breaker (P-N)	32
				C	In	#2	USE-2	Breaker (P-N)	32
				D	Out	#2	THW	Breaker (P-N)	100
TD-AC	Tablero de distribución trifásico de 12 puestos (40 * 25 cm). Incluye protecciones.	AC	120	H	In	#8	THW	Breaker mono	40
				I	Out	#14	THW	Breaker mono	10
				J	Out	#14	THW	Breaker mono	8
TD-DC	Tablero de distribución DC de 12 puestos (40 * 25 cm). Incluye protecciones.	DC	24	K	In - Out	#4	THW	Breaker (P-N)	32

8. PROSPECTIVA DE LA MICRORRED

En este capítulo se presenta un análisis de la prospectiva de la microrred que incluye sus futuros usos, posibles aplicaciones, implementaciones y ampliaciones. Esta visión a futuro está estrechamente ligada a los objetivos de la implementación de la microrred presentados en el Capítulo 5, enfocados principalmente a fines investigativos, académicos y pedagógicos. También es necesario tener en cuenta las características y parámetros bajo los cuales se realizó el diseño ya que estos determinan las propiedades y limitantes del sistema.

La microrred en general permitirá la apropiación tecnológica de los elementos que la componen, así como el estudio individual de cada uno de estos, familiarizando a los miembros de la E3T con estas tecnologías y brindando un espacio único dentro de la universidad y el PTG para el estudio de este tipo de redes.

8.1 PROSPECTIVA DE LOS SISTEMAS DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA Y EÓLICA

El sistema de generación fotovoltaico puede ser objeto de un estudio detallado de potencial energético y eficiencia del que es posible determinar la rentabilidad de este tipo de sistemas en la implementación de proyectos en la región, así como la relación entre el beneficio económico y los perfiles de consumo.

Los paneles además pueden ser utilizados para modelar y evaluar nuevas propuestas de seguidores solares de bajo costo o nuevos modelos para la determinación del ángulo de inclinación que incluyan variables propias de la región.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la evaluación del recurso eólico disponible, no es favorable la instalación de aerogeneradores de mayor potencia debido a la baja velocidad de viento registrada en el PTG. Sin embargo, es

posible aumentar la cantidad de aerogeneradores de baja potencia y baja velocidad de arranque, así como realizar un estudio detallado de la ubicación óptima para la instalación de un pequeño parque eólico generador.

8.2 PROSPECTIVA DE LA UNIDAD FLEX POWER ONE

La unidad FLEX POWER ONE cumple la función de inversor, regulador de carga y además permite la conexión del generador diesel. Teniendo en cuenta las características requeridas para el proyecto (niveles de tensión, inversor grid-off, entre otras) se seleccionó la referencia adecuada que cumpliera con éstas. Sin embargo, la potencia nominal del equipo seleccionado es mucho mayor al valor requerido de acuerdo al cálculo del flujo de potencia. Teniendo en cuenta esto, se llevó a cabo el dimensionamiento de las instalaciones eléctricas previendo futuras expansiones tanto de la generación como de la carga. Esta metodología de diseño permite flexibilidad en la microrred, la cual cuenta con las características adecuadas para mantener su correcto funcionamiento en caso de la inclusión de otros tipos de generación o del aumento de los ya existentes.

8.3 PROSPECTIVA DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CARGA

El equipo de transferencia de carga es el encargado de determinar, a partir de las características de las ondas de generación, si las cargas deben alimentarse mediante la potencia generada por las fuentes distribuidas o por la red de servicio público. Esta transferencia debe poder realizarse de manera asíncrona teniendo en cuenta que los sistemas trifásicos no necesariamente estarán sincronizados entre ellos, a pesar de que cuenten con igual magnitud, frecuencia y secuencia.

Esta función, de conexión y desconexión puede ser programada y automática o manual, sin embargo las necesidades de la microrred motivan el desarrollo de un

sistema de control remoto mediante el cual el usuario pueda conocer toda la información de las variables eléctricas, seleccionar una transferencia y sobre todo almacenar información valiosa para la generación de modelos de perfiles de consumo, en busca del aumento de la eficiencia en la distribución y consumo de la energía disponible.

Es importante aprovechar al máximo las diferentes funciones y modos de operación del STS. Dentro de los modos básicos de operación se encuentran el modo de transferencia síncrono y asíncrono. Para el modo de transferencia asíncrono, se puede hacer usos de funciones como In Flight, la cual permite programar la transferencia de la fuente para cuando el desfase es mínimo de forma tal que la carga no perciba el cambio de señal de entrada. Esta modalidad permitiría el estudio de comportamiento de diferentes equipos electrónicos ante la presencia del cambio de fuentes de alimentación no síncronas y donde el cambio de fuente puede introducir un transitorio leve en la red.

Otra función de gran importancia que permitiría estudiar el comportamiento de la carga ante un cambio de fuente, se encuentra al operar el STS en modo de limitación de corriente transitoria. En este modo, el STS realiza la transferencia de la fuente de tal forma que limita la corriente transitoria que se podría presentar en la carga.

Los equipos seleccionados cuentan con diferentes protocolos de comunicación (RS232 ó RS485). Estos pueden ser utilizados para desarrollar dicho sistema de control y adquisición de información de manera remota y en tiempo real. Además de esto, es posible adherir al control la medición de variables meteorológicas para determinar la relación de éstas con las variables eléctricas.

Otro estudio importante para la caracterización del comportamiento de la microrred que puede desarrollarse, está relacionado con la adquisición o generación de un sistema simulador de red eléctrica. Este sistema, permitiría simular en tensión y corriente fallas, armónicos, huecos y muchos otros fenómenos eléctricos que

permitirían la evaluación de las respuestas del sistema de transferencia de carga y de la microrred como tal.

8.4 PROSPECTIVA DE LAS CARGAS

Las cargas juegan un papel importante en los estudios y análisis que se pueden hacer alrededor del funcionamiento de la microrred. A partir de su variación es posible analizar el comportamiento de la red ante diferentes escenarios y perfiles de consumo.

La microrred puede ser el marco bajo el cual se diseñen sistemas de control para diferentes tipos de cargas, y se evalúen propuestas que apunten al uso racional de la energía URE.

La metodología que se utilizó para determinar el valor de cargas nominales que se recomienda instalar, tuvo en cuenta varios factores de seguridad evitando el sobredimensionamiento de las cargas con respecto a la generación esperada. Sin embargo, y como se explicó con detalle en el Capítulo 5, estás pueden aumentarse sin que esto afecte el funcionamiento de los equipos de la microrred. La evaluación del porcentaje máximo hasta donde es posible el aumento de las cargas por determinados periodos de tiempo y cuáles son los perfiles y horas adecuados para obtener el mayor aprovechamiento de las fuentes de generación, puede obtenerse a partir de un estudio detallado de la microrred.

Por otro lado, en el presente proyecto se propuso una metodología de dimensionamiento de cargas, teniendo en cuenta las características propias del diseño. Sin embargo, una vez instalada la microrred y con la información obtenida de varios de los estudios propuestos en esta sección, es posible elaborar una metodología que permita dimensionar cargas de manera más eficiente permitiendo el ahorro de energía e inversión.

8.5 PROSPECTIVA DE IMPACTO REGIONAL

Las microrredes además de ser una solución a la excesiva contaminación causada por la generación de energía tradicional, pueden ser elementos claves en proyectos que busquen equidad social y mejora de la calidad de vida de las poblaciones.

Éstas pueden ser una solución para expandir el servicio de energía eléctrica a las poblaciones que no lo tiene, o aquellas en las que es bastante deficiente por la frecuencia y duración de las interrupciones, por lo que las fuentes de energía renovable podrían servir como sistema de respaldo. En ambos caso, este servicio permitiría el desarrollo de las regiones y el aumento de la calidad de vida.

A pesar de que este tipo de proyectos requieren inversiones elevadas, la evaluación de rentabilidad podría demostrar que el acceso a energía de bajo costo administrada a través de programas de URE y gestión energética, resulta más viable que la construcción de líneas de transmisión para realizar interconexiones.

Para esto, es necesario que exista personal calificado en el tema, con conocimientos que le permitan realizar este tipo de diseño y estudios. En este caso, la microrred representa un espacio importante de aprendizaje en un tema que abre la posibilidad a mediano plazo de contar con este tipo de profesionales, y a largo plazo y en un escenario nacional más favorable, en el desarrollo de tecnologías relacionadas.

9. RECOMENDACIONES TÉCNICAS

Las recomendaciones presentadas en este capítulo hacen parte del análisis del diseño, futuros cambios de estructura, operación de la microrred y conclusiones obtenidas en el desarrollo de esta tesis. Muchas de estas recomendaciones hacen referencia al correcto uso, manejo, montaje e instalación de los equipos; como también algunas exigencias por parte de la Universidad Industrial de Santander a través de la Vicerrectoria de Investigación y Extensión para garantizar un proceso exitoso en la compra e instalación de los equipos en el Laboratorio de Integración Energética del PTG.

9.1 RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN, MANEJO Y ARRANQUE DE EQUIPOS

1. Todas las instalaciones, montaje y arranque de los equipos deberán ser realizadas por personal altamente calificado y deberán cumplir con los literales correspondientes de la NTC, dependiendo del tipo de instalación. Bajo ninguna circunstancia se deberá permitir el desarme de los equipos. Los equipos deberán venir probados y calibrados de fábrica.

2. La instalación de los equipos debe hacerse de forma vertical descendente. Es decir, se debe iniciar el montaje y operación de los sistemas de generación, y una vez finalizado la instalación y arranque de estos sistemas, continuar con la conexión de los siguientes equipos que conforman la microrred. De esta forma, si se detecta una falla en la operación vertical de la microrred no se deberán exponer los equipos subsecuentes a dicha falla.

3. La empresa distribuidora de los paneles solares debe suministrar las estructuras de soporte para los paneles solares. Las estructuras deberán ser capaces de tolerar las dilataciones térmicas por calentamiento de los

paneles y por las condiciones meteorológicas. Además, se debe garantizar que las estructuras de soporte no conduzcan cargas eléctricas que puedan afectar el funcionamiento de los módulos. Estas estructuras deben permitir el ajuste del ángulo de inclinación. Los tornillos utilizados deberán ser de acero inoxidable.

4. La instalación de los paneles solares debe cumplir los lineamientos especificados en la sección 690 de la NTC. Deben rotularse los elementos de este sistema de acuerdo a lo especificado en la sección 690 F: “690-51. Los módulos fotovoltaicos deben estar rotulados con la identificación de la polaridad de los cables o terminales, la corriente nominal máxima del dispositivo de protección del módulo contra sobre-corriente y los siguientes valores nominales: 1) tensión de circuito abierto 2) tensión de operación 3) tensión máxima admisible del sistema, 4) corriente de operación 5) corriente de corto circuito y 6) potencia máxima.”

5. Los fabricantes deberán informar sobre el tiempo de garantía de los equipos, y la empresa encargada de su realización. Además, se deberá informar las condiciones por las cuales la garantía no cubriría la reparación de los equipos.

9.2 RECOMENDACIONES ESPECIALES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA

Debido a que los equipos que conforman la microrred deben operar altos valores de tensión y corriente, sus componentes internos aumentan de temperatura por la disipación de potencia. Este aumento de temperatura interna de los equipo tiene como consecuencia un aumento progresivo de la temperatura ambiente, lo que puede ocasionar que alguno de los equipos falle en su operación. Los fabricantes de cada equipo proporcionan el rango de temperatura en que cada equipo opera

de forma normal y segura. Así, las condiciones internas del laboratorio deben mantenerse bajo este rango de temperatura mediante sistemas de refrigeración.

Además de la temperatura en las instalaciones del laboratorio, otro parámetro de suma importancia que afecta el rendimiento y operación de los equipos corresponde a la humedad relativa. En la Tabla 43, se presentan los rangos de temperatura y humedad que el fabricante considera seguro para el correcto funcionamiento del equipo. De los valores proporcionados por el fabricante, se recomienda que la temperatura interna del laboratorio debe mantenerse alrededor de los 25 [°C], con el fin que todos los equipos operen de forma segura. Debido a que la humedad relativa de la ubicación del PTG es de 53.59 %, no es necesario modificar las condiciones de humedad dentro de las instalaciones del laboratorio debido a que cumple con las especificaciones proporcionadas por los fabricantes. Es importante resaltar que este valor de humedad corresponde al promedio para los días que se realizaron medidas de las condiciones meteorológicas en el PTG.

Tabla 43. Rangos de temperatura y humedad relativa de los equipos.

Equipo	Temperatura	Humedad relativa (sin condensación)
Regulador	0 -50 [°C]	20 – 90 %
Transformador de Corriente	25 - 60 [°C]	<95 %
Sistema de Transferencia de Potencia	< 40 [°C]	0 – 90 %
Baterías	[°C]	No especifica
Medidor AC	-5 – 60 [°C]	5 – 95 %
Medidor DC	-10 – 55 [°C]	< 93 %
Unidad Flex Power ONE	25 [°C]	No especifica

9.3 RECOMENDACIONES DE INSTALACIÓN DE CABLEADO, CANALETAS Y REDES DE COMUNICACIÓN

1. Todos los cables utilizados serán unipolares y de material de cobre, con aislamiento de PVC. La longitud de los cables será tal que no se generen esfuerzos entre los diversos elementos. El cable utilizado para la conexión de los paneles deber ser tipo USE - 2 y debe estar protegido de la intemperie mediante ductos EMT de calibre 1 ½" en las zonas expuestas. La superficie interior de los tubos no deberá presentar en ningún punto aristas, asperezas o fisuras susceptibles de dañar los conductores.

2. Se deberá suministrar un gabinete metálico equipotencializado a la tierra de seguridad no aislada del edifico, a través de un conductor tipo cable vehículo de calibre mínimo #8. Este gabinete, denominado TG-DC (tablero general en DC) reúne las conexiones de la generación en DC a través de 3 pares de barrajes en platino de Cu de ¾" * 3/16" (180 [A]) además de albergar las protecciones correspondientes a los tramos conectados detalladas en el plano unifilar anexo al documento. Este armario debe cumplir los lineamientos de la NTC 2050 y el RETIE que rigen para este tipo de elementos.

3. Las conexiones y cableado del TG-DC hacia el regulador de carga e inversor, se deben realizar por medio de bandejas portacables (para más detalle, revisar los planos anexos al documento). Su instalación debe cumplir los lineamientos de la NTC 2050 y el RETIE que rigen a este tipo de elementos.

4. El inversor se debe instalar de forma vertical en las instalaciones del laboratorio, fijado en la pared. Los cables eléctricos del inversor deben estar

fijados a la pared. Se debe garantizar evitar cualquier tipo de contacto con las zonas internas que podrían causar averías.

5. Los tableros de distribución de DC y AC, deben ser mínimo de 12 puestos y deben albergar las protecciones definidas en el documento y detalladas en el diagrama unifilar de los planos anexos. Debe estar equipotencializado a la tierra de seguridad no aislada del edifico, a través de un conductor tipo cable vehículo de calibre mínimo #8. Tanto el tablero como el cableado deben cumplir los lineamientos de la NTC 2050 y el RETIE que rigen a este tipo de elementos.

10. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

A continuación se presenta el presupuesto del diseño.

Tabla 44. Presupuesto del proyecto.

FORMULARIO DE CANTIDADES Y PRECIOS DE EQUIPOS							
OBRA	**DOTACIÓN DE EQUIPOS PARA EL LABORATORIO 308 - EDIFICIO DE INVESTIGACIONES EN LA SEDE UIS GUATIGUARÁ**					**CANTIDAD A CONTRATAR**	
NÚMERO	**DESCRIPCIÓN**	**VALOR DEL DISTRIBUIDOR**	**MONEDA**	**TASA DE CAMBIO**	**VALOR UNITARIO (COL$)**	**CANT**	**SUBTOTAL**
	EQUIPOS DE GENERACIÓN DE ENERGIA						
001-1	Panel Solar SOLAR WORLD SW 225 POLY	$ 589	€	$ 2.320	$ 1.366.521	9	$ 12.298.691
002-1	Aerogenerador WIND ARROW 1000	$ 3.100	USD	$ 1.776	$ 5.506.189	3	$ 16.518.567
003-1	Generador Diesel 6 KVA / 4.8 KW	$ 3.000.000	$	$ 1	$ 3.000.000	1	$ 3.000.000
	Subtotal						**$ 31.817.258**
	EQUIPOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGIA						
004-1	Almacenadores Rolls SerieS5000 Modelo BS5000-B1015-03	$ 1.288	€	$ 2.320	$ 2.988.993	12	$ 35.867.911
	Subtotal						**$ 35.867.911**
	EQUIPOS DE CONVERSIÓN DE ENERGIA Y CONTROLADORES DE TENSIÓN						
005-1	Inversor/Regulador Unidad FLEX POWER ONE FP1-2	$ 4.076	USD	$ 1.776	$ 7.239.750	3	$ 21.719.251
006-1	Controlador Solar Morningstar Tristar-45	$ 130	USD	$ 1.776	$ 230.905	3	$ 692.714
007-1	Rectificador HRP-600-24	$ 155	USD	$ 1.776	$ 276.038	3	$ 828.113
	Subtotal						**$ 23.240.078**
	EQUIPOS DE TRANSFERENCIA DE POTENCIA						
008-1	Sistema Estático de Transferencia STATYS-100	$ 14.883	USD	$ 1.776	$ 26.435.036	1	$ 26.435.036
	Subtotal						**$ 26.435.036**
	EQUIPOS DE MEDICIÓN						
009-1	Medidor de DC PZ300-DE	$ 1.250.000	$	$ 1	$ 1.250.000	12	$ 15.000.000
010-1	Medidor de AC PowerLogic PM710.	$ 450	USD	$ 1.776	$ 798.611	3	$ 2.395.832
011-1	Transformador de corriente PowerLogic CT TI 100/5	$ 160	USD	$ 1.776	$ 284.190	3	$ 852.571

	Subtotal						**$ 18.248.403**
	TABLEROS Y GABINETES						
012-1	Gabinete metálico 120 cm * 60 cm	$ 600.000	$	$ 1	$ 600.000	1	$ 600.000
013-1	Tablero de distribucióin de 12 puestos tipo mini pragma	$ 60.000	$	$ 1	$ 60.000	2	$ 120.000
014-1	Barraje DC en platino de Cobre electrolitico de 3/4" * 3/16" (180 A)	$ 120.000	$	$ 1	$ 120.000	2	$ 240.000
015-1	Gabinete tipo rack abierto 42 u	$ 1.250.000	$	$ 1	$ 1.250.000	1	$ 1.250.000
	Subtotal						**$ 2.210.000**
	EQUIPOS DE PROTECCIÓN						
016-1	Breaker (P-N) DC ABB S802PV-S32	$ 280.000	$	$ 1	$ 280.000	24	$ 6.720.000
017-1	Breaker (P-N) DC ABB S802PV-S100	$ 1.100.000	$	$ 1	$ 1.100.000	12	$ 13.200.000
018-1	Breaker mono ABB S201-C8	$ 40.000	$	$ 1	$ 40.000	3	$ 120.000
019-1	Breaker mono ABB S201-C10	$ 45.000	$	$ 1	$ 45.000	3	$ 135.000
020-1	Breaker mono ABB S201-C40	$ 300.000	$	$ 1	$ 300.000	9	$ 2.700.000
021-1	Fusible OUZ PV14 40A Gg	$ 60.000	$	$ 1	$ 60.000	6	$ 360.000
022-1	Diodo de bloqueo 32 A	$ 45.000	$	$ 1	$ 45.000	9	$ 405.000
023-1	Totalizador trifásico de 40 A	$ 80.000	$	$ 1	$ 80.000	1	$ 80.000
024-1	DPS Categoría C 80kA	$ 850.000	$	$ 1	$ 850.000	1	$ 850.000
	Subtotal						**$ 24.570.000**
	CONDUCTORES					**METROS**	
025-1	Conductor USE - 2 #8 AWG	$ 1.600	$	$ 1	$ 1.600	210	$ 336.000
026-1	Conductor USE - 2 #2 AWG	$ 8.500	$	$ 1	$ 8.500	390	$ 3.315.000
027-1	Conductor THW # 14 AWG	$ 800	$	$ 1	$ 800	40	$ 32.000
028-1	Conductor THW #8 AWG	$ 2.300	$	$ 1	$ 2.300	40	$ 92.000
029-1	Conductor THW #4 AWG	$ 6.200	$	$ 1	$ 6.200	70	$ 434.000
030-1	Conductor THW #2 AWG	$ 8.000	$	$ 1	$ 8.000	80	$ 640.000
031-1	Conductor #8 tipo cable vehiculo	$ 3.080	$	$ 1	$ 3.080	60	$ 184.800
032-1	Conductor #6 tipo cable vehiculo	$ 4.750	$	$ 1	$ 4.750	60	$ 285.000
	Subtotal						**$ 5.318.800**
	DUCTOS Y BANDEJAS					**METROS**	
033-1	Ducto EMT 1"	$ 4.950	$	$ 1	$ 4.950	15	$ 74.250
034-1	Ducto EMT 1 1/2"	$ 7.346	$	$ 1	$ 7.346	25	$ 183.650
035-1	Ducto porta cable tipo malla de 40 cms * 5,4 cms	$ 40.000	$	$ 1	$ 40.000	20	$ 800.000
	Subtotal						**$ 1.057.900**

	COSTO DIRECTO						**$ 168.765.386**
	IVA 16%						**$ 27.002.462**
	TOTAL						**$ 195.767.848**

CONCLUSIONES

La evaluación del recurso solar disponible llevada a cabo en el PTG permitió determinar que la zona donde se ubica la sede de la UIS en Guatiguará tiene un potencial medio para la instalación de generación fotovoltaica. La zona no se caracteriza por estar expuesta diariamente a periodos largos de grandes valores de irradiancia. El valor promedio de HSP registrado fue de 4,29 con una desviación estándar de 0,77. Sin embargo, de acuerdo al registro histórico obtenido en la estación meteorológica de la CDMB ubicada en la PTAR de Río Frío, la variación anual de valores promedio mensuales de HSP es relativamente baja, por lo que, a diferencia de otras regiones del mundo en las que ocurren anualmente cambios climáticos considerables a causa de las estaciones, los proyectos en la zona podrían contar con una generación moderadamente estable.

La evaluación del recurso eólico disponible llevada a cabo en el PTG permitió determinar que la zona donde se ubica la sede de la UIS en Guatiguará tiene un potencial bajo para la instalación de generación eólica. El promedio de velocidad en sitio es cercano a 1 [m/s]. El 23,44% de horas totales al año el viento toma la dirección SO. De estas, el 44,32% de las horas la velocidad del viento supera un valor de 0,5 [m/s] y el 16,25% un valor de 4 [m/s]. A pesar de que se pueden recibir ráfagas de viento de alto potencial energético, estas tiene una frecuencia anual baja. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se seleccionaron para la microrred, generadores de baja potencia nominal y bajo valor de velocidad de arranque, buscando el máximo aprovechamiento de este tipo de energía.

La revisión técnica de los paneles solares y los aerogeneradores disponibles en el mercado, una vez definidas las características del diseño, permitió realizar un análisis basado en costos y especificaciones técnicas con el fin de seleccionar aquellos modelos que mejor se adecuaban a los requerimientos del proyecto. La

selección de los equipos y componentes que hacen parte de los sistemas solar fotovoltaico y eólico se basó en aspectos económicos y técnicos, debido a que estos son los equipos de mayor importancia en la microrred. No obstante, para equipos de menor tamaño y con especificaciones más estrictas en operación, la selección se hizo en base a las características que proporciona cada uno de los fabricantes, y no en un análisis basado en los aspectos económicos de los modelos de los diferentes proveedores.

El dimensionamiento de los acumuladores o baterías, permite que el sistema que proporciona energía a la carga, tenga autonomía de operación para cuatro días asumiendo un consumo estándar establecido en el diseño. Esta autonomía permite al sistema operar sin depender totalmente de la energía proveniente de la red pública siempre que las condiciones climáticas permitan la generación y acumulación de la energía proveniente de los sistemas solar fotovoltaico y eólico.

Las características de diseño específicas de la microrred y la importancia del sistema de transferencia de carga (STS) para garantizar el funcionamiento adecuado ante diferentes escenarios de carga y la integrabilidad del sistema y cada uno de sus elementos, requirieron una selección y especificación estricta del equipo. Además de las características del STS en operación, son de gran importancia las funciones de programación de la transferencia de la fuente mediante un microprocesador que determina según las características de tensión, fase y frecuencia de las fuentes, el momento en que debe transferirse la carga de la fuente prioritaria (en este caso la generación propia de la microrred) a la fuente secundaria (red de servicio público) y el retorno, permitiendo la mejor característica para proporcionar a la carga la potencia constante que requiere.

El modo de operación del STS, permite realizar la transferencia de carga entre fuentes, en caso de que alguna de las variables medidas por el equipo salga de los rangos especificados o existan perturbaciones en los sistemas de generación o en la red de servicio público. Sin embargo, esta transferencia podría no depender exclusivamente de estos parámetros, sino también de aquellos como el costo de la energía o las condiciones climáticas que relacionados con los valores de carga, pueden crear escenarios diversos de operación del sistema buscando la mejora de su eficiencia. Esta posibilidad abre las puertas al desarrollo de un software de control que permita la monitorización de variables no solo eléctricas, sino climáticas y económicas, y que mediante el modelado de estás, realice convenientemente la transferencia de las cargas.

La formación profesional recibida en los programas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica permitió la aplicación de los conceptos aprendidos para la realización del proyecto. Temas cubiertos en las asignaturas como electrónica de potencia, comunicaciones, energías renovables e instalaciones eléctricas, se aplicaron en el diseño que cuenta además con valores agregados como una completa revisión bibliográfica, evaluaciones de recursos en el Parque tecnológico de Guatiguará, estudio de prospectiva y el presupuesto general. Para la realización del proyecto se requirió además el concepto técnico de ingenieros civiles, industriales, estudiantes de maestría y de doctorado.

BIBLIOGRAFÍA

[1] AGUADO, Mónica. RIVAS, David Miguel. Microrredes eléctricas en Navarra. Centro Nacional de energías renovables CENER.

[2] ALCALDIA DE PIEDECUESTA: www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co [Consultada en Marzo de 2012].

[3] ALFONSO, Jose A., Energías Renovables magazine, “Microrredes, una alternativa micro para un mundo cada vez más macro.”, 2009, España.

[4] ANDALUCIA. Energías Renovables. http://www.renovables-andalucia.com (Revisado en Abril del 2012).

[5] CASTAÑER, Luis. SILVESTRE, Santiago. Modelling photovoltaic systems using PSpice. Universidad Politécnica de Cataluña (Barcelona, España) Wiley. Inglaterra. 2002.

[6] CENTELSA. Catalogo cables para baja tensión. Tomado de: http://www.centelsa.com.co/ (Revisado en Marzo del 2012) .

[7] COMPONENTES DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA. Disponible en: http://www.mcgraw-hill.es/bcv/guide/capitulo/8448171691.pdf

[8] CUESTA, Maria. PERÉZ, Marta. CABRERA, Juan. Aerogeneradores de potencia inferior a 100 [kW]. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, CIEMAT. Prospectiva y vigilancia tecnológica. Madrid, España, 2008.

[9] DAVIS NET: www.davisnet.com [Consultada en Marzo del 2012].

[10] ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. El ABC de las instalaciones eléctricas en sistemas eólicos y fotovoltaicos. Primera edición. Editorial Limusa.

[11] FAO, Estudio de riego y drenaje. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Pág 59

[12] GENERADORES DIESEL: www.generador-diesel.es (Consultado en marzo de 2012)

[13] GRUPO SOCOMEC, Interruptores industriales, Sistemas de Transferencia Estatica y SAI's. Data sheet: STS STATYS.

[14] INFOPOWER MAGAZINE. "Microrred para el desarrollo y demostración de tecnologías de generación distribuidas". LABEIN, Julio 2006. España.

[15] LA CAL, José A. La energía eólica en Sierra Mágina. Sumutan N° 23. 2006. Pág. 127-151.

[16] LAZAR, Reinhold. EDERm Josef. Estudio sobre el clima urbano de Bucaramanga. Convenio de cooperación entre el municipio de Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander y Karl Franzens-Universitaet. Bucaramanga. 2001.

[17] MÉNDEZ, Javier María. Cuervo, Rafael, Energía solar fotovoltaica 2ª edición. ECA Instituto de tecnología y formación S.A.U. Madrid, España: Fundación Confemetal. ISBN-13: 978-84-96743-29-8.

[18] OSMA PINTO, Germán Alfonso. Uso racional de la energía a partir del diseño de aplicaciones sostenibles en el edificio eléctrica II de la Universidad Industrial de Santander. Trabajo de investigación para optar por el título de Magister en Ingeniería Eléctrica. Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. 2011. Director: Ph.D. Gabriel Ordónez Plata.

[19] OUT BACK POWER. Catálogo FLEXPOWER ONE.

[20] OUT BACK POWER, CATALOGO INVERSORES. http://www.outbackpower.com/products/sinewave_inverter/off_grid/ (Revisado en marzo del 2012)

[21] OUTBACK POWER, CATALOGO CONTROLADORES. http://www.outbackpower.com/products/charge_controllers/flexmax/ (Revisado en marzo del 2012)

[22] PERALES BENITO, Tomás. Guía del instalador de energía renovables. Energía fotovoltaica, energía térmica, energía eólica y climatización. Creaciones copyright. España, 2005.

[23] PINILLA, Álvaro. Manual de aplicación de la Energía Eólica. Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas. INEA. 2008.

[24] PROCABLES. Descripción del cobre usado por la empresa PROCABLES. Tomado de: http://procables.com.co/index.php?option=com_content&view=article&id=223&Itemid=157&lang=es (Revisado en Marzo del 2012)

[25] RETIE, Reglamento técnico de instalaciones eléctricas. Cuarta Edición. Agosto de 2008. Ministerio de minas y energía.

[26] SARMIENTO SERA, Antonio. La hora solar pico. Sitio web: http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia22/HTML/articulo03.htm

[27] VELÁZQUEZ SANCHEZ, Raúl. SARMIENTO URUCHURTU, Héctor G. SILVA FARÍAS José L.VIDRIO LÓPEZ, Gilberto. NIEVA GÓMEZ, Rolando. “Introducción al concepto de microrredes”. Boletín Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE): Tendencias tecnológicas, Julio – Septiembre 2010, México.

[28] VERA, Juan. Diseño de una instalación fotovoltaica de 10 kWp conectada a la red de baja tensión. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. Escuela politécnica superior. Noviembre de 2009.

[29] WIZELIUS, Tore. Developing wind power projects. Theory and practice. Earthscan. 2007. United Kingdom.

[30] ZOHRA, F. HOUARI, M. ZEGRAR, M. TARIK, M. BOUDGHENE, A. MIDOUNI, A. A proposed method to increase output efficiency of a photovoltaic system. Acta Polytechinca Hungarica. Vol.7, N^{o}2, 2010. Págs. 55-70.

ANEXOS

ANEXO A.

Planos adjuntos (Diagrama unifilar y plano de detalle de la pared occidente)