



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

### PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO.

#### AUTORES:

SALAZAR CÁRDENAS LIZBETH ALEXANDRA  
VACA MORÁN MIGUEL ÁNGEL

TEMA: DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MONITOREO DE UNA  
MICROCENTRAL ELÉCTRICA EÓLICA-FOTOVOLTAICA, PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS

DIRECTOR: ING. ALBERTO ALBUJA

CODIRECTOR: ING. NICOLÁS PÁEZ

SANGOLQUÍ, OCTUBRE 2014

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE**  
**CARRERA DE INGENIERIA MECATRONICA**

**CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MONITOREO DE UNA MICROCENTRAL ELÉCTRICA EÓLICA-FOTOVOLTAICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS” fue realizado en totalidad por Lizbeth Alexandra Salazar Cárdenas y Miguel Ángel Vaca Morán, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.

---

**Ing. Alberto Albuja**

**DIRECTOR**

---

**Ing. Nicolás Páez**

**CODIRECTOR**

Sngolquí, octubre del 2014

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

“DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MONITOREO DE UNA MICROCENTRAL ELÉCTRICA EÓLICA-FOTOVOLTAICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS”

ELABORADO POR:

---

Lizbeth Alexandra Salazar Cárdenas

---

Miguel Ángel Vaca Morán

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

---

Ing. Francisco Terneus  
**Director de la Carrera de Ingeniería Mecatrónica**

## CARRERA DE INGENIRÍA MECATRÓNICA

### AUTORIZACIÓN

Nosotros: Salazar Cárdenas Lizbeth Alexandra y Vaca Morán Miguel Ángel

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado **“DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y MONITOREO DE UNA MICROCENTRAL ELÉCTRICA EÓLICA-FOTOVOLTAICA, PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS”** Cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad.

---

Lizbeth Alexandra Salazar Cárdenas

---

Miguel Ángel Vaca Morán

Sangolquí, 02 de octubre 2014

## **DEDICATORIA**

Primeramente dedico este proyecto a Dios que me ha permitido alcanzar esta meta, por la salud y la vida. A mis padres Sergio y Yoly, que me han brindado su amor y su apoyo incondicional, por su cariño y el ejemplo que me han dado durante toda mi vida. A mi hermano David por apoyarme siempre que necesito su ayuda y a mi novio Angelo por confiar y creer siempre en mí, dándome ánimos para seguir adelante.

**Lizbeth Alexandra Salazar Cárdenas**

## **DEDICATORIA**

Dedicado a Dios consejero amoroso y ejemplo de amor incondicional quien con su sabiduría y protección ha guiado mi camino permitiéndome alcanzar este logro en mi vida.

A mis padres Fernando y Myrian quienes con su ejemplo de vida, corrección y amor me han educado, cuidado y amado en toda circunstancia impulsándome a seguir adelante y nunca detenerme en la lucha por mis sueños.

A mi padre por su deseo inagotable de seguir adelante e imponerse nuevas metas día a día, mostrando que la edad nunca será un impedimento para soñar y conquistar.

A mi madre por su amor infinito hacia nuestra familia buscando que nadie se quede atrás y teniéndonos a todos presentes en su corazón.

A mi hermano Franklin por su tranquilidad, y consejo para afrontar las mayores dificultades mostrándome que no existe ninguna barrera que no pueda ser vencida.

A mi hermano David por su locura y respaldo, quien siempre me ha enseñado que no existe una vida completa sino se disfruta sus etapas una por una.

A mis dos hermanos en su conjunto por la alegría que siento en mi corazón cada vez podemos estar juntos para pelear, reír y ser una familia.

A mis cuñadas Adriana y Kirsten por su perseverancia en su vida diaria que les permite seguir luchando y por su cariño que nunca me ha faltado siendo al día de hoy mis hermanas muy queridas.

A mi enamorada Cindy por el amor y respeto que siempre me ha demostrado, siendo día a día una maravillosa mujer, amiga y compañera que deseo conservar en mi vida.

**Miguel Angel Vaca Morán**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios quien me ha dado la fortaleza y la vida, a mis padres, a mi hermano y a todos mis familiares, a quienes quiero mucho y siempre han estado a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos.

Agradezco a mi novio, amigos y compañeros con los que he compartido inolvidables momentos durante mi vida universitaria.

A mi amigo y compañero de tesis Miguel por todo lo que hemos compartido hasta alcanzar nuestra meta y a nuestros directores, Ing. Alberto Albuja e Ing, Nicolás Páez quienes nos guiaron en el desarrollo del presente proyecto.

**Lizbeth Alexandra Salazar Cárdenas**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios sobre todas las cosas por la salud y la fortaleza que me ha dado para afrontar todo contratiempo.

Agradezco a mis padres por su apoyo espiritual y material inagotable siendo los principales inversionistas de este proyecto.

Agradezco a mis hermanos y cuñadas por su apoyo y consejo en los momentos donde menos

Agradezco a mi enamorada por su paciencia y cariño en los momentos de dificultades a lo largo del proyecto.

Agradezco a mi compañera de tesis Lizbeth por todo lo compartido, su amistad, respaldo y paciencia.

Agradezco al Ing. Albuja y al Ing. Páez por su guía y por el conocimiento que nos han transmitido de manera abierta y generosa, siendo parte fundamental en el desarrollo de nuestra investigación.

Agradezco a mi gran familia por su preocupación y apoyo quienes siempre estuvieron pendientes del avance de la investigación.

Agradezco a mis amigos por su apoyo y colaboración quienes no dudaron en brindar una mano cuando se la necesitó.

**Miguel Angel Vaca Morán**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xix
ÍNDICE DE CUADROS.....	xx
RESUMEN .....	xxiv
SUMMARY .....	xxv
CAPITULO 1:.....	1
GENERALIDADES .....	1
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Alcance .....	3
1.3 Justificación e Importancia .....	3
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo General .....	5
1.4.2 Objetivos Específicos.....	5
CAPITULO 2.....	6
MARCO TEORICO.....	6
2.1 Energías Alternativas .....	6
2.1.1 Energía Solar.....	7
2.1.2 Energía eólica.....	7
2.1.3 Energía geotérmica .....	7

2.1.4 Energía mareomotriz.....	7
2.1.5 Energía hidráulica .....	8
2.2 Energía Solar.....	8
2.2.1 Energía Solar Fotovoltaica.....	10
2.2.2 Efecto Fotovoltaico .....	12
2.2.3 Paneles Solares.....	13
2.3 Energía Eólica .....	16
2.3.1 Ley de distribución de Weibull de la velocidad del viento.....	22
2.3.2 Cálculo de la potencia de un Aerogenerador .....	24
2.3.3 Tipos de Rotores .....	25
2.3.4 Etapa de Generación .....	28
2.4 Sistemas Híbridos .....	30
2.5 Equipos de Control .....	31
2.5.1 Regulador.....	31
2.5.2 Batería .....	32
2.5.3 Inversor .....	34
2.5.4 Sensores .....	35
2.5.5 Arduino .....	37
CAPITULO 3.....	38
DISEÑO MECATRONICO.....	38
3.1 Estudio Climatológico .....	38

3.1.1 Recurso Solar .....	39
3.1.2 Recurso Eólico .....	44
3.2 Definición de Carga .....	53
3.3 Módulo Fotovoltaico.....	54
3.3.1 Dimensionamiento y Selección del panel fotovoltaico.....	54
3.3.2 Análisis del módulo Fotovoltaico .....	60
3.4 Sistema Eólico .....	63
3.4.1 Selección del Generador Eólico.....	63
3.4.2 Análisis del Sistema de generación Eólico .....	68
3.5 Sistema de Distribución .....	81
3.5.1 Dimensionamiento y selección del regulador .....	81
3.5.2 Dimensionamiento y selección de batería.....	83
3.5.3 Dimensionamiento y selección del inversor .....	85
3.5.4 Cableado y conexión.....	87
3.5.5 Protecciones .....	89
3.6 Diseño del Sistema de Monitoreo .....	90
3.6.1 Análisis de las variables a monitorear.....	90
3.6.2 Sensores .....	92
3.6.3 Módulo de Control.....	96
3.6.4 Diseño de la interfaz gráfica .....	102
CAPITULO 4.....	116

IMPELEMENTACION .....	116
4.1 Montaje y cableado de componentes .....	116
4.1.1 Módulo Fotovoltaico.....	116
4.1.2 Módulo Eólico .....	118
4.1.3 Módulo de distribución .....	119
4.1.4 Módulo de Monitoreo .....	121
4.2 Conexión del sistema .....	125
4.3 Puesta en marcha de la Estación .....	125
CAPITULO 5.....	127
PRUEBAS Y RESULTADOS.....	127
5.1 Pruebas de sensores.....	127
5.1.1 Resultados .....	127
5.2 Pruebas de generación.....	131
5.2.1 Resultados .....	132
5.3 Pruebas de descarga .....	135
5.3.1 Descarga 1 .....	135
5.3.2 Descarga 2.....	136
5.4 Pruebas de carga.....	138
5.5 Pruebas de funcionamiento continuo .....	145
CAPITULO 6.....	148
ANALISIS ECONOMICO .....	148

6.1	Detalle de Inversión .....	148
6.2	Costo de generación de kWh .....	149
6.3	Implementación en Sistemas conectados a la red .....	154
6.3.1	Análisis de la energía diaria generada.....	154
6.3.2	Detalle de Inversión .....	156
6.3.3	Costo de generación .....	157
6.4	Implementación en aplicaciones rurales .....	161
6.4.1	Definición de la carga .....	161
6.4.2	Módulo Fotovoltaico.....	162
6.4.3	Módulo Eólico .....	164
6.4.4	Sistema de distribución .....	166
6.4.5	Sistema de monitoreo.....	169
6.4.6	Detalle de Inversión .....	170
6.4.7	Costo de generación kWh .....	171
6.5	Ventajas de la Instalación de una microcentral Eólica y Solar .....	175
	CONCLUSIONES .....	177
	RECOMENDACIONES .....	180
	BIBLIOGRAFÍA .....	181

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Base Princesa Isabel .....	1
Figura 1.2 Radiación Solar en el Ecuador.....	2
Figura 2.1 Consumo mundial de energía por fuentes .....	6
Figura 2.2 Radiación Solar .....	9
Figura 2.3 Tipos de radiación .....	9
Figura 2.4 Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	11
Figura 2.5 Elementos del sistema fotovoltaico .....	12
Figura 2.6 Efecto Fotovoltaico.....	13
Figura 2.7 Célula Fotovoltaica.....	13
Figura 2.8 Curvas Características .....	14
Figura 2.9 Hora solar pico .....	16
Figura 2.10 Influencia de obstáculos .....	19
Figura 2.11 Variación de la velocidad del viento con la altura.....	20
Figura 2.12 Curva de potencia de un aerogenerador .....	22
Figura 2.13 Función de Weibull para diferentes valores de k .....	23
Figura 2.14 Rotor Savonius .....	25
Figura 2.15 Funcionamiento del rotor Savonius.....	26
Figura 2.16 Rotor Darrieus .....	26
Figura 2.17 Rotor multipala .....	27
Figura 2.18 Rotor Tripala.....	28
Figura 2.19 Caja de engranajes del aerogenerador .....	29
Figura 2.20 Generador eléctrico.....	30
Figura 2.21 Sistema Híbrido Típico.....	31

Figura 2.22 Ciclo de vida de la batería .....	34
Figura 2.23 Circuito eléctrico del inversor .....	34
Figura 2.24 Piranómetro .....	35
Figura 2.25 Anemómetro .....	36
Figura 2.26 Veleta.....	37
Figura 2.27 Arduino.....	37
Figura 3.1 Radiación Solar en el mes de febrero .....	39
Figura 3.2 Radiación promedio semanas 1 y 2 (Feb. 2014) .....	41
Figura 3.3 Radiación promedio semana 3 y 4 (Feb. 2014).....	41
Figura 3.4 Radiación máxima semanas 1 y 2 (Feb. 2014).....	41
Figura 3.5 Radiación máxima Semanas 3 y 4 (Feb. 2014) .....	41
Figura 3.6 Radiación de días Significativos (Feb. 2014).....	43
Figura 3.7 Radiación Solar directa en Febrero de Atlas Solar.....	43
Figura 3.8 Velocidad promedio semanas 1 y 2 (Feb. 2014) .....	46
Figura 3.9 Velocidad promedio semanas 3 y 4 (Feb. 2014) .....	46
Figura 3.10 Velocidad máxima semanas 1 y 2 (Feb. 2014).....	46
Figura 3.11 Velocidad máxima semanas 3 y 4 (Feb. 2014).....	46
Figura 3.12 Promedios diarios de la velocidad del viento (Feb. 2014) .....	47
Figura 3.13 Velocidad promedio (Feb. 2014).....	49
Figura 3.14 Velocidad máxima (Feb. 2014) .....	49
Figura 3.15 Histograma de la velocidad del viento (Feb. 2014).....	49
Figura 3.16 Velocidad del viento anual en Pichincha.....	51
Figura 3.17 Leyenda Velocidades del viento.....	51
Figura 3.18 Velocidad media mensual del viento.....	52

Figura 3.19 Angulos Acimut y de Inclinación.....	55
Figura 3.20 Isofoton i110-12 .....	60
Figura 3.21 Circuito eléctrico de paneles fotovoltaicos.....	61
Figura 3.22 Variacion de curva I-V a 25 °C .....	61
Figura 3.23 Variación de la curva I-V a 1000 W/m <sup>2</sup> .....	61
Figura 3.24 Coeficiente de potencia de los principales rotores .....	64
Figura 3.25 Curva de potencia Gudcraft WG300 (Gudcraft, 2013) .....	66
Figura 3.26 Potencia de un Savonius .....	68
Figura 3.27 Aerogenerador Gudcraft WG300 .....	68
Figura 3.28 Coeficiente de potencia - Velocidad.....	69
Figura 3.29 Perfil aerodinámico de la pala .....	72
Figura 3.30 Fuerzas que actúan sobre la pala .....	73
Figura 3.31 Velocidades sobre la pala de un aerogenerador.....	74
Figura 3.32 Fuerzas que actúan sobre la pala del aerogenerador.....	75
Figura 3.33 NACA 4412.....	76
Figura 3.34 Perfil NACA 4412 Cx/ Cy – Cx/α.....	76
Figura 3.35 Fuerzas de arrastre y sustentación .....	77
Figura 3.36 Potencia útil y potencia disponible.....	78
Figura 3.37 Rendimiento del aerogenerador.....	79
Figura 3.38 Curva de carga de la batería Milleium 35 DC-115.....	85
Figura 3.39 Circuito de sensores de voltaje .....	94
Figura 3.40 Gráfica de trabajo del sensor ACS712 a 30 <sup>a</sup> .....	95
Figura 3.41 Gráfica de trabajo del sensor ACS712 a 20 A.....	95
Figura 3.42 Esquemático módulo RTC DS1307 .....	97

Figura 3.43 Módulo RTC DS1307.....	97
Figura 3.44 Esquemático módulo SD .....	98
Figura 3.45 Módulo SD .....	98
Figura 3.46 LCD 16x2 .....	99
Figura 3.47 Tarjeta de alimentación y conexiones .....	100
Figura 3.48 Algoritmo Arduino Parte 1 .....	101
Figura 3.49 Algoritmo Arduino Parte 2 .....	102
Figura 3.50 Ventana de Inicio.....	103
Figura 3.51 Pantalla de Adquisición de Datos .....	104
Figura 3.52 Algoritmo Adquisición de Datos.....	104
Figura 3.53 Pantalla Tiempo Real .....	105
Figura 3.54 Algoritmo Tiempo Real.....	105
Figura 3.55 Pantalla Gráficos en tiempo real.....	106
Figura 3.56 Algoritmo Gráficos en tiempo Real .....	106
Figura 3.57 Pantalla de Diario individual .....	107
Figura 3.58 Algoritmo de la pantalla diario individual.....	108
Figura 3.59 Pantalla Mensual individual .....	109
Figura 3.60 Algoritmo de la pantalla mensual individual.....	110
Figura 3.61 Pantalla anual individual .....	111
Figura 3.62 Pantalla anual individual .....	112
Figura 3.63 Pantalla diario comparativo .....	113
Figura 3.64 Algoritmo de la pantalla diario comparativo.....	113
Figura 3.65 Pantalla mensual comparativo .....	114
Figura 3.66 Algoritmo de la pantalla mensual comparativo.....	114

Figura 3.67 Pantalla anual comparativo.....	115
Figura 3.68 Algoritmo anual comparativo.....	115
Figura 4.1 Módulo fotovoltaico .....	116
Figura 4.2 Caja de conexión del terminal positivo .....	117
Figura 4.3 Caja de conexión del terminal negativo .....	117
Figura 4.4 Instalación del Aerogenerador.....	118
Figura 4.5 Almacenamiento de baterías.....	119
Figura 4.6 Proceso de montaje del módulo de distribución.....	121
Figura 4. 7 Soldadura de componentes .....	121
Figura 4.8 Placa de alimentación y conexiones .....	122
Figura 4.9 Ensamblaje de la caja de control .....	122
Figura 4.10 Conexión de componentes.....	123
Figura 4.11 Módulo de monitoreo .....	123
Figura 4.12 Piranómetro instalado .....	124
Figura 4.13 Anemómetro y veleta .....	124
Figura 4.14 Sensor de temperatura .....	124
Figura 4.15 Conexiones del módulo de distribución y monitoreo.....	125
Figura 5.1 Potencia Generada vs Potencia Disponible (Solar) .....	133
Figura 5.2 Potencia Generada vs Potencia Disponible (Eólica) .....	133
Figura 5.3 Rendimiento módulo Solar (13/06/2014).....	134
Figura 5.4 Temperatura (13/06/2014).....	134
Figura 5.5 Potencia consumo AC (09/06/2014) .....	136
Figura 5.6 Nivel de batería (09/06/2014).....	136
Figura 5.7 Potencia consumo AC (10/06/2014) .....	137

Figura 5.8 Nivel de batería (10/06/2014).....	138
Figura 5.9 Voltaje paneles (13/06/2014).....	139
Figura 5.10 Corriente paneles (13/06/2014) .....	140
Figura 5.11 Voltaje baterías (13/06/2014) .....	140
Figura 5.12 Corriente baterías (13/06/2014).....	140
Figura 5.13 Potencia generada solar (13/06/2014) .....	141
Figura 5.14 Voltaje paneles (26/06/2014) .....	143
Figura 5.15 Corriente paneles (26/06/2014) .....	143
Figura 5.16 Voltaje aerogenerador (26/06/2014).....	143
Figura 5.17 Corriente aerogenerador (26/06/2014) .....	144
Figura 5.18 Voltaje de las baterías (26/06/2014).....	144
Figura 5. 19 Corriente de las baterías (26/06/2014).....	144
Figura 5.20 Potencia generada total (26/06/2014).....	145
Figura 5.21 Energías día 1 .....	146
Figura 5.22 Energías día 2 .....	146
Figura 5.23 Energías día 3 .....	146
Figura 5.24 Energía disponible vs. Energía generada.....	147
Figura 5.25 Energía consumida AC vs Energía generada .....	147

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Escala de Beaufort .....	18
Tabla 3.1 Especificaciones Vantage-Pro .....	38
Tabla 3.2 Características técnicas de Paneles solares .....	58
Tabla 3.3 Parámetros de la matriz de criterios.....	59
Tabla 3.4 Características físicas del panel fotovoltaico.....	60
Tabla 3.5 Características eléctricas del módulo fotovoltaico .....	60
Tabla 3.6 Características técnicas del aerogenerador .....	65
Tabla 3.7 Variación de parámetros según el tipo de generador .....	70
Tabla 3.8 TSR y número de palas .....	71
Tabla 3.9 Características técnicas de Reguladores .....	81
Tabla 3.10 Características técnicas de las baterías .....	83
Tabla 3.11 Características técnicas Inversores .....	86
Tabla 3.12 Número AWG.....	88
Tabla 3.13 Características Anemómetro.....	92
Tabla 3.14 Características piranómetro y sensor de Temperatura.....	93
Tabla 6.1 Características técnicas Regulador Tristar-45 .....	167
Tabla 6.2 Características de la batería Ultracel.....	168
Tabla 6.3 Características técnicas Inversor Innotec 1300-24 .....	169

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1 Radiación Solar en el mes de febrero en Wh/m <sup>2</sup> /día.....	39
Cuadro 3.2 Radiación Solar por semanas en Wh/m <sup>2</sup> (Feb. 2014).....	40
Cuadro 3.3 Radiación solar por días significativos Radiación (Feb. 2014).....	42
Cuadro 3.4 Radiación Solar en el año en Wh/m <sup>2</sup> /día.....	44
Cuadro 3.5 Promedios y maximos semanales (m/s) (Feb. 2014).....	45
Cuadro 3.6 Promedios diarios de la velocidad del viento (m/s-Feb. 2014).....	47
Cuadro 3.7 Día mejor, día peor, día promedio (m/s-Feb. 2014).....	48
Cuadro 3.8 Frecuencias de la velocidad del viento (Feb. 2014).....	50
Cuadro 3.9 Variación de la velocidad.....	52
Cuadro 3.10 Equipos de oficina.....	53
Cuadro 3.11 Equipos para un minidepartamento.....	53
Cuadro 3.12 Equipos de conexión individual.....	54
Cuadro 3.13 Banco de pruebas.....	54
Cuadro 3.14 Cálculo de corriente necesaria en cada mes.....	57
Cuadro 3.15 Cálculo de número de paneles.....	59
Cuadro 3.16 Matriz de criterios para la selección del panel solar.....	59
Cuadro 3.17 Estimación de generación fotovoltaica anual.....	63
Cuadro 3.18 Matriz de criterios para la selección del aerogenerador.....	65
Cuadro 3.19 Cálculo del área del Savonius.....	67
Cuadro 3.20 Potencia media para el mes de Enero.....	80
Cuadro 3. 21 Estimación de generación eólica anual.....	80
Cuadro 3.22 Matriz de criterios para la selección del Regulador.....	82
Cuadro 3.23 Cálculo de Capacidad de batería.....	84

Cuadro 3. 24 Matriz de criterios para la selección de batería .....	84
Cuadro 3. 25 Matriz de criterios para la selección del inversor.....	86
Cuadro 3. 26 Secciones de cable y número AWG.....	89
Cuadro 3.27 Características Principales Sensores .....	96
Cuadro 5.1 Prueba de sensores antes de calibración parte 1.....	128
Cuadro 5.2 Prueba de sensores antes de calibración parte 2.....	129
Cuadro 5.3 Prueba de sensores calibrados parte 1 .....	130
Cuadro 5.4 Prueba de sensores calibrados parte 2 .....	131
Cuadro 5.5 Datos prueba de Generación .....	132
Cuadro 5.6 Resultados pruebas de generación .....	132
Cuadro 5.7 Resultados Descarga 1 .....	135
Cuadro 5.8 Resultados descarga 2 .....	137
Cuadro 5.9 Prueba de carga (Energía solar) .....	139
Cuadro 5.10 Prueba de carga (Energía eólica y solar).....	142
Cuadro 5.11 Resultados funcionamiento continuo. ....	145
Cuadro 6.1 Costo por módulos .....	148
Cuadro 6.2 Inversión inicial.....	149
Cuadro 6.3 Costos adicionales en 20 años.....	150
Cuadro 6.4 Costo total .....	150
Cuadro 6.5 Generación de la microcentral.....	150
Cuadro 6.6 Costos establecidos en la Regulacion 001-13 CONELEC.....	151
Cuadro 6.7 Inversión Inicial (Generación Fotovoltaica) .....	152
Cuadro 6.8 Costo total (Generación Fotovoltaica) .....	152
Cuadro 6.9 Inversión Inicial (Generación Eólica) .....	153

Cuadro 6.10 Costo total (Generación Eólica) .....	153
Cuadro 6.11 Costos de Generación KWh .....	154
Cuadro 6.12 Horas con mayor potencial eólico y solar y energía generada .....	155
Cuadro 6.13 Costo por módulos de Sistema conectado a la red .....	156
Cuadro 6.14 Inversión total Sistema conectado a la red .....	157
Cuadro 6.15 Generación anual Sistemas red (Energía Solar) .....	158
Cuadro 6.16 Generación anual Sistemas red (Energía Eólica) .....	158
Cuadro 6.17 Generación estimada en 20 años .....	159
Cuadro 6.18 Inversión inicial (Generación eólica) .....	159
Cuadro 6.19 Inversión total (Generación eólica) .....	160
Cuadro 6.20 Inversión inicial (Generación solar) .....	160
Cuadro 6.21 Inversión total (Generación solar) .....	161
Cuadro 6.22 Comparación del costo por kWh en sistemas red .....	161
Cuadro 6.23 Consumo de aplicación rural .....	162
Cuadro 6.24 Mes menos favorable para aplicación rural .....	163
Cuadro 6.25 Número de paneles en aplicación rural .....	163
Cuadro 6.26 Generación anual fotovoltaica estimada para aplicación rural .....	164
Cuadro 6.27 Energía diaria generada en la aplicación rural .....	165
Cuadro 6.28 Generación anual eólica estimada para aplicación rural .....	165
Cuadro 6.29 Cálculo de número de baterías aplicación rural .....	168
Cuadro 6.30 Costo por módulos de aplicación rural .....	170
Cuadro 6.31 Inversión inicial aplicación rural .....	171
Cuadro 6.32 Costos adicionales para aplicación rural .....	172
Cuadro 6.33 Costo total aplicación rural .....	172

Cuadro 6.34 Generación en la aplicación rural.....	172
Cuadro 6.35 Inversión Inicial (Generación Fotovoltaica) .....	173
Cuadro 6.36 Costo Total (Generación Fotovoltaica).....	174
Cuadro 6.37 Inversión inicial (Generación Eólica) .....	174
Cuadro 6.38 Costo total Generación Eólica.....	175
Cuadro 6.39 Costo kWh aplicación rural.....	175

## RESUMEN

Las energías renovables se han convertido en una de las principales áreas de estudio, que tiene como finalidad el eliminar la dependencia de los combustibles fósiles, cuya explotación se encuentra agravando la salud del planeta y por ende las condiciones de vida de quienes lo habitamos. En determinados sectores de nuestro país encontramos que existe una gran concentración de recurso eólico y solar, mismo que no se ha explotado debido a la falta de tecnología. Por ello, en el presente proyecto se busca una forma de generación híbrida entre la energía solar y eólica y su posible aplicación en sistemas aislados, donde el acceso a la red de distribución eléctrica se dificulta. La microcentral se halla conformada por un aerogenerador, cuatro paneles fotovoltaicos, dos baterías y sus respectivos elementos de control, con los cuales ofrece a su usuario un consumo de 1468 Wh diarios. Además la microcentral monitorea las variables climáticas y eléctricas inmersas en el proceso de generación, formando una base de datos que llega a visualizarse en una interfaz gráfica desarrollada en LabView. El equipo instalado se ha sometido a pruebas de funcionamiento, donde se ha comprobado su desempeño. Posterior a ello se presenta un análisis económico en el lugar donde fue instalado y una proyección para aplicarlo en la zona de Sigchos en la provincia de Cotopaxi.

**PALABRAS CLAVE: ENERGÍAS RENOVABLES, SISTEMAS HÍBRIDOS, ENERGÍA SOLAR, ENERGÍA EÓLICA, MONITOREO.**

## SUMMARY

Renewable energies have become a major area of study, which is aimed at eliminating dependence on fossil fuels, whose exploitation is exacerbating the health of the planet and therefore the lives of those who inhabit it. In some sectors of our country we find that there is a high concentration of wind and solar resource, it has not been exploited due to the lack of technology. Therefore, in this project seeks a form of hybrid generation from solar and wind energy and its potential application in isolated systems, where the access to the electrical grid is difficult. The microcentral is composed of a wind turbine, four photovoltaic panels, two batteries and their control elements, which offers the user a consumption of 1468 Wh per day. In addition the microcentral monitors weather and electrical variables embedded in the generation process, forming a database that reaches a graphical interface developed in LabView. The equipment installed has been tested, and its performance has been proven. Additionally it has been done an economic analysis, in the place where it was installed. And finally a projection is presented for the Sigchos area in the province of Cotopaxi.

**KEYWORDS: RENEWABLE ENERGY, HYBRID SYSTEMS, SOLAR ENERGY, WIND ENERGY, MONITORING.**

## CAPITULO 1: GENERALIDADES

### 1.1 Antecedentes

El estudio dentro de las energías renovables es relativamente nuevo dentro del Ecuador, pero ya existen amplios estudios en el resto del mundo principalmente en Europa. Un ejemplo claro de estos estudios es La Base Princesa Isabel, ubicada en la Tierra de la Reina Maud, esta es una base antártica de la República de Bélgica que funciona desde el 2009. Esta estación combina las energías eólica y fotovoltaica. Estos estudios dan la pauta para que se siga investigando en este tipo de tecnología e invertir en su desarrollo.



Figura 1.1 Base Princesa Isabel

En el Ecuador el valor promedio de insolación global es de  $4575 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$  y de toda esa energía solo se aprovecha un porcentaje mínimo. En el 2013 la producción anual de energía a nivel nacional en base a los datos estadísticos del CONELEC fue de 2,02 GWh mediante energía solar y 56,70 GWh mediante energía eólica, estos datos determinan la necesidad de desarrollar proyectos de investigación para incrementar la generación de electricidad mediante energías alternativas y buscar su eficiencia en cuanto a costo por kWh generado.

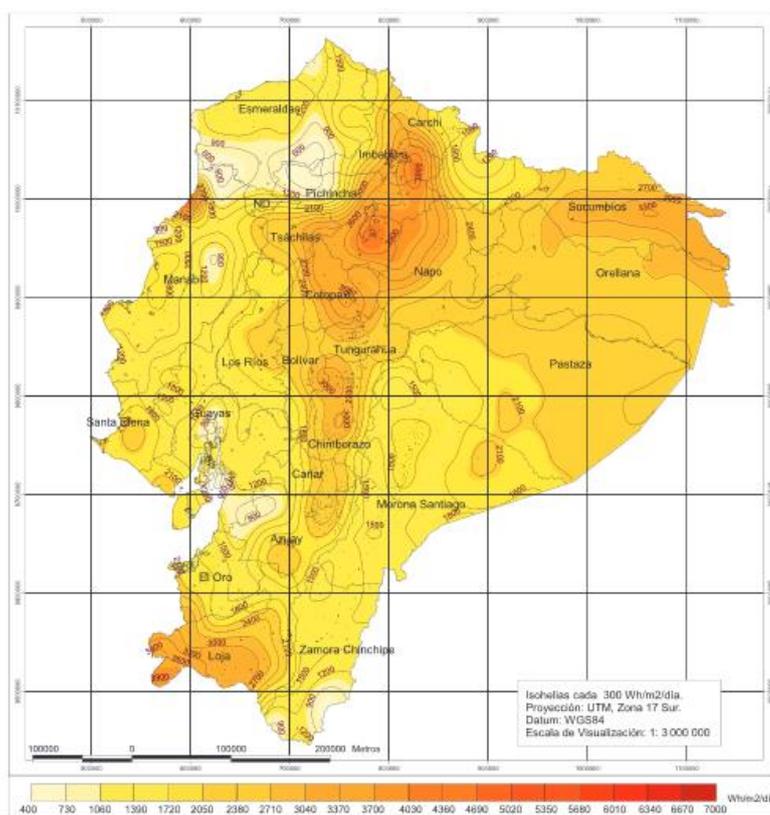


Figura 1.2 Radiación Solar en el Ecuador (CONELEC, 2008)

Una de las fuentes de desarrollo de la tecnología en lo que se refiere a energías renovables es justamente el laboratorio de “Energías Renovables” de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, donde se investiga y se desarrolla proyectos orientados a nuevas formas de adquisición de energía limpia. En este laboratorio ya se encuentran desarrollados o en desarrollo proyectos con energía solar y eólica, tales como: el proyecto de diseño y construcción de un modelo de vehículo experimental de 40Wp con energía solar fotovoltaica, mismo que se realizó en el año 2009, además encontramos la automatización del sistema de rotación y toma de datos de un panel fotovoltaico de 43 Wp del Laboratorio de energías renovables del DECEM realizado en septiembre del 2009. Estos proyectos nos dan el punto de partida al presente estudio cuyo objetivo es analizar los resultados de la construcción de una microcentral híbrida.

## **1.2 Alcance**

Lo que se busca con este proyecto es dejar operable una microcentral eólica-fotovoltaica que tenga una potencia instalada de 570 W en el laboratorio de Energías Renovables de los cuales 450 W corresponden al recurso fotovoltaico y 120 W al recurso eólico. La misma contará con un control que permitirá la automatización necesaria para administrar los recursos de esta energía mediante la mejora de su uso, minimizando los residuos e informando en tiempo real la generación, consumo y la cantidad de energía almacenada.

La microcentral tendrá un uso didáctico ya que con el mismo se pretende monitorear el rendimiento del sistema solar y eólico. Por lo que se desarrollará un sistema de monitoreo donde se podrán visualizar las diferentes variables implicadas dentro del sistema, como voltaje de generación, radiación solar, velocidad del viento, etc. Para un mejor desarrollo del proyecto se lo ha dividido en los siguientes módulos:

- Módulo Eólico
- Módulo Fotovoltaico
- Módulo de distribución
- Módulo de Monitoreo

El sistema se encuentra detallado en el ANEXO A.

## **1.3 Justificación e Importancia**

Estamos en una época en la que mundialmente se busca la optimización de los recursos de nuestro planeta, asociado a la conservación ambiental, lo cual se va convirtiendo en una de las principales prioridades de los seres humanos. Partiendo de esto nos damos cuenta que una de las formas más eficientes de aportar, es el uso de

energías renovables, siendo algunas de estas la solar (fotovoltaica y termodinámica), eólica, mareomotriz, etc.

Ya en la actualidad en nuestro país existen proyectos a gran escala para la aplicación de estas tecnologías. Pero todos estos proyectos no hubiesen sido factibles sin un estudio previo que nos permita conocerlas y llevarlas a su ejecución de la mejor manera. Este proyecto busca justamente desarrollar un campo no tan desarrollado, la implementación de sistemas híbridos, en este caso concerniente a la energía eólica y solar fotovoltaica.

La Universidad de Las Fuerzas Armadas “ESPE” siendo parte de las universidades que aportan al desarrollo científico de nuestro país, tiene entre sus manos los conocimientos y los instrumentos necesarios para el desarrollo científico que nos permitan conocer estas innovaciones y a un futuro con el conocimiento adquirido, poder realizar proyectos a gran escala que favorezcan el consumo energético del país con energías renovables.

Además el presente proyecto científico aportará datos importantes que a un futuro nos permitirán realizar el diseño e innovación de sistemas eficientes de generación energética. Siendo estos los pasos preliminares en el camino hacia el desarrollo energético responsable y la independencia de los combustibles fósiles.

Este proyecto pretende realizar la implementación y el estudio del rendimiento de estas energías en la generación de electricidad y realizar un control y monitoreo de las mismas así como ser parte del laboratorio para el uso de estudiantes en el estudio y probable desarrollo de proyectos a gran escala.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Diseñar, construir y controlar una microcentral eléctrica eólica fotovoltaica para el aprovechamiento de energías alternativas con una potencia instalada de 450 W de energía fotovoltaica y 120 W de energía eólica.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Dimensionar e implementar un generador eólico que tenga una potencia instalada de 120 W de apoyo al módulo fotovoltaico.
- Dimensionar y seleccionar los equipos necesarios del sistema de distribución para que exista energía de consumo disponible con una autonomía de un día en circunstancias críticas como días nublados y sin viento.
- Desarrollar un sistema de monitoreo y control que permita visualizar las variables climáticas del entorno en una interfaz computarizada para determinar la cantidad de energía disponible y gestionar el consumo o almacenamiento de la misma.
- Determinar la factibilidad de la implementación de estaciones híbridas proyectando los datos obtenidos hacia aplicaciones rurales y para la generación de energía a mayor escala.

## CAPITULO 2

### MARCO TEORICO

#### 2.1 Energías Alternativas

La búsqueda constante de nuevas formas de energía se debe al incremento del consumo de la energía proveniente combustibles fósiles que aparte de ser un recurso limitado, causa daños al medio ambiente mediante emisiones de dióxido de carbono, azufre y nitrógeno.

Si el aumento continuo de la demanda energética se satisface con energía fósil, aumentará de igual forma la emisión de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero pudiendo producir deterioros irreparables en el planeta. Es por esto que es necesario buscar fuentes renovables de energía cuyo consumo no afecte al planeta ya que mundialmente el porcentaje de energía generado por fuentes renovables es de tan solo 1,3%.

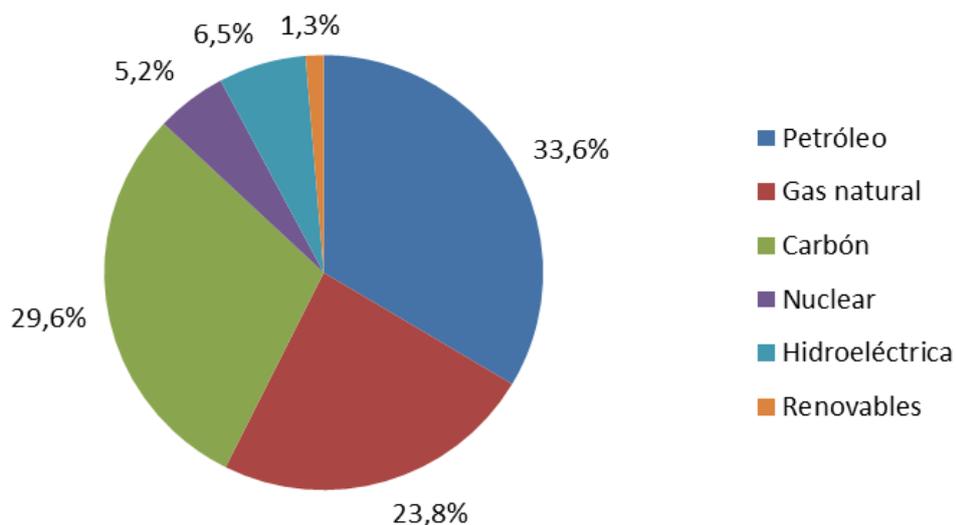


Figura 2.1 Consumo mundial de energía por fuentes  
(Institute for Energy Research, 2012)

Las principales fuentes de energía renovable son:

### **2.1.1 Energía Solar**

Es la energía que aprovecha la radiación del sol para producir energía eléctrica o para la calefacción es decir se utiliza en sistemas fotovoltaicos y térmicos respectivamente. En los sistemas térmicos el calor recogido se puede utilizar para obtener agua caliente para consumo doméstico e industrial o para la calefacción mientras que los sistemas fotovoltaicos producen energía eléctrica que puede ser usada en zonas alejadas de las redes eléctricas, almacenadas en baterías para su consumo nocturno o a su vez puede ser inyectada en la red.

### **2.1.2 Energía eólica**

Es la energía que se obtiene a partir de las corrientes de aire y es transformada a otros tipos de energía para su utilización. La energía cinética que proviene del viento es transformada en energía eléctrica mediante generadores, además puede ser usada en sistemas de bombeo de agua.

### **2.1.3 Energía geotérmica**

Este tipo de energía aprovecha el calor del interior de la tierra y puede ser usado en varias aplicaciones, principalmente para climatización y obtención de agua caliente, aunque en zonas donde la temperatura es superior a los 100°C, esta energía también es usada para la producción de electricidad.

### **2.1.4 Energía mareomotriz**

Es la energía que aprovecha la marea para la generación de energía eléctrica, mediante el uso de una turbina y un alternador se aprovecha el movimiento de las olas para generar electricidad. Este tipo de instalaciones pueden realizarse en ríos profundos, desembocaduras y océanos para aprovechar las corrientes marinas.

### **2.1.5 Energía hidráulica**

Aprovecha la energía potencial del agua, la cual al pasar por una turbina transmite energía a un generador transformándose en energía eléctrica. Su principal aplicación la constituyen las centrales hidroeléctricas que aunque no emiten sustancias tóxicas no son totalmente favorables para el medio ambiente ya que se altera la vida de la fauna acuática.

## **2.2 Energía Solar**

El sol se ha caracterizado por ser la principal fuente de energía de nuestro planeta, principalmente para organismos microscópicos y plantas, que constituyen el pilar inicial de la cadena alimenticia y proveen de energía al resto de especies. Se trata de una fuente inagotable y no contaminante, cuyo aprovechamiento permitirá la disminución del consumo de energías que están destruyendo el planeta, como lo son las energías fósil y nuclear.

Para el aprovechamiento de esta energía se debe conocer cuáles son sus características, la forma en que se presenta la misma al llegar al planeta y que factores influyen en este hecho. El sol no es una fuente constante de energía para una determinada zona del planeta, es decir que existen momentos de captación máxima de energía y prácticamente nula, dependiendo principalmente de la hora del día, época del año y posición geográfica. Estos parámetros se hallan directamente relacionados con los movimientos de la tierra: rotación, traslación y nutación. Existen también condiciones propias del planeta que influyen en la energía recibida, una de estas es la capa de aire que nos rodea capaz de absorber la energía del sol evitando que esta llegue en su totalidad a la superficie terrestre, a mayor capa de aire existe una mayor

absorción por lo que al medio día atraviesa la mayor cantidad de energía que en la salida y puesta del sol.

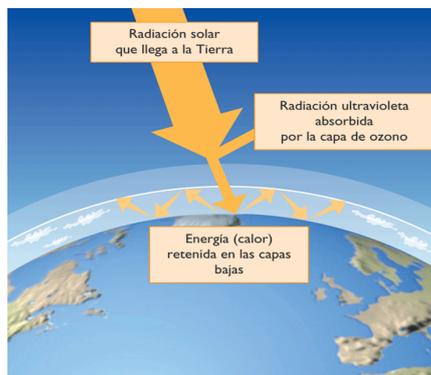


Figura 2.2 Radiación Solar

Sobre la superficie terrestre inciden los siguientes tipos de radiación:

- Radiación directa: Es la energía proveniente del sol que no presenta cambios en su trayectoria, hasta el objeto de captación.
- Radiación difusa: Es la energía que llega al objeto de captación después de sufrir choques con moléculas y partículas del aire, no presenta dirección y su distribución es uniforme.
- Radiación reflejada: Es la energía que llega al objeto de captación después de ser reflejada en las superficies del entorno, tampoco presenta dirección clara.
- Radiación global: Es la suma de la directa y la difusa.
- Radiación total: Es la suma de la directa, difusa y albedo.

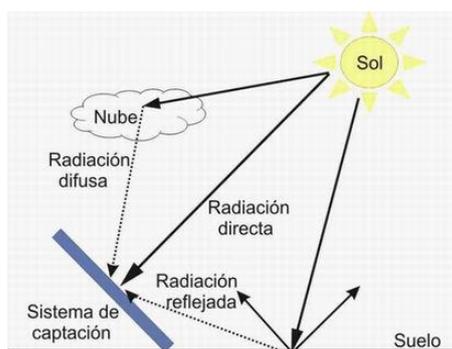


Figura 2.3 Tipos de radiación

Para lograr el aprovechamiento de este tipo de energía se han ideado formas de captación, siendo estas:

- Sistemas Fototérmicos. Utilizan la energía solar como fuente directa de calor, es decir que lo utilizan para calentar algún fluido y de esta manera poder aprovecharla, siendo sus usos principales: calefacción residencial, agua caliente y fluidos con fines industriales.
- Sistemas Fotovoltaicos. Captan la radiación y la transforman en energía eléctrica, gracias al efecto fotovoltaico. Esta forma de captación será detallada posteriormente.
- Otros. En este grupo se hallan aplicaciones no tan usuales como: secado de productos agrícolas e industriales, destilación de agua y motores térmicos.

### **2.2.1 Energía Solar Fotovoltaica**

Lo conforman los sistemas fotovoltaicos quienes realizan la conversión directa de la radiación solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico que se produce dentro de las células solares. Los sistemas fotovoltaicos se clasifican en 2 grupos dependiendo del uso que van a tener, estos son:

- Sistemas Autónomos: usualmente se hallan alejados de la red eléctrica y sirven para satisfacer la demanda de aplicaciones específicas como: electrificación rural de viviendas, locales y alojamientos ganaderos o avícolas, iluminación pública, sistemas de bombeo de agua, estaciones de aguas residuales, autos solares entre otras.
- Sistemas conectados a la red eléctrica: Son sistemas que están conectados permanentemente a la red eléctrica, cuando existe radiación solar, el sistema aporta energía a la red, mientras que en horas de escasa presencia de radiación,

la red es la que proporciona la energía para satisfacer la demanda de la misma. Las instalaciones típicas conectadas a la red son: viviendas y otras edificaciones conectadas a la red, centrales fotovoltaicas y fotovoltaicas mixtas.

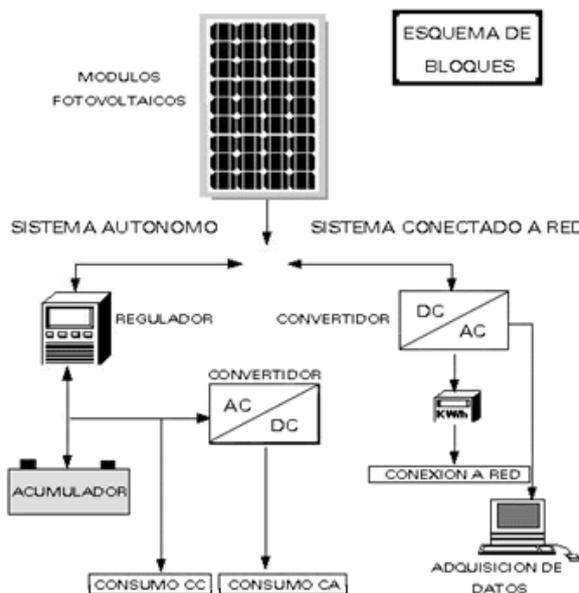


Figura 2.4 Tipos de sistemas fotovoltaicos

### *Elementos de una instalación fotovoltaica*

Los elementos que conforma un sistema fotovoltaico son:

- Panel Fotovoltaico. Transforma la energía solar en energía eléctrica.
- Regulador. Al ser la radiación solar un elemento variante, este se encarga de fijar el voltaje variante del panel a un voltaje constante y administrar la carga y descarga de la batería.
- Sistema de acumulación. Es la parte que se encarga de almacenar la energía que no se esté usando directamente para su consumo posterior, mediante el uso de baterías.
- Inversor. Transforma la corriente continua de la batería y los paneles a corriente alterna de características similares a las de la red.

- Equipo de conexión a red. En sistemas conectados a la red eléctrica para evitar cualquier riesgo de los equipos o de los consumidores debe asegurarse que la frecuencia sea exactamente la misma que en la red, que no se introduzcan armónicos y existan las seguridades adecuadas para fallas de la red o el equipo.

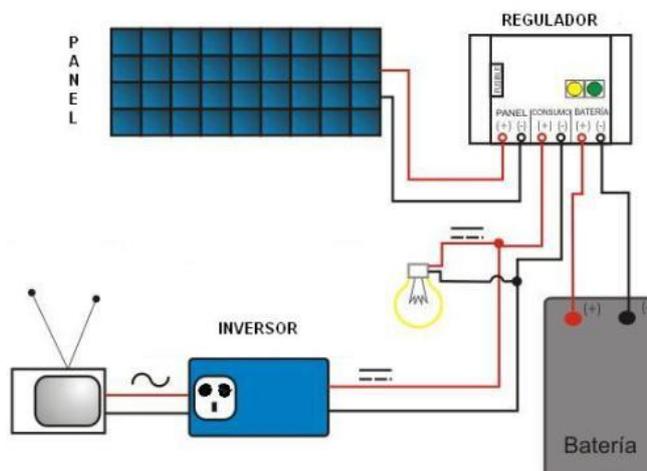


Figura 2.5 Elementos del sistema fotovoltaico

### 2.2.2 Efecto Fotovoltaico

Se produce entre dos semiconductores uno tipo N (exceso de carga negativa) y otro tipo P (exceso de carga positiva), unidos mediante una capa P-N. Los tipo N tienen cinco electrones de valencia añadidos por las impurezas. El tener cinco electrones hace que este quinto electrón quede libre muy fácilmente gracias a la aportación de pequeñas cantidades de energía. Los tipo P tienen 3 electrones de valencia, además de grandes cantidades de huecos positivos que participan en la conducción eléctrica. Este compuesto al recibir fotones provenientes de la luz solar, ocasiona la liberación de electrones lo que crea una diferencia de potencial entre ambos semiconductores. Los fotones tienen energía dada por su frecuencia, pero esta energía debe superar la energía mínima necesaria (1,1 eV para el silicio) para que un electrón de la banda de valencia pase a la banda de conducción.

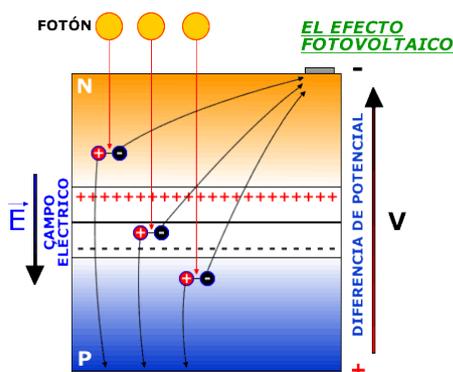


Figura 2.6 Efecto Fotovoltaico

### 2.2.3 Paneles Solares

Los paneles solares son los encargados de transformar la energía solar en eléctrica. El principal elemento de un panel solar es una célula solar. Formada por un semiconductor base usualmente el silicio, para disminuir las pérdidas por reflexión se adhiere una película anti-reflectante y una parrilla metálica en la parte superior (siendo esta la capa negativa), mientras que en la parte inferior se adhiere una película metálica, misma que se recoge la energía generada y la transmite al circuito de conexión. El silicio utilizado puede estar en forma monocristalina, policristalina o amorfa, siendo el más eficiente el de forma monocristalina aunque su costo es elevado. Además el silicio puede ser sustituido por galio-arsénico o cadmio-telurio.

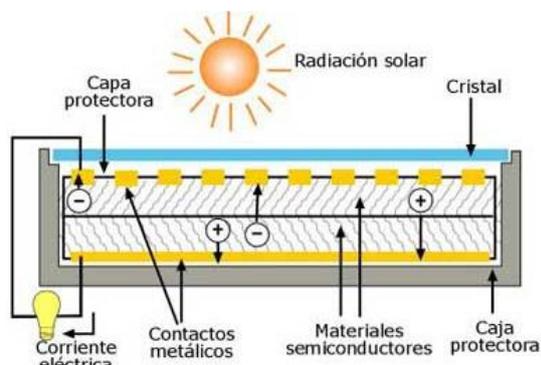


Figura 2.7 Célula Fotovoltaica

Una célula solar elemental de  $100\text{cm}^2$  genera  $0.5\text{ V}$  y una potencia de  $0.12\text{W}$ , siendo esta muy baja para su uso individual, por lo que se agrupan en serie hasta alcanzar voltajes nominales aceptables y en paralelo hasta alcanzar la potencia

requerida. Al ser frágiles, estas agrupaciones se protegen mediante un encapsulado transparente situado sobre un soporte metálico, el mismo que se instala en un bastidor metálico bajo una cubierta protectora de vidrio. Esta es la conformación tradicional de un panel solar, pero los fabricantes realizan pequeños cambios en el diseño para tener una mayor eficiencia o seguridad.

### *Curvas características*

Para la selección de un panel solar se definen las características principales del mismo como son la potencia pico, la intensidad pico y el voltaje nominal en condiciones estándar es decir con una radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ . Estos datos se encuentran en las curvas características, siendo estas:

- Curva voltaje-intensidad (V-I). Muestra el comportamiento del voltaje y la corriente a una determinada radiación empezando en el punto de cortocircuito hasta llegar a un circuito abierto.
- Curva voltaje-potencia (V-W). Muestra la variación de la potencia a diversos voltajes, permitiéndonos determinar el punto de potencia máxima.

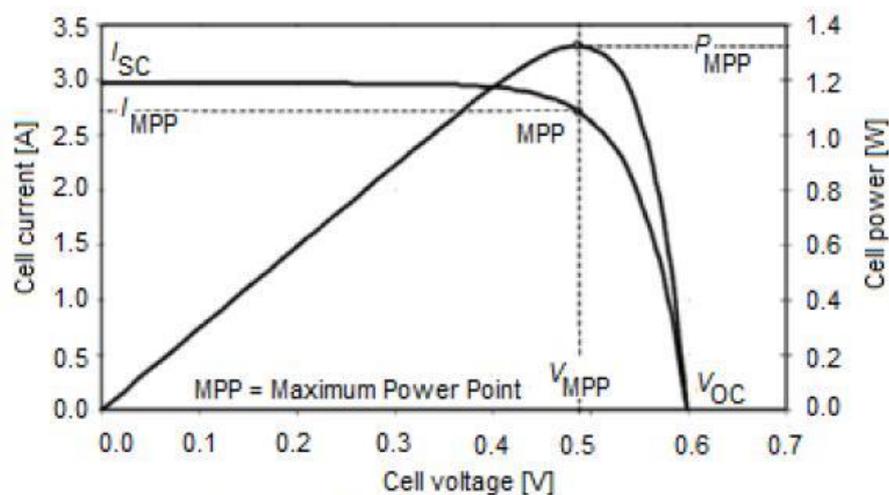


Figura 2.8 Curvas Características

Estas curvas varían por:

- Intensidad de la radiación incidente: A medida que aumenta la intensidad de radiación, aumenta la corriente.
- Temperatura de trabajo: A medida que aumenta la temperatura disminuye la potencia de manera considerable.

Debido a esto existe una curva para una determinada temperatura y una determinada radiación.

Un dato importante para los paneles es el rendimiento que se obtiene mediante la fórmula:

$$\eta = \frac{P_{max}}{A * E} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

- $P_{max}$ =Potencia pico del panel(W)
- $A$ =Área del panel(m<sup>2</sup>)
- $E$ =Radiación solar(W/m<sup>2</sup>)

### ***Dimensionamiento del módulo Fotovoltaico***

El número de paneles necesarios se calcula mediante:

$$N_p = \frac{C_d}{P_{max} * HSP} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde:

- $C_d$  es el consumo a satisfacer diariamente, se calcula sumando las horas de uso multiplicada por la potencia de funcionamiento de cada equipo, medida en Wh.
- HSP (horas de sol pico) son las horas al día con una hipotética radiación constante de 1000W/m<sup>2</sup>, dato que es equivalente a la Insolación Global incidente medida en kWh/m<sup>2</sup>/día.

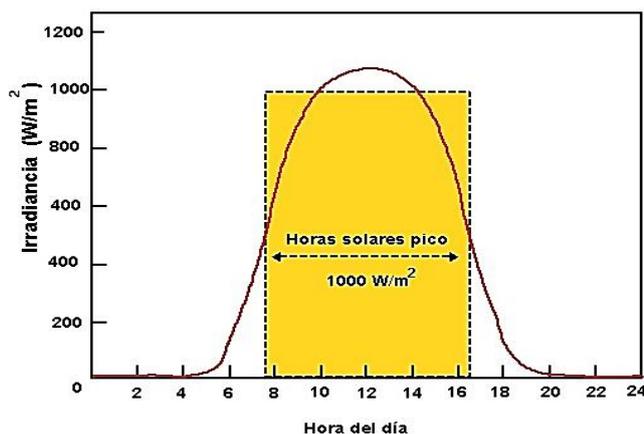


Figura 2.9 Hora solar pico

### 2.3 Energía Eólica

En nuestro planeta uno de los fenómenos que ha demostrado una gran cantidad de energía contenida es el movimiento del viento. El ser humano ha visto este potencial y desde hace miles de años ha diseñado mecanismos para aprovecharla, entre las más utilizadas tenemos: molienda de grano, desplazamiento y transporte, extracción de aceites, acerrado de madera y sistemas de bombeo de agua. El más destacado ha sido los molinos de viento, cuyo objetivo ha sido la sustitución del trabajo animal y humano en la molienda de granos. El avance que impulsó este desarrollo fue la técnica de los engranajes para transmitir el movimiento giratorio. El avance en la captación de esta energía ha logrado que en la actualidad se pueda generar energía eléctrica para el consumo.

#### *El viento*

El aire se halla en movimiento y su principal causa es la radiación solar. La radiación solar depende de la latitud del lugar; tenemos que en los polos existe una menor incidencia de los rayos solares, generando un menor calentamiento de la temperatura, mientras que en las regiones ecuatoriales la incidencia superior aumenta la temperatura. El aire caliente es menos denso y asciende, siendo desplazado por otro

más frío y pesado lo que genera las corrientes. Estas corrientes están influenciadas por la rotación de la tierra, la ubicación de los continentes y la diferencia de presiones. En la atmósfera existen zonas con una actividad definida y constante durante meses como: los vientos del oeste, los vientos alisios en el hemisferio norte y los monzones y alisios en el Ecuador.

La velocidad y dirección del viento se deben a la acción de las siguientes fuerzas:

- Fuerza debida al gradiente horizontal de presión ( $F_p$ ): Esta fuerza va dirigida desde las isobaras de alta presión a las de baja presión.
- Fuerza de Coriolis ( $F_d$ ): Fuerza que se debe a la rotación de la tierra, la trayectoria de una masa de aire en movimiento sufre una desviación hacia la derecha en el hemisferio norte y en sentido contrario en el hemisferio sur.
- Fuerza centrífuga ( $F_c$ ): Actúa según la dirección del radio de curvatura de la trayectoria de las isobaras en sentido opuesto al centro de la curvatura.
- Fuerza de rozamiento ( $F_r$ ): Fuerza en sentido opuesto a la velocidad por factores como el tipo de superficie o la orografía.

### ***Tipos de vientos***

Los principales tipos de viento son:

- Viento Geostrófico: se genera de la acción conjunta de las fuerzas de coriolis y del gradiente de presión.
- Viento de gradiente: es el resultante de la combinación de las fuerzas debidas a gradiente de presión, de coriolis y centrífuga.
- Brisas del mar y brisas de la tierra: En el día la tierra se calienta más rápido que el mar, esto provoca una diferencia de temperatura y densidad en el aire

produciendo un movimiento del aire del mar hacia la tierra. En la noche sucede el efecto contrario.

- Brisas de valle y de montaña: En el día las laderas de la montaña se calienta más rápido que el suelo del valle, esto provoca una diferencia de temperatura y densidad en el aire produciendo un movimiento del aire del fondo hacia la cúspide. En la noche sucede el efecto contrario.

### *Escala Beaufort*

Al no contar con elementos de medida, una forma de estimar con relativa exactitud la velocidad del viento es mediante la escala Beaufort, la cual utiliza la visualización de movimientos de la naturaleza como la vegetación y el mar.

Tabla 2.1  
Escala de Beaufort

<b>F U E R Z A</b>	<b>Escala de Beaufort</b>			
	<b>Veloc. del Viento</b>		<b>Denomi- nación</b>	<b>Características Visuales</b> <small>(en tierra)</small>
	<b>Nudos</b>	<b>Km/h</b>		
<b>0</b>	<b>&lt;1</b>	<b>&lt;2</b>	Calma	Humo vertical Anemómetro no gira
<b>1</b>	<b>1 a 3</b>	<b>2 a 5</b>	Brisa Suave o Ventolina	El humo se desvía Veletas se mueven
<b>2</b>	<b>4 a 6</b>	<b>6 a 11</b>	Brisa o Flojito	Se siente en la cara Banderas se levantan
<b>3</b>	<b>7 a 10</b>	<b>12 a 19</b>	Viento leve o flojo	Se mueven las hojas Banderas flamean
<b>4</b>	<b>11 a 16</b>	<b>20 a 28</b>	Moderado o bonancible	Se levanta polvo Banderas se agitan
<b>5</b>	<b>17 a 21</b>	<b>29 a 38</b>	Regular o fresquito	Vuela la arena Se agitan las ramas
<b>6</b>	<b>22 a 27</b>	<b>39 a 49</b>	Fuerte o fresco	Silba la jarcia Se mueven ramas gruesas
<b>7</b>	<b>28 a 33</b>	<b>50 a 60</b>	Muy fuerte o frescachón	Se mueven árboles grandes Molesta caminar en contra
<b>8</b>	<b>34 a 40</b>	<b>61 a 74</b>	Viento duro	Desgaja árboles Muy difícil caminar y respirar
<b>9</b>	<b>41 a 47</b>	<b>75 a 88</b>	Temporal	Arrastra objetos Imposible caminar
<b>10</b>	<b>48 a 55</b>	<b>89 a 102</b>	Muy duro	Daños y consecuencias variadas
<b>11</b>	<b>56 a 63</b>	<b>103 a 117</b>	Borrasca o tempestad	Daños y consecuencias variadas
<b>12</b>	<b>+ de 64</b>	<b>+ de 118</b>	Huracán	Daños y consecuencias variadas

(Bello, 2014)

### *Influencia de obstáculos*

Los obstáculos existentes como: árboles, edificios, instalaciones eléctricas, entre otros producen dos efectos desfavorables para la generación eólica. El primero es la

disminución de la velocidad del viento y el segundo la generación de turbulencias. En grandes parques eólicos lo recomendable es situarlo a un kilómetro de cualquier posible obstáculo. Las turbulencias generadas en la parte superior alcanzan una altura de dos veces la altura del obstáculo, en la parte frontal es decir de barlovento la distancia es de dos alturas mientras que en la parte posterior, sotavento, las turbulencias llegan a una distancia de 10 a 20 veces la altura.

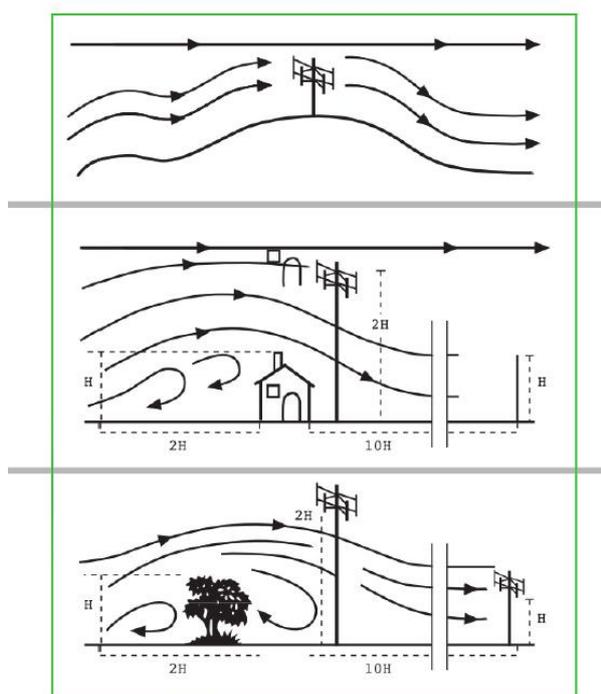


Figura 2.10 Influencia de obstáculos (Ropatek, 2013)

### *Variación de la velocidad del viento con la altura*

La velocidad del viento varía con la altura, siguiendo una ecuación de tipo estadístico, conocida como ley exponencial de Hellmann de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_h = V_{10} \left( \frac{h}{10} \right)^\alpha \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

- $V_h$ : Velocidad del viento a una altura  $h$  (m/s)

- $V_{10}$ : Velocidad a 10 m de altura (m/s)
- $h$ : altura (m)
- $\alpha$ : Exponente de Hellmann, cuyo valor está determinado por la rugosidad del terreno. Toma los valores de 0.08 en terrenos llanos hasta valores de 0.4 en superficies accidentadas

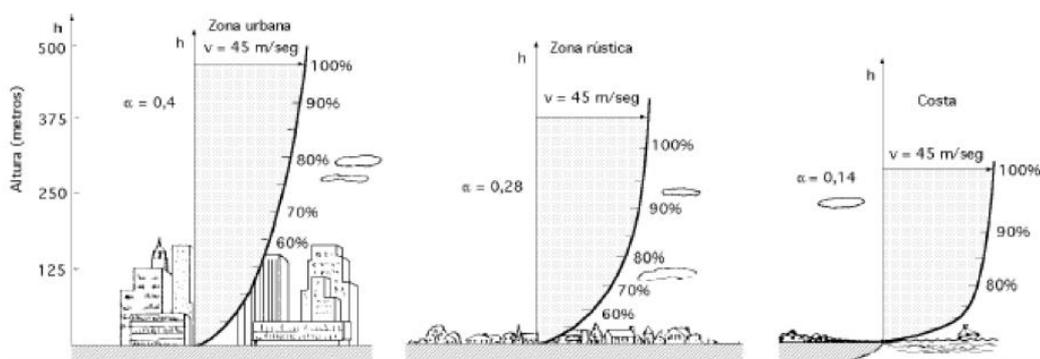


Figura 2.11 Variación de la velocidad del viento con la altura (Atmospheric Fan System, 2014)

### **Potencia Eólica disponible**

La potencia que se puede extraer del viento si toda la energía cinética se transformara en energía útil se obtiene en base a los siguientes principios:

- Una masa de aire  $m$  con velocidad  $v$  posee una energía cinética  $E_c$  que viene dada por:

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad \text{Ec. 2.4}$$

- El caudal másico de aire  $\dot{m}$ , de densidad  $\rho$  que fluye a través de una superficie de área  $A$  perpendicular a la dirección de flujo viene dado por la ecuación:

$$\dot{m} = \rho A v \quad \text{Ec. 2.5}$$

En base a las ecuaciones 2.4 y 2.5 se determina que la potencia disponible del caudal de aire que atraviesa una sección es:

$$P_d = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad \text{Ec. 2.6}$$

Donde:

- $\rho$ : densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )
- $A$ : área perpendicular al flujo de aire ( $\text{m}^2$ )
- $v$ : velocidad del viento ( $\text{m/s}$ )

Se debe tener en cuenta que con un rotor ideal la máxima potencia que teóricamente se puede extraer del viento corresponde al 59.3% y corresponde al límite de Betz, sin embargo en la práctica se puede aprovechar en el mejor de los casos un 40% debido a diferentes factores como rozamientos aerodinámicos y mecánicos, rendimiento del generador eléctrico, etc.

### ***Potencia útil de un aerogenerador***

Cada aerogenerador posee una curva característica que representa su potencia útil, es decir la energía aprovechada por el rotor, la potencia útil del aerogenerador viene dada por la siguiente expresión:

$$P_u = \eta_m * \eta_t * C_p * P_d \quad \text{Ec. 2.7}$$

Donde:

- $\eta_m$ : eficiencia del generador
- $\eta_t$ : eficiencia de la caja reductora
- $C_p$ : coeficiente de potencia que expresa la relación entre la potencia aprovechada por el aerogenerador y la disponible en el viento

La potencia útil de cada aerogenerador varía con respecto al viento de acuerdo a la curva de potencia suministrada por el fabricante, para la obtención de esta curva la norma IEC 61400 establece que las condiciones estándares para medir la velocidad son una presión atmosférica de 101.3 kPa, una temperatura de 15°C, lo que equivale una densidad de aire de 1.225  $\text{kg/m}^3$ .

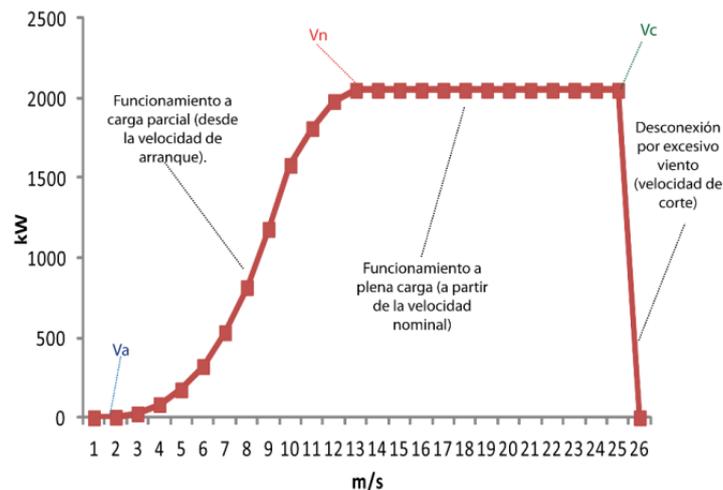


Figura 2.12 Curva de potencia de un aerogenerador (LATIn, 2014)

En la curva se puede apreciar lo siguiente:

- Velocidad de arranque ( $V_a$ ): Es la velocidad para la cual el generador empieza a generar potencia útil.
- Velocidad nominal ( $V_n$ ): Es la velocidad del viento para la cual se alcanza la potencia nominal del aerogenerador.
- Velocidad de corte o desconexión ( $V_c$ ): Es la velocidad del viento a la cual el rotor se detiene para evitar el riesgo de sufrir daños, mediante los sistemas de regulación y control.
- Velocidad de supervivencia: Es la velocidad del viento por la cual se puede dañar el aerogenerador a pesar de estar parado.

### 2.3.1 Ley de distribución de Weibull de la velocidad del viento

Para posteriormente calcular la generación estimada del aerogenerador a lo largo del año es necesario disponer de una función que nos permita determinar la distribución de velocidades del viento en un tiempo específico. Según el autor Miguel Villarubia en su libro Energía Eólica se ha comprobado de manera experimental que la velocidad del viento tiene una densidad de probabilidad que se ajusta a una

distribución de la función densidad de la probabilidad de Weibull. Esta función de densidad  $\rho(v)$  corresponde a la ley de Weibull es del tipo dos parámetros (k,c) y viene dada por la expresión:

$$\rho(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde:

- v: es la velocidad del viento en m/s
- c: es el factor de escala (m/s), valor que suele ser próximo a la velocidad media.
- k: es el factor de forma que caracteriza la asimetría o sesgo de la función de probabilidad.

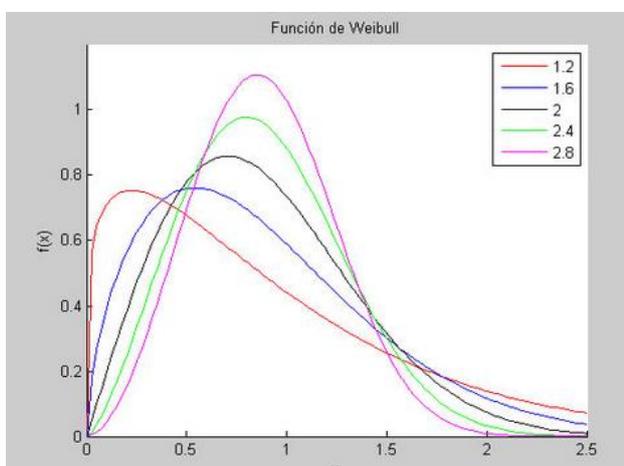


Figura 2.13 Función de Weibull para diferentes valores de k (EUSKAMPOS, 2013)

Para obtener la variable c, se usa la ecuación de la velocidad media:

$$v = \int_0^{\infty} v f(v) dv = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

- $\Gamma(x)$  es la función gamma cuyos valores vienen dados en tablas.

Despejando se obtiene:

$$c = \frac{v}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad \text{Ec. 2.10}$$

### 2.3.2 Cálculo de la potencia de un Aerogenerador

Para determinar la energía generada por un aerogenerador en un determinado período de tiempo se necesitan los principales factores:

- Conocer la curva de potencia (P-v) dada por los fabricantes.
- La distribución de las velocidades del viento en el lugar donde será instalado el aerogenerador.

La energía generada está determinada mediante la ecuación:

$$P = T \int_0^{\infty} \rho(v)P(v)dv \quad \text{Ec. 2.11}$$

Donde:

- $\rho(v)$  es la función de densidad de probabilidad de velocidad del viento correspondiente al período T.
- $P(v)$  es la potencia del aerogenerador frente a la velocidad del viento (curva de potencia).
- T es el período de tiempo considerado.

Aceptando que la función de densidad sigue la ley de Weibull se sigue el siguiente procedimiento. Teniendo en cuenta que en la curva de potencia existe una velocidad de arranque ( $v_a$ ) y una velocidad de desconexión ( $v_d$ ), la expresión 2.11 queda de la siguiente manera:

$$P = \frac{E}{T} = \int_{v_a}^{v_d} \rho(v)P(v)dv \quad \text{Ec. 2.12}$$

Para resolver esta integral se realiza un método numérico basado en la discretización de las funciones  $\rho(v)$  y  $P(v)$ .

$$P = \int_{v_a}^{v_d} \rho(v)P(v)dv \approx \sum_i \rho_i P_i \Delta v_i \quad \text{Ec. 2.13}$$

Donde:

- $P_i$  es el valor de potencia del aerogenerador para la velocidad  $v_i$ .
- $p_i$  es el valor de la función de Weibull para la velocidad  $v_i$ .
- $\Delta v_i$  es la amplitud del intervalo de velocidad.

Multiplicando este valor P por un T correspondiente a las horas de distribución, siendo 24 se obtiene finalmente la energía generada en ese intervalo de tiempo.

### 2.3.3 Tipos de Rotores

En lo que se refiere a la captación energía eólica existen diversos tipos de rotores, que presentan diferentes tipos de características de acuerdo a la aplicación en donde se va a implementar. Existen principalmente de dos clases: de eje vertical y eje horizontal.

#### *Eje vertical*

Como su nombre lo indica son generadores cuyo eje está en forma vertical, se caracterizan por aprovechar la diferencia de fuerza del viento que se ejerce sobre una superficie cóncava y una convexa. Los principales ejemplares de este grupo son:

- Rotor Savonius

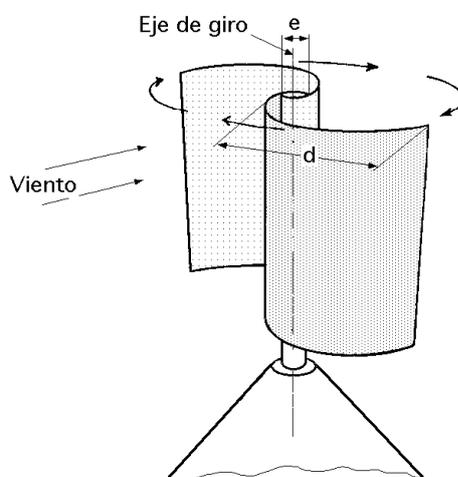


Figura 2.14 Rotor Savonius

Se trata de un rotor inventado en el año de 1924, siendo principalmente utilizado en sistemas de bombeo. El principio de funcionamiento de este rotor se basa en la diferente fuerza aerodinámica que ejerce el viento sobre superficies de distinta forma, el rotor savonius está formado por un conjunto de álabes en forma de cazoletas semiesféricas, el viento origina fuerzas distintas en la parte cóncava y convexa lo que provoca el giro del rotor independientemente de la dirección del viento.

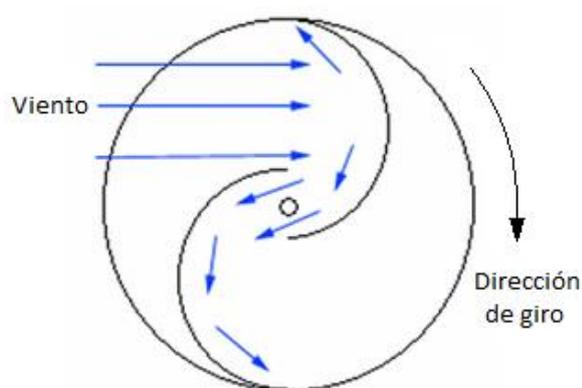


Figura 2.15 Funcionamiento del rotor Savonius

– Rotor Darrieus



Figura 2.16 Rotor Darrieus

Creado en el año de 1931 por G.J.M. Darrieus, actualmente es uno de los generadores comerciales más cotizados, siendo el principal de eje vertical. Una de las principales ventajas de este tipo de rotores es que evita la necesidad de diseños

complejos debido a la distribución de sus palas. Pero uno de los mayores inconvenientes que presenta es la necesidad de un sistema de arranque donde el generador pase a trabajar como motor durante unos instantes hasta lograr un movimiento uniforme del rotor.

### ***Eje Horizontal***

Son los más utilizados y de mayor potencia, básicamente tenemos:

- Rotores de aerogeneradores lentos:



Figura 2.17 Rotor multipala

Presentan un elevado número de palas, el sistema de orientación que utilizan es mediante un timón-veleta para orientarlo en perpendicular a la dirección del viento. Su diámetro oscila entre los 3 y 10 m, por su elevado peso. Debido a su alto número de palas, su velocidad de arranque es de 2 y 3 m/s, generan potencias bajas por lo que usualmente se utilizan para instalaciones de extracción y bombeo de agua.

- Rotores de aerogeneradores rápidos (rotor tripala):

Son rotores cuya potencia por unidad de peso es mayor que las anteriores. Presentan un número pequeño de palas (1 a 4), lo que les vuelve ligeros y por ende su diámetro aumenta. Existe en la actualidad rotores de 90 m que alcanzan una potencia nominal de 3MW. Su tamaño y bajo número de palas ocasiona que la velocidad del viento para su arranque sea entre 4 y 5 m/s.



Figura 2.18 Rotor Tripala

El más representativo es el tripala. Es el más empleado en todo el mundo esto se ha debido a su equilibrio entre eficiencia, facilidad de instalación, mantenimiento y durabilidad. Su diseño de 3 palas a 120 grados permite una óptima captación de la energía eólica, además de no exceder la resistencia al viento lo que ocasionaría un desgaste rápido de las aspas.

#### **2.3.4 Etapa de Generación**

Esta etapa es la encargada de la transformación de la energía mecánica del viento a energía eléctrica para su uso o almacenaje. Consta de dos partes: la caja de engranajes y el generador eléctrico.

##### ***Caja de engranajes***

Constituye el acoplamiento entre el eje del rotor y el generador, pueden ser de dos tipos reductor o multiplicador. Para aplicaciones como el accionamiento de bombas de pistones se usa un reductor, debido a que a veces la velocidad de giro del árbol del cigüeñal es menor que la del rotor. Para generación eléctrica se usan cajas multiplicadoras, el generador es una máquina eléctrica síncrona o asíncrona que para su correcto funcionamiento necesita velocidades de 1000 a 1500 rpm ya que con esto se puede llegar a frecuencias de 50 a 60 Hz.

Para la identificación de una caja de engranajes se usa la relación de transformación definida como la relación entre la velocidad de giro del eje de entrada (rotor) y la del eje de salida (generador), esta relación suele escribirse de la forma 1:m con lo que se conoce que la velocidad de salida es m veces la de entrada. Para aerogeneradores la relación suele estar entre 25 y 100.

En aerogeneradores grandes el eje de salida (acoplado al generador) tiene un freno mecánico de disco, usado en casos de emergencias o para su mantenimiento.

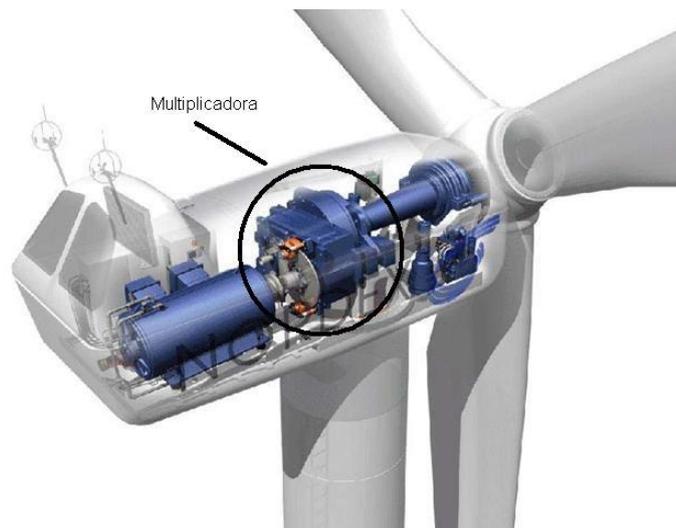


Figura 2.19 Caja de engranajes del aerogenerador

### ***Generador eléctrico***

La energía generada usualmente es de corriente alterna, los generadores de corriente alterna pueden ser de dos tipos:

- Síncronos. Pueden ser de dos tipos: polos formados por electroimanes alimentados por corriente continua y de polos formados por imanes fijos o permanentes. El más utilizado es el de imanes fijos, dado que no necesita energía externa. Es más utilizado en casos donde el rotor gira a velocidad variable. Cuando el rotor gira a velocidades altas, en este generador no es necesario el acople mediante caja multiplicadora.

- Asíncronos. Pueden ser dos tipos: jaula de ardilla y rotor devanado. Son los más utilizados en generación eólica de gran potencia. Una desventaja que presentan es el requerir energía reactiva por lo que deben estar conectadas a la red, esto se debe a que el campo magnético giratorio se crea a través del estator y sus devanados deben estar conectados a una fuente exterior de tensión alterna. Gracias a sus características de funcionamiento es muy usado en casos donde el rotor gira a velocidad constante. Tiene mayor duración y disponibilidad, siendo su costo más bajo.

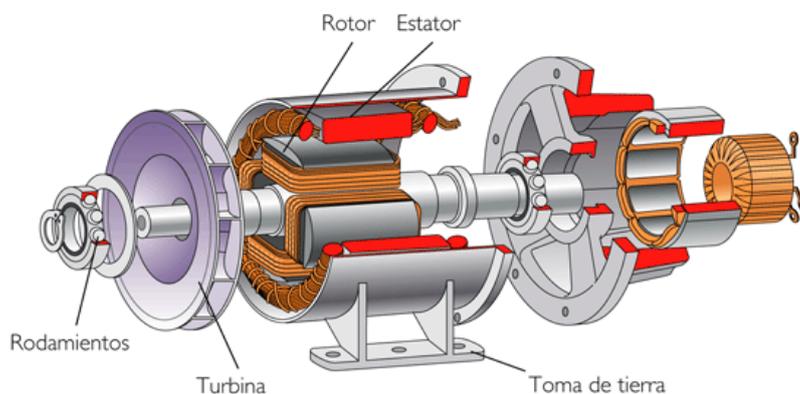


Figura 2.20 Generador eléctrico

## 2.4 Sistemas Híbridos

Los sistemas híbridos pueden combinar dos formas de generación de energía sean estas renovables o no renovables. Este tipo de sistemas se han desarrollado como un concepto de mutuo apoyo entre dos tipos de energías para que el momento donde falte la una, la otra pueda entrar en funcionamiento y al existir un exceso de generación, dicha energía sea guardada para su posterior uso. Un sistema híbrido eólico-fotovoltaico aprovecha la energía proveniente del sol y del viento haciendo que sea más eficiente. Por ejemplo en los días nublados existen velocidades del viento favorables, mientras que la radiación solar es baja, y en días despejados existe gran radiación solar sin presencia de viento. Este sistema al tratarse de la unión de dos

fuentes renovables de energía presenta una gran ventaja para disminuir la dependencia de las fuentes fósiles de energía. Presenta los mismos elementos que si se tratara de un sistema individual con la modificación del regulador ya que este presenta una entrada para la energía eólica y otra para la solar.

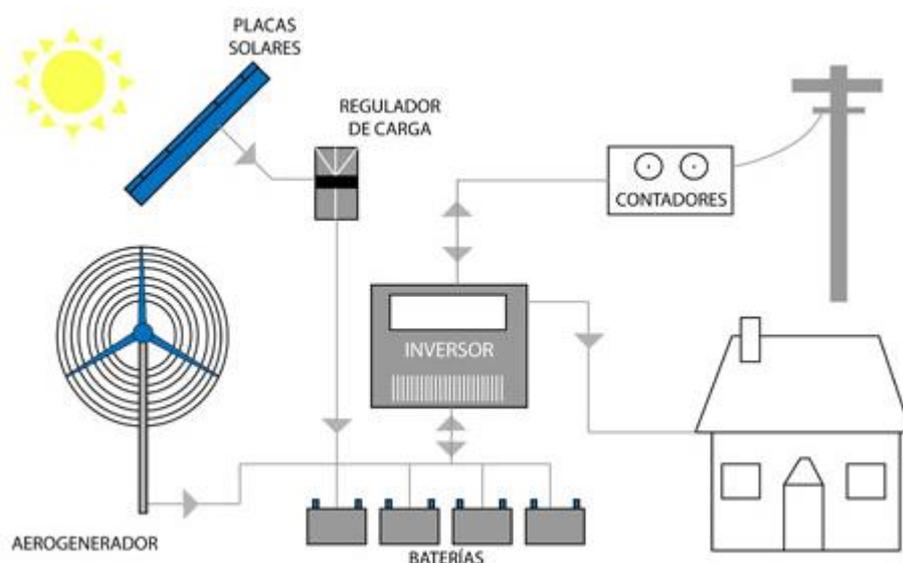


Figura 2.21 Sistema Híbrido Típico

## 2.5 Equipos de Control

### 2.5.1 Regulador

Es el cerebro del sistema, siendo su principal objetivo controlar los procesos de carga y descarga de la batería, para que esta funcione correctamente y alargue su vida útil. Esto lo logra mediante el monitoreo de la corriente e intensidad de la energía captada por el panel solar y el aerogenerador eólico. Una vez que la batería está totalmente cargada suspende la corriente de carga evitando sobretensiones, para lograrlo debe tomar en cuenta la temperatura ambiente y la energía de entrada. De igual manera al llegar la batería a su porcentaje máximo de descarga se interrumpe el consumo de corriente tomando en cuenta la temperatura ambiente y la intensidad de descarga, evitando de esta manera el fenómeno conocido como sulfatación. Todo este

control se lo realiza con dos relés, uno que controla el circuito de captación de energía y el otro que se encarga del circuito de entrega a los consumidores.

La tensión que debe tener el regulador está definida por la tensión de los captadores de energía y el conjunto de baterías. El relé de captación debe aguantar una intensidad dada por:

$$I_{R \text{ captación}} = I_S + I_O = N_P * i_{PM} + I_O \quad \text{Ec. 2.14}$$

Donde:

- $I_S$ : intensidad total de los paneles en paralelo.
- $N_P$ : número de paneles en paralelo
- $i_{PM}$ : intensidad máxima individual de un panel solar
- $I_O$ : intensidad máxima del generador eólico

El relé de consumo debe aguantar una intensidad dada por:

$$I_{R \text{ consumo}} = \sum I_i \quad \text{Ec. 2.15}$$

Donde:

- $I_i$ =intensidad de cada equipo

### 2.5.2 Batería

Son los elementos donde la microcentral almacenará el excedente de energía del sistema, para utilizarlo en condiciones de baja generación como la noche o falta de viento. Existen diversos tipos de batería, de las cuales las más utilizadas son de: plomo-ácido y níquel-cadmio. Las de níquel-cadmio ofrecen mayor duración aunque su costo sube de la misma manera.

Para aplicaciones de generación de energía las características esenciales son:

- Voltaje: Usualmente para paneles solares y aerogeneradores el voltaje de trabajo es de 12 V, por lo que las baterías también deben presentar este mismo

voltaje. Los vasos de una batería (usualmente 6) presentan voltajes de 2.04-2.09 en circuito abierto lo que al ponerlos en serie llega a 12.24-12.54. Al descargarse la batería el voltaje disminuye levemente hasta llegar al punto de corte donde cae drásticamente. Dependiendo de la intensidad con que se produzca la descarga del voltaje, la batería durará más o menos tiempo siendo este un factor de calidad de la misma.

- Intensidad de corriente: existen baterías estacionarias y de arranque, las primeras deben suministrar corriente mediante períodos prologados de tiempo y las otras grandes intensidades en poco tiempo. Para aplicaciones de generación se necesitan baterías estacionarias por sus largos períodos de uso.
- Capacidad: Es la cantidad de energía que puede extraerse de la batería sin que se produzcan daños a la misma, se mide en amperios hora (Ah). La capacidad está dada por:

$$C_N = \frac{1.1 * Cd * R}{V_N * PD_{max}} \quad \text{Ec. 2.16}$$

(Jutglar, 2004)

Donde:

Cd: consumo diario (Wh)

R: días de reserva (días)

V<sub>N</sub>: Voltaje nominal (V)

PD<sub>max</sub>: Profundidad de descarga (%)

- Ciclo de vida: debido a su constante carga y descarga, las baterías tienden a acortar su período de funcionamiento óptimo. A medida que se incrementa el nivel de descarga se reduce la vida útil de las baterías. En general no es

conveniente que las baterías lleguen a niveles de descarga por debajo del 40% de la carga.

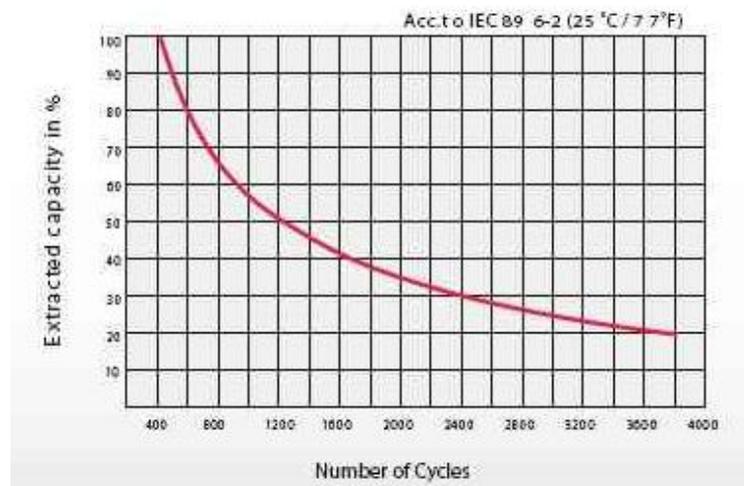


Figura 2.22 Ciclo de vida de la batería (Proviendo, 2014)

### 2.5.3 Inversor

Se trata de un componente esencial para la distribución de la energía generada por la microcentral. El voltaje de generación se halla en corriente continua y la mayoría de aparatos de consumo funcionan con corriente sinusoidal y este elemento es el encargado de transformar los 12V CC a 110VAC y su circuito básico se indica en la siguiente figura:

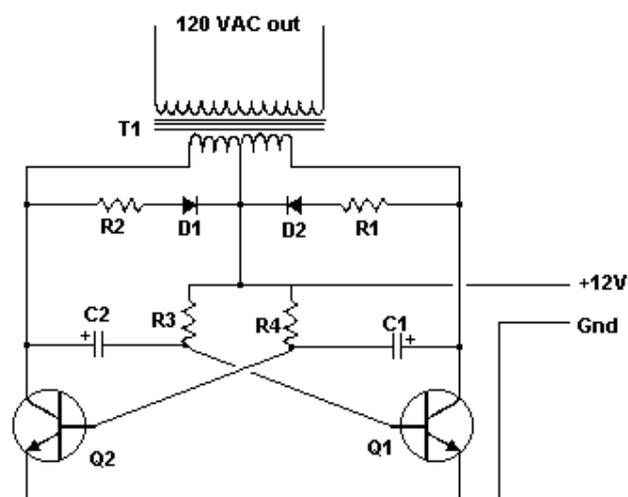


Figura 2.23 Circuito eléctrico del inversor (DAEnotes, 2014)

Sin la presencia de un inversor estaríamos limitados a utilizar componentes que únicamente funcionen con corriente continua. Al existir consumo de energía dentro del inversor, la potencia de entrada debe ser superior a la potencia dada a los consumidores y está dada por:

$$P_{salida} \geq \sum P_i \quad \text{Ec. 2.17}$$

$$P_{salida} = n * P_{entrada} \quad \text{Ec. 2.18}$$

Donde:

- $P_i$ : Potencia de cada consumidor (W)
- $n$ : rendimiento del inversor

Para evitar pérdidas de energía cuando no exista consumo, algunos fabricantes han desarrollado una etapa de control que desactiva al inversor cuando no hay demanda.

#### 2.5.4 Sensores

##### *Piranómetro*

Es un instrumento que mide la radiación total incidente sobre la superficie de la tierra en un campo de 180 grados. La medición se realiza en kilovatios por metro cuadrado. Generalmente consta de dos placas metálicas, una con superficie absorbente y otra con superficie reflectante. La medida de la radiación se basa en la diferencia de temperaturas de las dos placas y se mide con un termopar, mismo que está ubicado bajo una cubierta de cristal de cuarzo.



Figura 2.24 Piranómetro

Se puede modificar ligeramente al sensor para obtener la medida de otras radiaciones como por ejemplo: al ubicar el sensor de forma horizontal y eliminar las reflexiones se mide la radiación global y al recubrir con un disco opaco medirá únicamente la radiación difusa.

### ***Anemómetro***

Es un instrumento que sirve para medir la velocidad del viento. Los más utilizados son los anemómetros de rotación, compuestos por 3 o 4 cazoletas, de forma esférica o cónica, que giran alrededor de un eje vertical gracias a la fuerza del viento. Este instrumento contiene un transductor que es el encargado de convertir su giro en una señal mecánica o eléctrica. Otros tipos de anemómetros son: anemómetro de presión, anemómetro de hilo caliente entre otros.



Figura 2.25 Anemómetro

### ***Veleta***

Instrumento giratorio cuyos elementos son: una placa que gira libremente y un señalador. Esto le permite indicar la dirección del viento. Se usa usualmente junto a un anemómetro.



Figura 2.26 Veleta

### 2.5.5 Arduino

Es una plataforma electrónica para la realización de prototipos basado en la flexibilidad y las tecnologías libres. Está compuesto de una placa electrónica cuyo principal elemento es un microcontrolador. Puede realizar un sin número de tareas como: la recepción de datos de sensores, el control de motores, luces y diferentes actuadores y además presentan opciones amplias de comunicación. La programación del mismo se realiza mediante el lenguaje de programación propio de arduino (Arduino programming language) basado en Wiring.

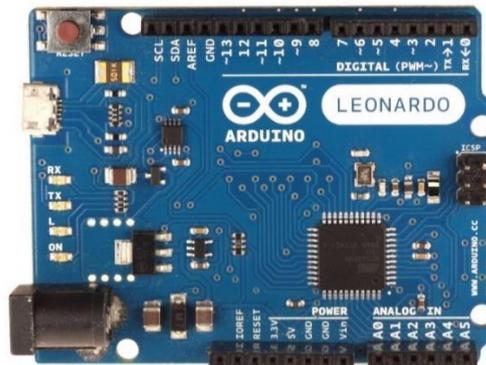


Figura 2.27 Arduino

Las tarjetas Arduino pueden ser ensambladas a mano o compradas, el software se lo puede descargar libremente de la página oficial de Arduino. Al ser creado bajo el concepto de software libre, este dispositivo ofrece un sinnúmero de ventajas como foros, código abierto y proyectos ya desarrollados que lo hacen una gran herramienta para el control de cualquier proyecto.

## CAPITULO 3

### DISEÑO MECATRONICO

#### 3.1 Estudio Climatológico

Para el inicio del diseño de la microcentral se optó por conocer primero las condiciones del entorno donde se va a ubicar. Para este análisis se realizó la toma de datos cada 10 minutos durante todo el mes de febrero del 2014, mediante la estación meteorológica Vantage-Pro que se halla instalada en la terraza del laboratorio de energías renovables a 10 m de altura. Se procede a comparar con los datos obtenidos de los Atlas Eólico y Solar publicados en los años 2013 y 2008 respectivamente.

Las especificaciones técnicas del equipo de medición Vantage-Pro para las variables medidas de radiación solar, velocidad y dirección del viento se indican a continuación:

Tabla 3.1  
Especificaciones Vantage-Pro

<b>Especificaciones Vantage-Pro</b>			
<b>Medida</b>	<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>	
<b>Velocidad del viento</b>	Resolución	m/s	0.1
	Precisión	m/s	1
	Rango	m/s	1 - 67
	Intervalo de actualización	s	2,5 - 3
<b>Dirección del viento</b>	Resolución	°	1
	Precisión	°	±7
	Intervalo de actualización	s	2,5 - 3
<b>Radiación solar</b>	Resolución	W/m <sup>2</sup>	1
	Rango	W/m <sup>2</sup>	0-1800
	Precisión	%	±5
	Intervalo de actualización	s	50-60

### 3.1.1 Recurso Solar

Para conocer el potencial solar de un determinado lugar, el punto de partida es determinar la insolación total o global que incide en un día sobre los módulos solares, expresada en KWh/m<sup>2</sup>/día, o su equivalente horas de sol pico (HSP) que son las horas al día equivalentes a las horas de luz solar con una radiación de 1000 Wh/m<sup>2</sup>. Este dato se obtiene al sumar la insolación total captada cada hora. En el mes de febrero se tomaron 4032 datos que corresponden a los 28 días del mes con una frecuencia de datos cada 10 min. Como primer paso para analizar el comportamiento de la radiación solar se obtiene un promedio por cada hora y se suma los datos de cada día que da como resultado:

Cuadro 3.1  
Radiación Solar en el mes de febrero en Wh/m<sup>2</sup>/día

Fecha	Rad.	Fecha	Rad.	Fecha	Rad.	Fecha	Rad.
2/1/2014	6739	2/8/2014	3576	2/15/2014	4696	2/22/2014	3627
2/2/2014	6118	2/9/2014	4677	2/16/2014	3973	2/23/2014	2927
2/3/2014	4706	2/10/2014	4066	2/17/2014	3843	2/24/2014	3075
2/4/2014	4029	2/11/2014	4708	2/18/2014	5233	2/25/2014	3449
2/5/2014	2450	2/12/2014	5322	2/19/2014	5015	2/26/2014	5651
2/6/2014	5697	2/13/2014	3946	2/20/2014	4708	2/27/2014	2648
2/7/2014	4951	2/14/2014	4786	2/21/2014	3422	2/28/2014	4129

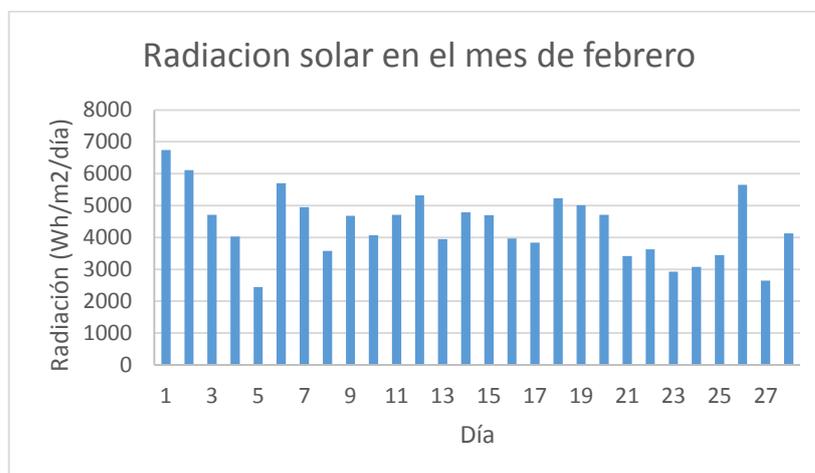


Figura 3.1 Radiación Solar en el mes de febrero



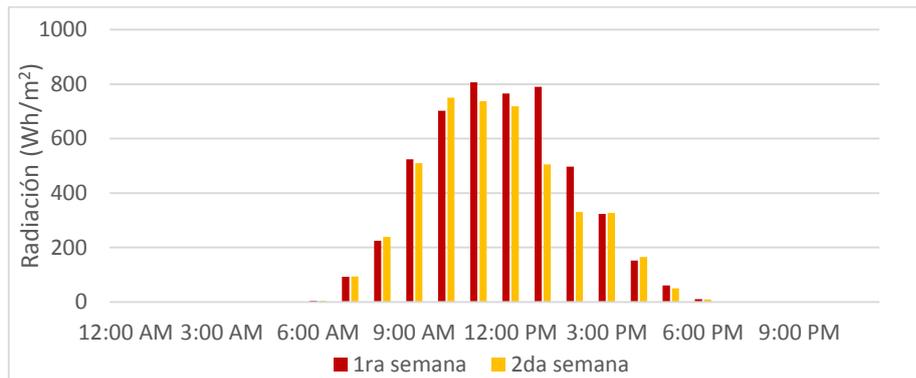


Figura 3.2 Radiación promedio semanas 1 y 2 (Feb. 2014)

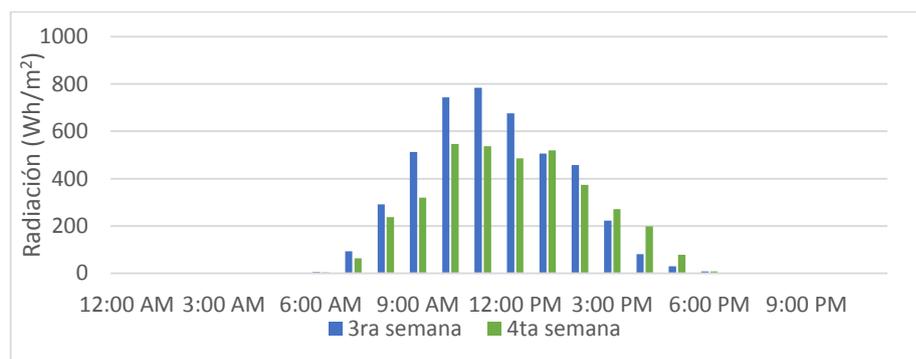


Figura 3.3 Radiación promedio semana 3 y 4 (Feb. 2014)

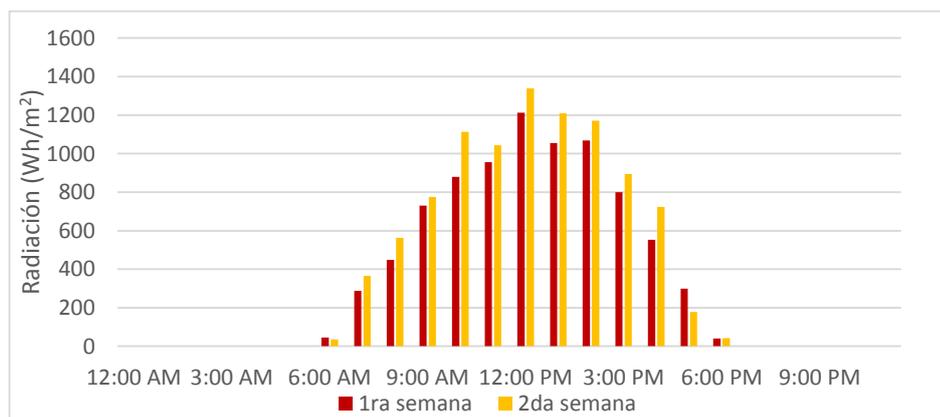


Figura 3.4 Radiación máxima semanas 1 y 2 (Feb. 2014)

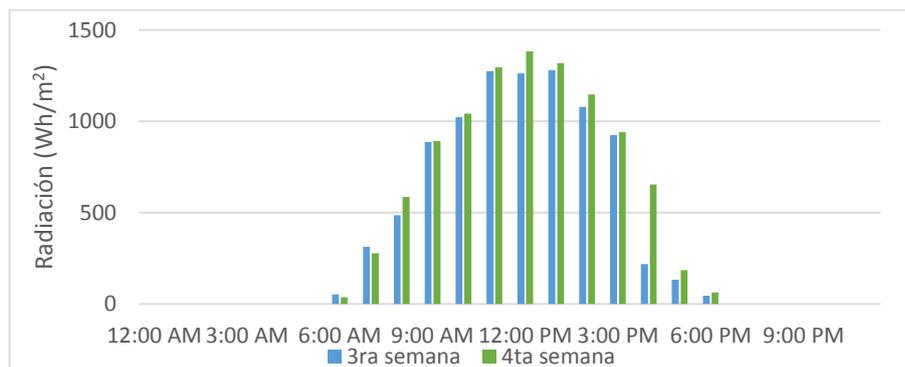


Figura 3.5 Radiación máxima Semanas 3 y 4 (Feb. 2014)

De estos datos se observa que las horas de luz solar al día son aproximadamente 12 y van desde las 6 AM hasta las 6 PM, siendo este período constante en todas las semanas, como es lógico en horas de la noche no se contará con nada de energía solar. Finalmente se puede observar los datos para el día más favorable, el día menos favorable y un día promedio de todo el mes.

**Cuadro 3.3**  
Radiación solar por días significativos Radiación (Feb. 2014)

Hora	Mas favorable		Menos favorable		Día promedio Radiación
	Rad solar	Rad. Max	Rad solar	Rad. Max	
12:00 AM	0	0	0	0	0
1:00 AM	0	0	0	0	0
2:00 AM	0	0	0	0	0
3:00 AM	0	0	0	0	0
4:00 AM	0	0	0	0	0
5:00 AM	0	0	0	0	0
6:00 AM	4	21	0	0	5
7:00 AM	83	207	22	53	86
8:00 AM	238	371	83	114	248
9:00 AM	611	714	242	359	467
10:00 AM	796	870	326	399	686
11:00 AM	918	949	360	417	716
12:00 PM	959	1005	220	387	662
1:00 PM	980	1044	343	438	580
2:00 PM	918	1069	284	346	415
3:00 PM	664	768	318	401	286
4:00 PM	406	543	181	232	149
5:00 PM	151	299	64	109	55
6:00 PM	13	40	8	21	9
7:00 PM	0	0	0	0	0
8:00 PM	0	0	0	0	0
9:00 PM	0	0	0	0	0
10:00 PM	0	0	0	0	0
11:00 PM	0	0	0	0	0
<b>Rad Total</b>	<b>6739</b>	<b>7900</b>	<b>2450</b>	<b>3276</b>	<b>4363</b>
<b>Wh/m<sup>2</sup>/día</b>					

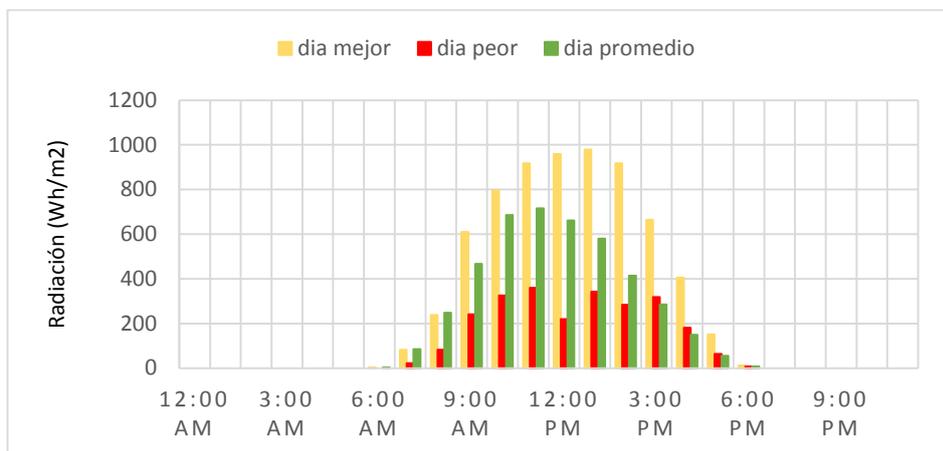


Figura 3.6 Radiación de días Significativos (Feb. 2014)

Incluso en el día menos favorable existe una radiación aceptable. Además se observa que la radiación del día promedio en el mes de febrero ofrece una radiación directa de  $4363 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$  lo que nos deja 4,4 horas de HSP. Posterior al estudio se obtienen los datos dados por el Atlas Solar del Ecuador.

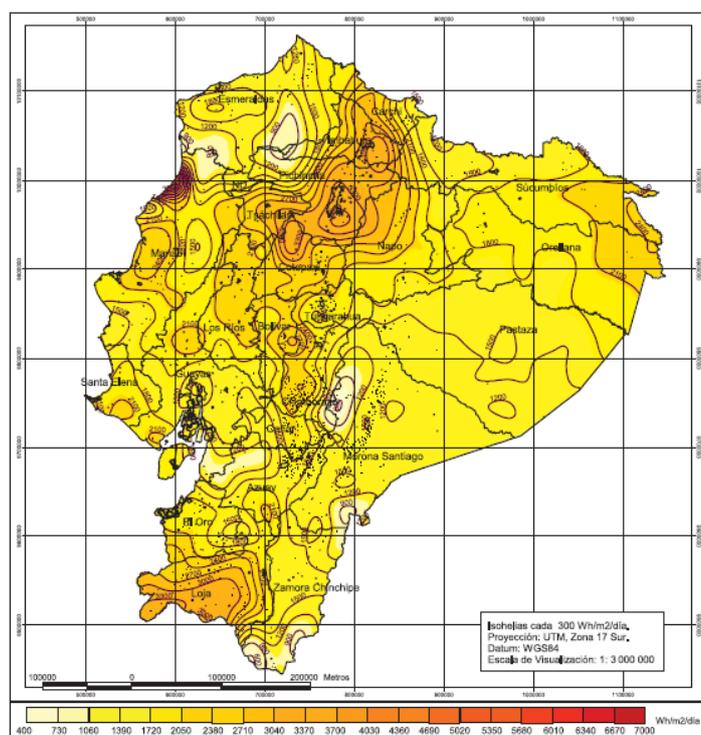


Figura 3.7 Radiación Solar directa en Febrero de Atlas Solar

De este mapa se obtiene que la radiación solar directa en el mes de febrero en el sector de Sangolquí se encuentra entre los  $4030$  y  $4360 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$  lo que se halla

similar al valor obtenido de la toma de datos. Al ser un estudio inicial y debido a la falta de datos en el lugar de aplicación, se procede a utilizar el atlas solar como un primer acercamiento. Lo que nos permite determinar la radiación presente en el sector de Sangolquí a lo largo del año. A continuación se presenta una tabla con los datos del sector según el atlas.

**Cuadro 3.4**  
Radiación Solar en el año en Wh/m<sup>2</sup>/día

Mes	Total	Mes	Total
<b>Enero</b>	5275	<b>Julio</b>	5800
<b>Febrero</b>	5100	<b>Agosto</b>	6010
<b>Marzo</b>	5100	<b>Septiembre</b>	5800
<b>Abril</b>	4750	<b>Octubre</b>	5675
<b>Mayo</b>	5275	<b>Noviembre</b>	5275
<b>Junio</b>	5625	<b>Diciembre</b>	5100
<b>Promedio</b>		<b>5400</b>	

Para un estudio futuro se recomienda realizar una toma de datos de cinco años y reajustar los cálculos presentados en el presente proyecto.

### 3.1.2 Recurso Eólico

El estudio climatológico constituye una gran fuente de información en generación eólica ya que permite estimar la potencia que se podrá producir y además permite determinar qué tipo de aerogenerador es el más indicado para aprovechar al máximo la energía disponible. La velocidad del viento es un aspecto muy importante ya que un pequeño cambio que se produzca en la velocidad implica una gran variación en el potencial eólico.

Se ha realizado un promedio semanal de los datos recopilados y se obtuvo su valor máximo.

Cuadro 3.5  
Promedios y máximos semanales (m/s) (Feb. 2014)

Hora del día	1ra semana		2da semana		3ra semana		4ta semana	
	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
<b>12:00 AM</b>	0,04	1,8	0,11	2,7	0,04	1,8	0,06	1,3
<b>1:00 AM</b>	0,04	2,2	0,05	2,2	0,00	1,3	0,02	1,3
<b>2:00 AM</b>	0,11	3,1	0,11	1,8	0,05	1,3	0,03	2,2
<b>3:00 AM</b>	0,07	2,2	0,05	1,8	0,04	1,8	0,08	2,2
<b>4:00 AM</b>	0,07	1,8	0,10	2,2	0,03	1,8	0,02	1,8
<b>5:00 AM</b>	0,02	1,8	0,13	1,8	0,07	2,2	0,02	2,2
<b>6:00 AM</b>	0,03	1,8	0,10	2,2	0,07	1,8	0,06	2,2
<b>7:00 AM</b>	0,05	1,8	0,17	2,7	0,14	2,2	0,25	2,7
<b>8:00 AM</b>	0,19	2,7	0,20	2,7	0,16	2,7	0,18	2,2
<b>9:00 AM</b>	0,35	3,1	0,35	2,7	0,52	3,6	0,17	2,7
<b>10:00 AM</b>	0,45	3,1	0,70	4,9	0,72	4,5	0,47	3,6
<b>11:00 AM</b>	0,77	4	0,97	6,7	0,70	3,6	0,50	4
<b>12:00 PM</b>	0,76	4	1,21	7,6	0,90	4,9	0,66	5,4
<b>1:00 PM</b>	0,88	6,3	1,46	9,4	0,90	5,4	0,92	6,3
<b>2:00 PM</b>	1,56	13,4	1,64	7,6	1,31	5,8	1,14	8
<b>3:00 PM</b>	1,59	8	1,66	7,6	1,58	7,6	1,13	8,9
<b>4:00 PM</b>	1,45	7,2	1,52	7,6	1,34	7,6	0,77	6,3
<b>5:00 PM</b>	0,81	7,2	1,29	6,3	0,90	7,2	0,66	5,8
<b>6:00 PM</b>	0,49	4,5	0,83	5,8	0,34	3,6	0,37	3,6
<b>7:00 PM</b>	0,26	2,2	0,29	3,1	0,14	2,2	0,19	2,2
<b>8:00 PM</b>	0,04	2,2	0,09	2,2	0,11	2,2	0,04	2,2
<b>9:00 PM</b>	0,02	1,8	0,02	2,7	0,09	2,2	0,02	1,3
<b>10:00 PM</b>	0,04	1,8	0,02	1,3	0,04	1,8	0,02	2,2
<b>11:00 PM</b>	0,00	1,3	0,06	4,5	0,01	1,3	0,03	1,3
<b>Promedio/Max</b>	0,42	13,40	0,55	9,40	0,42	7,60	0,33	8,90

Los datos obtenidos indican que las velocidades del viento promedio son muy bajas, la segunda semana de febrero presenta el valor medio más alto y solo alcanza 0,55 m/s, esto se debe a que aproximadamente desde las 19h00 hasta las 7h00 la velocidad del viento es casi nula. Durante cortos periodos de tiempo la velocidad aumenta llegando hasta un máximo de 13,40 m/s como se puede observar a las 2PM.

Las siguientes gráficas indican la variación de la velocidad del viento promedio y máxima a lo largo del día en cada semana del mes de febrero.

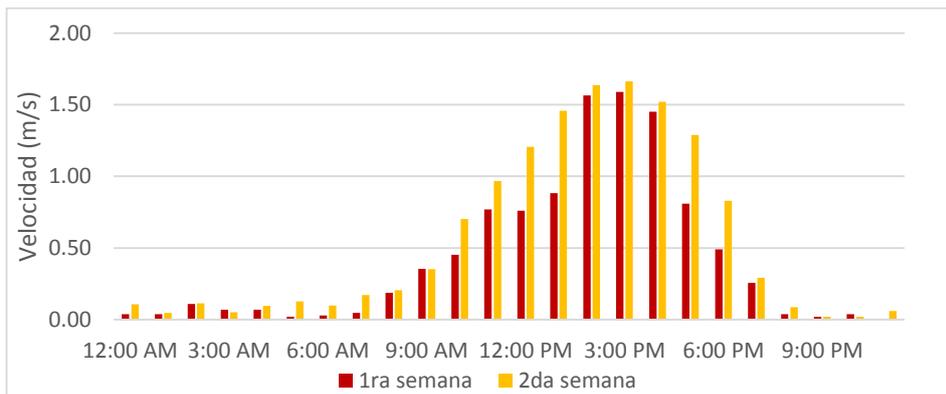


Figura 3.8 Velocidad promedio semanas 1 y 2 (Feb. 2014)

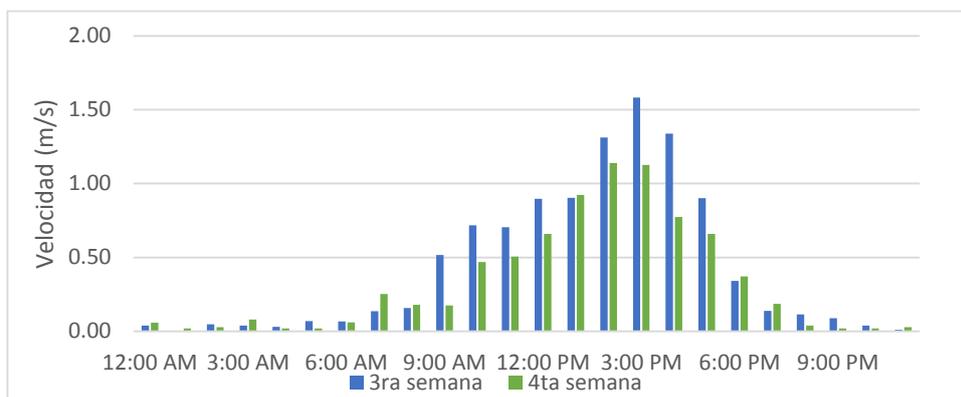


Figura 3.9 Velocidad promedio semanas 3 y 4 (Feb. 2014)

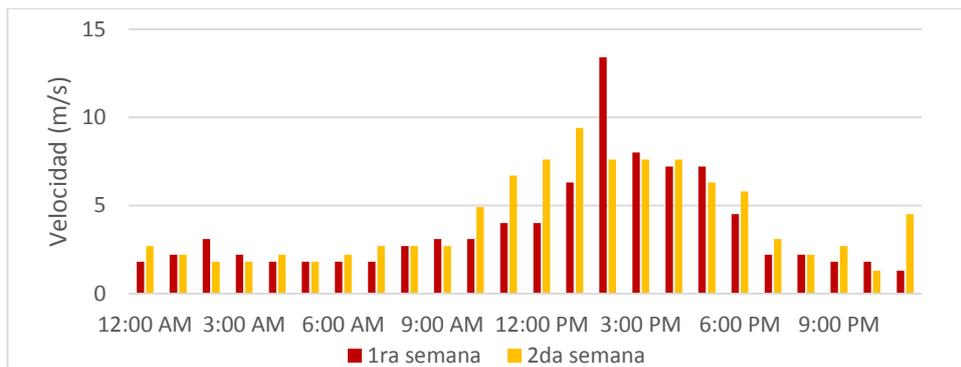


Figura 3.10 Velocidad máxima semanas 1 y 2 (Feb. 2014)

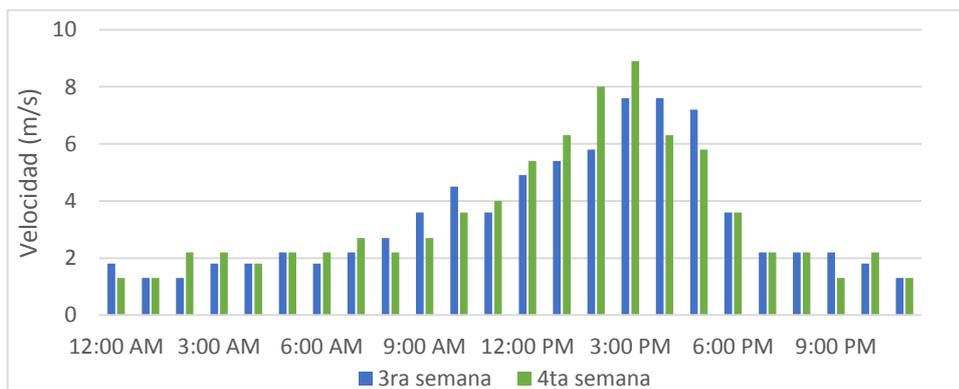


Figura 3.11 Velocidad máxima semanas 3 y 4 (Feb. 2014)

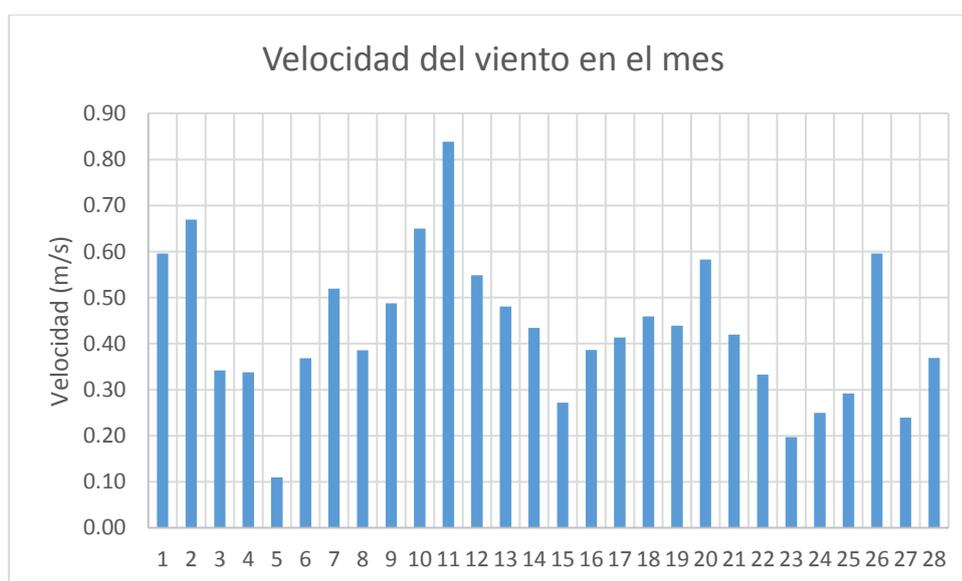
Las gráficas muestran que el mayor potencial eólico se producirá entre las 12h00 y las 18h00, en este período de tiempo los vientos alcanzan velocidades máximas de 13,5 m/s, sin embargo en promedio su velocidad está bajo los 2 m/s.

La siguiente tabla muestra el promedio diario de la velocidad del viento en el mes de febrero.

**Cuadro 3.6**

Promedios diarios de la velocidad del viento (m/s-Feb. 2014)

Fecha	Prom	Fecha	Prom	Fecha	Prom	Fecha	Prom
01/02/2014	0,60	08/02/2014	0,39	15/02/2014	0,27	22/02/2014	0,33
02/02/2014	0,67	09/02/2014	0,49	16/02/2014	0,39	23/02/2014	0,20
03/02/2014	0,34	10/02/2014	0,65	17/02/2014	0,41	24/02/2014	0,25
04/02/2014	0,34	11/02/2014	0,84	18/02/2014	0,46	25/02/2014	0,29
05/02/2014	0,11	12/02/2014	0,55	19/02/2014	0,44	26/02/2014	0,60
06/02/2014	0,37	13/02/2014	0,48	20/02/2014	0,58	27/02/2014	0,24
07/02/2014	0,52	14/02/2014	0,43	21/02/2014	0,42	28/02/2014	0,37



**Figura 3.12** Promedios diarios de la velocidad del viento (Feb. 2014)

Se observa que el valor máximo corresponde al 11/02/2014 con un promedio de 0,84 m/s y el mínimo corresponde al 05/02/2014 con un promedio de 0,11 m/s lo cual ratifica que las velocidades del viento en la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE son muy bajas.

A continuación se muestra la tabla y las gráficas del promedio y valores máximos del día más y menos favorable del mes de febrero y del día promedio.

Cuadro 3.7

Día mejor, día peor, día promedio (m/s-Feb. 2014)

Hora	Día mejor		Día peor		Día promedio	
	Prom	Max	Prom	Max	Prom	Max
<b>12:00 AM</b>	0,07	1,8	0,07	1,3	0,05	2,7
<b>1:00 AM</b>	0,00	0,4	0,00	0,9	0,02	2,2
<b>2:00 AM</b>	0,20	1,3	0,00	0,4	0,07	3,1
<b>3:00 AM</b>	0,00	0,9	0,00	0,9	0,05	2,2
<b>4:00 AM</b>	0,27	0,9	0,00	1,3	0,05	2,2
<b>5:00 AM</b>	0,07	1,3	0,00	0,9	0,05	2,2
<b>6:00 AM</b>	0,22	2,2	0,00	0,9	0,05	2,2
<b>7:00 AM</b>	0,22	1,8	0,13	1,3	0,13	2,7
<b>8:00 AM</b>	0,20	2,2	0,00	0,4	0,17	2,7
<b>9:00 AM</b>	0,65	2,7	0,00	1,3	0,32	3,6
<b>10:00 AM</b>	0,80	3,6	0,13	1,8	0,57	4,9
<b>11:00 AM</b>	1,92	6,7	0,20	1,8	0,75	6,7
<b>12:00 PM</b>	2,60	7,6	0,07	1,3	0,88	7,6
<b>1:00 PM</b>	3,58	9,4	0,13	2,2	0,98	9,4
<b>2:00 PM</b>	2,15	7,6	0,42	2,2	1,31	13,4
<b>3:00 PM</b>	2,52	7,2	0,57	3,1	1,39	8,9
<b>4:00 PM</b>	1,93	4,9	0,65	2,7	1,15	7,6
<b>5:00 PM</b>	1,02	6,3	0,00	1,8	0,82	7,2
<b>6:00 PM</b>	1,18	5,4	0,07	1,3	0,47	5,8
<b>7:00 PM</b>	0,28	2,2	0,20	2,2	0,23	3,1
<b>8:00 PM</b>	0,13	1,8	0,00	0,9	0,07	2,2
<b>9:00 PM</b>	0,00	0,9	0,00	0,9	0,04	2,7
<b>10:00 PM</b>	0,13	1,3	0,00	0,9	0,04	2,7
<b>11:00 PM</b>	0,00	0,4	0,00	0,4	0,03	4,5
<b>Prom/Max</b>	0,84	9,40	0,11	3,10	0,40	13,40

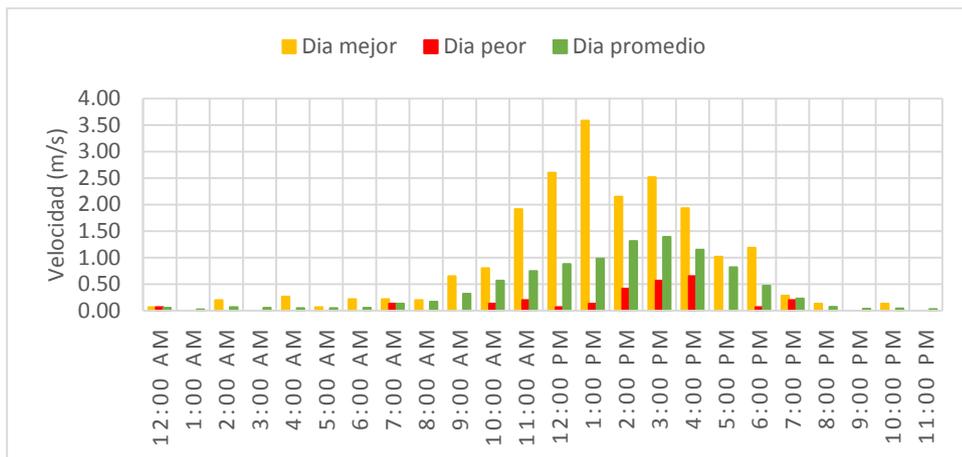


Figura 3.13 Velocidad promedio (Feb. 2014)

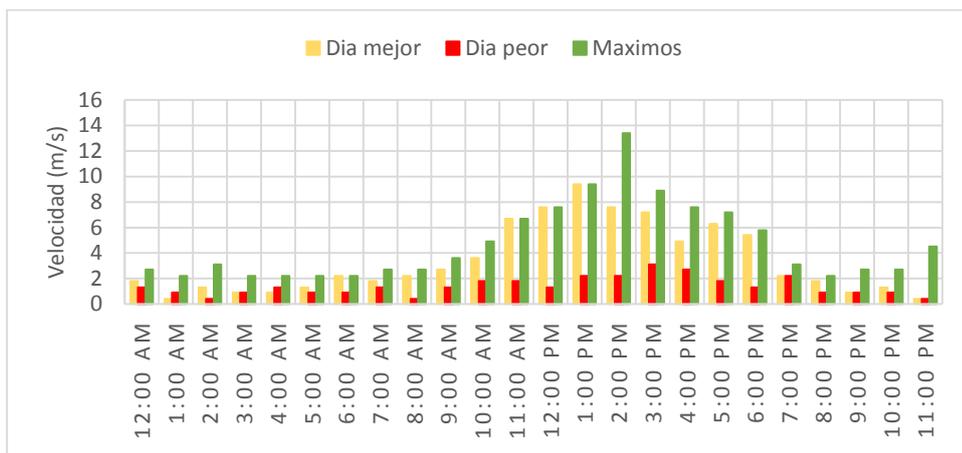


Figura 3.14 Velocidad máxima (Feb. 2014)

Diagrama de frecuencias: Para una mejor estimación del potencial eólico se realizó un diagrama de frecuencias que indica la distribución de los datos de la velocidad promedio cada diez minutos de acuerdo a los rangos de velocidades del viento establecidas y se obtiene el siguiente gráfica:

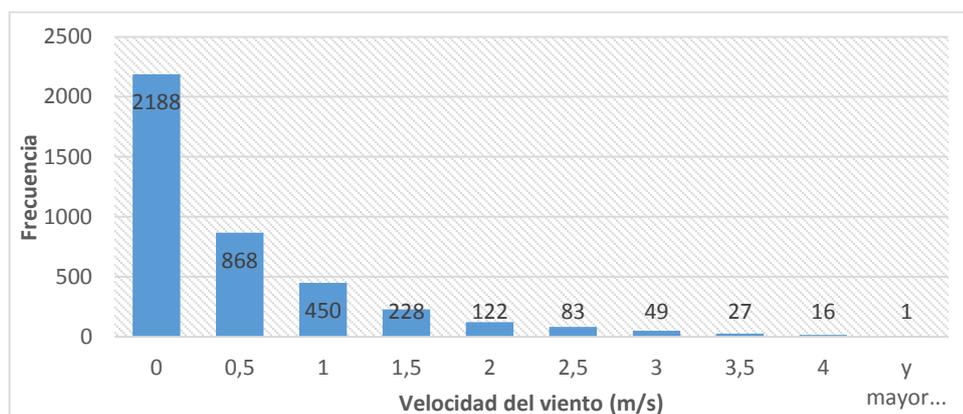


Figura 3.15 Histograma de la velocidad del viento (Feb. 2014)

**Cuadro 3.8**  
Frecuencias de la velocidad del viento (Feb. 2014)

<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Frecuencia</b>	<b>% acumulado</b>
<b>0</b>	2188	54,27%
<b>0,5</b>	868	75,79%
<b>1</b>	450	86,95%
<b>1,5</b>	228	92,61%
<b>2</b>	122	95,63%
<b>2,5</b>	83	97,69%
<b>3</b>	49	98,91%
<b>3,5</b>	27	99,58%
<b>4</b>	16	99,98%
<b>y mayor...</b>	1	100,00%

Como indica el histograma la mayor parte del tiempo existen velocidades de viento muy bajas, el 54% del tiempo el viento tiene velocidades menores a 0,5 m/s y tan solo alrededor del 5% se generan velocidades superiores a los 2 m/s. En promedio la velocidad del viento es 0,43 m/s lo que lo hace un lugar con un potencial eólico muy bajo para el aprovechamiento de energía.

El atlas eólico del Ecuador realizado por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable fue creado con la finalidad de conocer el potencial eólico en el Ecuador para la generación de energía eléctrica a mediana y gran escala por lo cual los datos de velocidad del viento han sido tomados a 40, 60 y 80 m de altura.

El promedio anual de la velocidad del viento a 80 m sobre el suelo en la provincia de Pichincha se muestra en el siguiente gráfico, el cual indica que el promedio de la velocidad del viento en Sangolquí varía de 4 a 5 m/s.

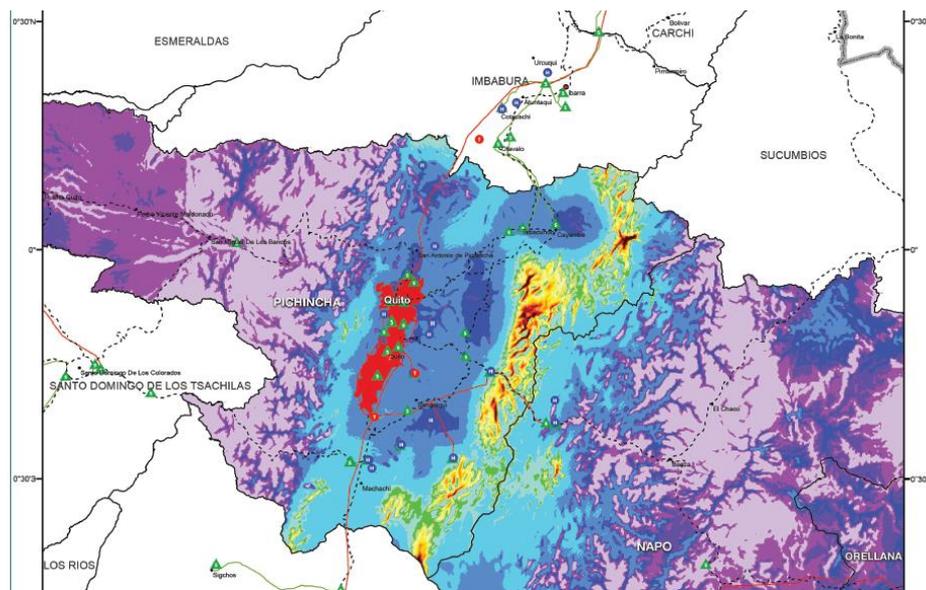


Figura 3.16 Velocidad del viento anual en Pichincha

Velocidad Media Anual del Viento a 80 m			
km/h		m/s	
	<10.8	<3.0	
	10.8 - 12.6	3.0 - 3.5	
	12.6 - 14.4	3.5 - 4.0	
	14.4 - 16.2	4.0 - 4.5	
	16.2 - 18.0	4.5 - 5.0	
	18.0 - 19.8	5.0 - 5.5	
	19.8 - 21.6	5.5 - 6.0	
	21.6 - 23.4	6.0 - 6.5	
	23.4 - 25.2	6.5 - 7.0	
	25.2 - 27.0	7.0 - 7.5	
	27.0 - 28.8	7.5 - 8.0	
	28.8 - 30.6	8.0 - 8.5	
	30.6 - 32.4	8.5 - 9.0	
	32.4 - 34.2	9.0 - 9.5	
	34.2 - 36.0	9.5 - 10.0	
	> 36.0	> 10.0	

Figura 3.17 Leyenda Velocidades del viento

El atlas eólico además presenta un promedio mensual de la velocidad del viento en el Ecuador, los mapas indican que existe un mayor potencial desde el mes de Mayo al mes de Agosto alcanzando velocidades de 8 m/s. Estos datos tienen una gran variación con respecto a los datos adquiridos pero hay que tomar en cuenta que han sido tomados a 80 m sobre el suelo y sin perturbaciones, como lo es la presencia de árboles o edificios cercanos.

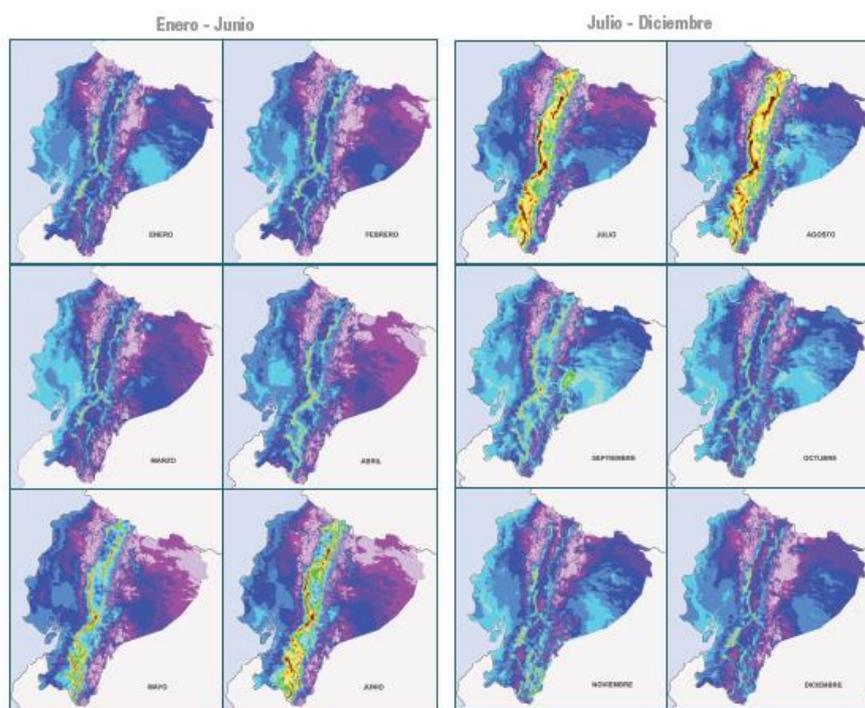


Figura 3.18 Velocidad media mensual del viento

El sistema híbrido se instalará a 10 m sobre el nivel del suelo, para conocer el recurso eólico presente en esta altura se utiliza la ecuación Ec 2.3 en base a los datos de velocidad a 80 m de altura obtenidos del atlas y con un coeficiente de rugosidad o exponente de Hellmann de 0.28 que pertenece a pueblos, bosques o terrenos accidentados y desiguales, consiguiendo los siguientes resultados:

Cuadro 3.9  
Variación de la velocidad

Mes	80 m	10 m	Mes	80 m	10 m
<b>Enero</b>	3	1.68	<b>Julio</b>	4.5	2.51
<b>Febrero</b>	3	1.68	<b>Agosto</b>	4.5	2.51
<b>Marzo</b>	3.5	1.96	<b>Septiembre</b>	4	2.23
<b>Abril</b>	3.5	1.96	<b>Octubre</b>	3.5	1.96
<b>Mayo</b>	4	2.23	<b>Noviembre</b>	3	1.68
<b>Junio</b>	4.5	2.51	<b>Diciembre</b>	3	1.68

Estos datos son los únicos promedios mensuales que existen respecto a la variación del viento para el sector de Sangolquí, debido a esto y al ser un estudio inicial se los van a utilizar en el desarrollo del presente proyecto.

### 3.2 Definición de Carga

En lo que se refiere a una carga para el presente módulo se ha propuesto usar una carga máxima de  $\frac{1}{2}$  Hp o 367W durante un período de 4 horas diarias, lo que significa que diariamente se puede consumir una energía de 1468 Wh, se debe tomar en cuenta que la carga máxima que se puede conectar simultáneamente es de: 350W en AC y 17W en DC o 240W en DC y 127W en AC. A continuación se presentan equivalencias de cargas para determinar qué tipo de equipos pueden estar conectados en el día.

Cuadro 3.10  
Equipos de oficina

Equipo	Pot (W)	horas	Energía (Wh)
2 PC portátil 65 W	130	4	520
PC escritorio pequeña	70	4	280
Router	30	4	120
Impresora multifunción	27	1	27
Radio	20	2	40
Lámpara fluorescente	32	4	128
Humidificador	36	1	36
4 focos fluorescentes 15 W	60	4	240
<b>Energía diaria consumida</b>			<b>1391</b>

Cuadro 3.11  
Equipos para un minidepartamento

Equipo	Pot (W)	horas	Energía (Wh)
Afeitadora	15	0.2	3
Equipo de sonido	120	2	240
PC portátil	65	6	390
Cargador de celular	5	2	10
Lector-Reproductor CD/DVD	25	2	50
Purificador de aire	55	2	110
2 focos fluorescentes 15 W	30	5	150
Lámpara fluorescente	32	4	128
LCD, 23 pulgadas	43	4	172
Nintendo Wii	18	2	36
<b>Energía diaria consumida</b>			<b>1289</b>

A continuación se muestra el funcionamiento de la estación para equipos individuales:

Cuadro 3.12  
Equipos de conexión individual

<b>Equipo</b>	<b>Potencia</b>	<b>Máxima de horas</b>	<b>Energía consumida</b>
<b>Lavadora 6 kg</b>	330	4	1320
<b>Máquina de coser</b>	125	11	1375
<b>Secadora de ropa 5 kg</b>	270	5	1350
<b>LCD 42 pulgadas</b>	236	5	1180

Para realizar las pruebas en el sistema híbrido se utilizará una carga experimental conformada por focos de diferentes potencias que permitan simular las condiciones de trabajo real.

Cuadro 3.13  
Banco de pruebas

<b>Equipo</b>	<b>Potencia (W)</b>
<b>2 focos incandescentes 100 W</b>	200
<b>6 focos fluorescentes 60 W</b>	360
<b>1 foco fluorescente 25 W</b>	25

### 3.3 Módulo Fotovoltaico

#### 3.3.1 Dimensionamiento y Selección del panel fotovoltaico

Para realizar el dimensionamiento del módulo fotovoltaico se debe tomar en cuenta el mes en el cual la irradiación sobre la superficie inclinada es menor para que la demanda sea satisfecha durante todo el año.

Los factores a tomar en cuenta para determinar cuál es el mes con menor potencial son la orientación de los paneles y la radiación global la cual fue analizada en el estudio climatológico.

### *Orientación de los paneles solares*

Para obtener una eficiente captación de energía es necesario analizar dos ángulos para la posición de los paneles, estos son:

- Angulo de Azimut ( $\alpha$ ): ángulo que mide la desviación respecto al sur en el hemisferio norte y respecto al norte en el hemisferio sur.
- Angulo de Inclinación ( $\beta$ ): ángulo formado por la superficie del módulo y el plano horizontal.

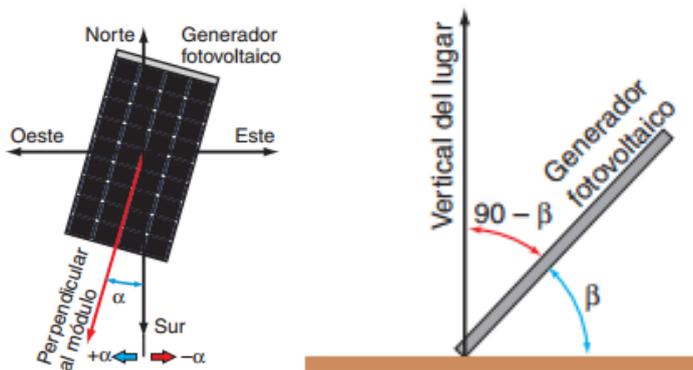


Figura 3.19 Angulos Acimut y de Inclinación (Perez, 2013)

La Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE tiene una ubicación privilegiada en lo que se refiere a captación de Energía solar al estar a  $-0.31^\circ$  de Latitud y a  $-78.44$  de Longitud. El ángulo Azimut debe ser cero para una eficiente captación y por estar ubicados en el hemisferio Sur el panel debe ser orientado hacia el norte. Para determinar la inclinación del panel se debe tomar en cuenta que la máxima altura que alcanza el sol varía según las estaciones, por lo tanto debe elegirse un ángulo que maximice el ajuste entre la captación y la demanda de energía en base a los siguientes criterios:

- En instalaciones con consumos similares a lo largo del año se debe optimizar la captación durante los meses de invierno, conociendo el ángulo de latitud de la ubicación ( $\varphi$ ), se aplica en la siguiente fórmula:

$$\beta = |\varphi| + 10^\circ \quad \text{Ec 3.1}$$

- En instalaciones con consumos inferiores en invierno se utiliza un ángulo de inclinación equivalente al valor absoluto de la latitud del lugar.
- En instalaciones donde solo se realizan consumos en verano, como riego, se utiliza la siguiente fórmula para determinar la inclinación.

$$\beta = |\varphi| - 10^\circ \quad \text{Ec 3.2}$$

El sistema está diseñado para una carga constante a lo largo del año por lo que el ángulo obtenido es de  $10.31^\circ$ , sin embargo para evitar acumulaciones de polvo, agua y demás, se recomienda no instalar con ángulos inferiores a  $15^\circ$ .

### ***Determinación del mes menos favorable***

El mes en el que los paneles solares produzcan menor cantidad de energía será el determinante al momento de realizar el dimensionamiento del módulo fotovoltaico, esto se logra mediante la obtención de la corriente necesaria para la demanda determinada anteriormente.

La energía producida por los paneles solares con su respectiva inclinación de  $15^\circ$  y orientada hacia el norte viene dada por la siguiente fórmula:

$$G_{dm}(\beta) = A * G_{dm}(0) + B * (G_{dm}(0))^2 \quad \text{Ec 3.3}$$

Donde:

- $G_{dm}(\beta)$  : Irradiación global sobre el plano inclinado (KWh/m<sup>2</sup>/día)
- $G_{dm}(0)$  : Irradiación global (KWh/m<sup>2</sup>/día)

- A: Factor A dependiente del coeficiente de reflexión y el ángulo de inclinación  $\beta$
- B: Factor B dependiente de la latitud y del ángulo de inclinación  $\beta$

Los coeficientes A y B se han obtenido de tablas para una latitud de  $0^\circ$ , un ángulo de inclinación  $\beta$  de  $15^\circ$  y un coeficiente de reflexión de 0.2 para suelo seco.

Además se calcula la corriente necesaria en cada mes mediante la fórmula:

$$I_m = \frac{E_{total}}{G_{dm}(\beta) * V_N} * 1 \frac{KWh}{m^2} \quad \text{Ec 3.4}$$

Los cálculos realizados para cada mes se indican en el siguiente cuadro:

Cuadro 3.14  
Cálculo de corriente necesaria en cada mes

	Unidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Inc. (B)</b>	°	15	15	15	15	15	15
<b>Factor A</b>		0.986	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986
<b>Gdm(0)</b>	KWh/m2/día	5.275	5.1	5.1	4.75	5.275	5.675
<b>Factor B</b>		0.0155	0.0085	0	-0.0093	-0.0177	-0.0223
<b>(Gdm(0))^2</b>		27.83	26.01	26.01	22.56	27.83	32.21
<b>Gdm(B)</b>	KWh/m2/día	5.63	5.25	5.03	4.47	4.71	4.88
<b>Energía</b>	Wh/día	1468	1468	1468	1468	1468	1468
<b>Im</b>	A	21.72	23.30	24.33	27.35	25.98	25.08
	Unidad	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>Inc. (B)</b>	°	15	15	15	15	15	15
<b>Factor A</b>		0.986	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986
<b>Gdm(0)</b>	KWh/m2/día	5.8	6.01	5.8	5.675	5.275	5.1
<b>Factor B</b>		-0.0202	-0.0127	-0.0034	0.0058	0.0138	0.0178
<b>(Gdm(0))^2</b>		33.64	36.12	33.64	32.21	27.83	26.01
<b>Gdm(B)</b>	KWh/m2/día	5.04	5.47	5.60	5.78	5.59	5.49
<b>Energía</b>	Wh/día	1468	1468	1468	1468	1468	1468
<b>Im</b>	A	24.28	22.38	21.83	21.16	21.90	22.28

Los datos obtenidos indican que el mes con menor potencial es Abril con una energía captada de 4.47 KWh/m<sup>2</sup>/día y para un consumo de 1468 Wh/día se requiere una corriente de 27.35 A a voltaje nominal de 12 V.

Por esta razón para dimensionar el modulo fotovoltaico se utilizará la radiación global incidente sobre la superficie inclinada correspondiente al mes de Abril.

### *Selección de los paneles fotovoltaicos*

Para la selección de un panel fotovoltaico se deben tomar en cuenta principalmente las características técnicas propias de los mismos. A continuación se presenta una tabla de las principales características de los paneles solares existentes en el mercado:

Tabla 3.2  
Características técnicas de Paneles solares

<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>GMA 85P</b>	<b>ISOFOTON</b>	<b>SM536-95</b>
<b>Potencia max</b>	Pp(W)	85	110	95
<b>Voltaje máximo</b>	Vp(V)	18.06	17.4	17.8
<b>Corriente máxima</b>	Ip(A)	4.7	6.32	5.33
<b>Voltaje de circuito abierto</b>	Voc(V)	21.98	21.6	22.2
<b>Corriente en corto</b>	Isc(A)	5.07	6.76	5.79
<b>Dimensiones</b>	mm	889x667	1100x540	1200x540
<b>Peso</b>	kg	8	8	8
<b>Eficiencia</b>	%	11.4	12.9	17.8
<b>Costo</b>	\$	212.52	140	200

Para una mejor selección es necesario calcular el número de paneles a comprar en cada uno de los casos mediante la carga predefinida de  $\frac{1}{2}$  Hp y un uso de 4 horas al día. En la siguiente tabla se procede a realizar el cálculo del número de paneles mediante la ecuación 2.2. El valor obtenido es la cantidad de paneles teórica, esto indica que se debe utilizar un factor de rendimiento del sistema de distribución ya que siempre existirán pérdidas a lo largo de la generación. Para los cálculos se asume que el rendimiento del sistema es 0.75 que corresponde al producto de las eficiencias del regulador, inversor y baterías. Posterior a esto se procede a aproximar el número de paneles y calcular el costo total de módulo fotovoltaico.

Cuadro 3.15  
Cálculo de número de paneles

<b>Paneles Solares</b>	<b>Unidad</b>	<b>GMA 85P</b>	<b>ISOFOTON</b>	<b>SM536-95</b>
<b>Carga</b>	W	367	367	367
<b>Horas</b>	h	4	4	4
<b>Energía diaria</b>	Wh	1468	1468	1468
<b>Radiación Solar al día</b>	Wh/m <sup>2</sup>	4470	4470	4470
<b>Duración solar HSP</b>	h/día	4.5	4.5	4.5
<b>Energía del panel</b>	Wp	85	110	95
<b>Num de paneles teórico</b>		3.86	2.99	3.46
<b>Rend. sist. Distribución</b>	%	75	75	75
<b>Total de Paneles</b>		5.15	3.98	4.61
<b>Costo unitario</b>	\$	212.52	140.00	200.00
<b>Costo total</b>	\$	1062.60	560.00	1000.00

La valoración de los principales criterios a evaluar y las calificaciones de cada uno de los modelos se realiza mediante los siguientes parámetros, los mismos que serán usados para la selección de todos los elementos del sistema híbrido.

Tabla 3.3  
Parámetros de la matriz de criterios

<b>Valoración de criterios</b>	Determinante	Importante	Menos relevante
	15	10	5
<b>Calificación de modelos</b>	Excelente	Bueno	Regular
	5	3	1

Cuadro 3.16  
Matriz de criterios para la selección del panel solar

<b>Criterios a evaluar</b>	<b>Valora- ción</b>	<b>GMA 85P</b>		<b>Isofoton</b>		<b>SM536-95</b>	
		<b>/5</b>	<b>/val</b>	<b>/5</b>	<b>/val</b>	<b>/5</b>	<b>/val</b>
<b>Cump. de requisitos</b>	15	3	9	5	15	3	9
<b>Disponibilidad</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Mantenimiento</b>	10	5	10	1	2	5	10
<b>Costos</b>	15	1	3	5	15	1	3
<b>Eficiencia</b>	10	1	2	3	6	5	10
<b>Tamaño</b>	5	3	3	5	5	3	3
<b>Durabilidad</b>	10	5	10	1	2	5	10
<b>Instalación</b>	10	3	6	5	10	3	6
<b>Seguridad</b>	10	3	6	3	6	3	6
<b>Peso</b>	5	5	5	5	5	5	5
<b>Total</b>	100		64		76		72

En base a los criterios de evaluación establecidos en la matriz se determina que el panel fotovoltaico más apropiado para el sistema es el ISOFOTON I110-12 por cumplir con mayor proximidad con los requisitos de la instalación y su bajo costo.

Se instalarán cuatro paneles fotovoltaicos de este modelo en paralelo obteniendo una potencia instalada de 440 Wp y voltaje nominal de 12 V.



Figura 3.20 Isofoton i110-12

### 3.3.2 Análisis del módulo Fotovoltaico

El módulo fotovoltaico consta de cuatro paneles solares ISOFOTON i110-12, cada panel tiene las siguientes características físicas y eléctricas:

Tabla 3.4  
Características físicas del panel fotovoltaico

Características físicas	
<b>Altura</b>	1310 mm
<b>Ancho</b>	652 mm
<b>Espesor</b>	34 mm
<b>Peso</b>	11 kg

Tabla 3.5  
Características eléctricas del módulo fotovoltaico

Características eléctricas	
<b>Potencia pico (Pmax)</b>	110 W
<b>Corriente de cortocircuito (Isc)</b>	6.76 A
<b>Tensión de circuito abierto (Voc)</b>	21.6 V
<b>Corriente de máxima potencia (Imax)</b>	6.32 A
<b>Tensión de máxima potencia (Vmax)</b>	17.4 V

Los cuatro paneles solares fotovoltaicos que ocupan un área de 3.42 m<sup>2</sup>, se conectan en paralelo para mantener su voltaje y aumentar su corriente y por

consiguiente su potencia de generación, por lo tanto el conjunto de paneles tendrá una potencia pico de 440 W y una corriente de máxima potencia de 25.28 A

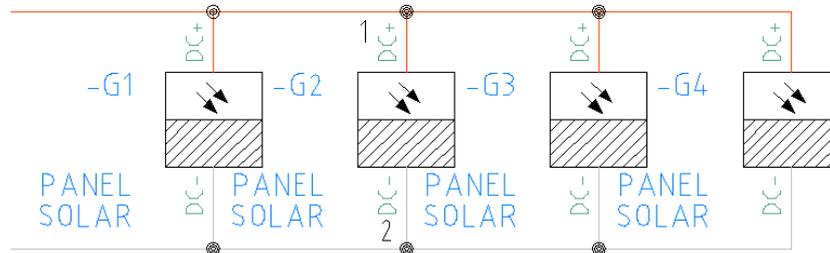


Figura 3.21 Circuito eléctrico de paneles fotovoltaicos

Estos valores de corriente y potencia se obtienen en condiciones estándares de medida que corresponden a una radiación de  $1000 \text{ W/m}^2$  y una temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$ , sin embargo las condiciones de trabajo pueden ser diferentes, las variaciones que podrían producirse se indican en los siguientes gráficos:

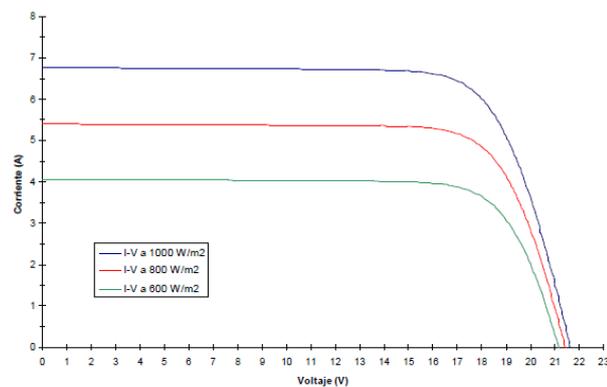


Figura 3.22 Variación de curva I-V a  $25^\circ\text{C}$  (ISOFOTON, 1999)

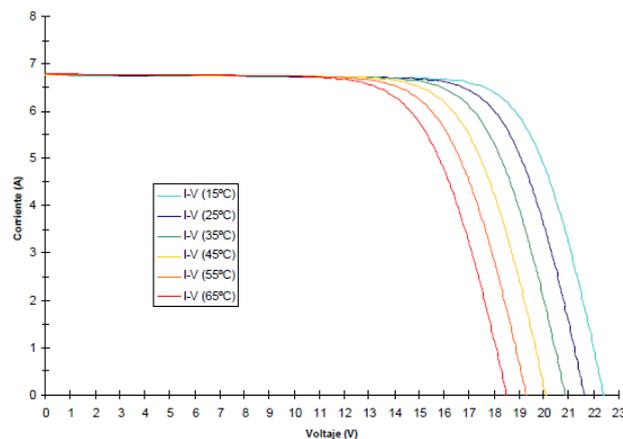


Figura 3.23 Variación de la curva I-V a  $1000 \text{ W/m}^2$  (ISOFOTON, 1999)

En las gráficas se puede observar que a medida que disminuye la radiación también disminuye la corriente generada por el panel fotovoltaico y a medida que aumenta la temperatura se disminuye el voltaje.

Hay que tener en cuenta que la temperatura de la célula a que nos hemos estado refiriendo no coincide con la temperatura ambiente debido a que la célula, se calienta al incidir la luz del sol.

En función de la radiación incidente, la temperatura y la carga que esté alimentando, un módulo fotovoltaico podrá trabajar a distintos valores de corriente y tensión.

### ***Eficiencia del módulo fotovoltaico***

La eficiencia del módulo fotovoltaico que es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel se obtiene mediante la Ec. 2.1.

En este caso, el módulo fotovoltaico produce 440 Wp y tiene un área de 3.42 m<sup>2</sup> y a una radiación estándar de 1000 W/m<sup>2</sup> se obtiene:

$$\eta = \frac{440}{3.42 * 1000}$$

$$\eta = 12.8 \%$$

La eficiencia de conversión del módulo a instalar es de 12.8%. La media obtenida por las células disponibles comercialmente está alrededor del 11-12%, pero según la tecnología utilizada varía desde el 6% de las células de silicio amorfo hasta el 14-19% de las células de silicio monocristalino.

### ***Producción estimada del módulo fotovoltaico***

La energía promedio que generará el módulo fotovoltaico se obtiene mediante la fórmula:

$$E_p = P_p * HSP * \eta \quad \text{Ec 3.5}$$

Donde:

- Ep: Energía promedio (Wh)
- Pp: Potencia pico (W)
- HSP: Duración solar (horas)
- $\eta$ : Eficiencia

Se toman los datos mensuales obtenidos del atlas para la duración solar, los paneles tienen en conjunto una potencia pico de 440 W y se utilizará una eficiencia de 0.75 para el sistema de distribución.

**Cuadro 3.17**  
Estimación de generación fotovoltaica anual

Mes	HSP	Días	Wh/día	Wh/mes
<b>Enero</b>	5.275	31	1740.8	53963.3
<b>Febrero</b>	5.100	28	1683.0	47124.0
<b>Marzo</b>	5.100	31	1683.0	52173.0
<b>Abril</b>	4.750	30	1567.5	47025.0
<b>Mayo</b>	5.275	31	1740.8	53963.3
<b>Junio</b>	5.675	30	1872.8	56182.5
<b>Julio</b>	5.800	31	1914.0	59334.0
<b>Agosto</b>	6.010	31	1983.3	61482.3
<b>Septiembre</b>	5.800	30	1914.0	57420.0
<b>Octubre</b>	5.675	31	1872.8	58055.3
<b>Noviembre</b>	5.275	30	1740.8	52222.5
<b>Diciembre</b>	5.100	31	1683.0	52173.0
<b>Total</b>				<b>651118.1</b>

### 3.4 Sistema Eólico

#### 3.4.1 Selección del Generador Eólico

Para realizar la selección del aerogenerador se debe establecer el tipo de rotor que presente las características óptimas y facilidades para su implementación en la

Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE tomando en cuenta que las velocidades del viento que se presentan son bajas.

Los aerogeneradores principalmente se clasifican por su eje de rotación que puede ser horizontal y vertical, los aerogeneradores más comunes son los de eje horizontal, estos presentan una mayor eficiencia ya que al estar situados a una altura mayor del suelo en relación a los de eje vertical aprovechan de mejor manera las corrientes de aire. Los aerogeneradores de eje vertical por su parte no tienen una eficiencia muy grande pero trabajan a bajas velocidades de viento y no necesitan un mecanismo de orientación, además son de fácil construcción y mantenimiento. Uno de los principales inconvenientes de estos aerogeneradores es que no existe una gran comercialización y los que se encuentran en el mercado tienen un alto costo.

La siguiente imagen indica la variación del coeficiente de potencia y la razón de velocidad de los distintos tipos de aerogeneradores en donde se puede notar que el rotor tripala es el que más aprovecha la energía del viento ya presenta un coeficiente de potencia alto en relación a los demás aerogeneradores sin embargo necesita una velocidad del viento mayor para la generación de energía.

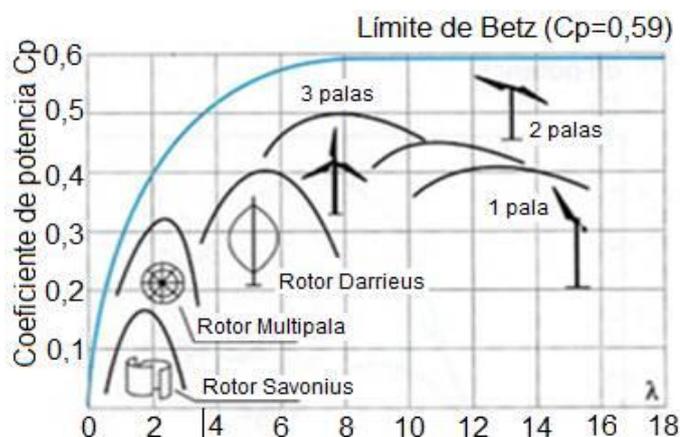


Figura 3.24 Coeficiente de potencia de los principales rotores (Fariñas, 2013)

Tomando en cuenta las bajas velocidades presentes en el lugar de aplicación los rotores multipala y Savonius son los más recomendables.

Continuando el proceso de selección se elegirá el rotor multipala más favorable para las condiciones de la microcentral y este se lo comparará con las fórmulas del diseño teórico del Savonius para conocer la mejor opción. A continuación se muestra los principales rotores multipala presentes en el mercado.

Tabla 3.6  
Características técnicas del aerogenerador

Características	Unidad	ALEKO WG450	GudCraft WG300	Generic Wind
Número de palas		5	6	3
Potencia nominal	W	250	125	300
Potencia máxima	W	450	300	400
Velocidad de arranque	m/s	2.5	2	3.5
Velocidad nominal	m/s	10	12.5	12.5
Diámetro del rotor	m	1.3	1.12	1.16
Peso	lb	50	26	16.8
Costo	\$	300	300	400

Posteriormente se procede a realizar una matriz de criterios para la selección, teniendo en cuenta las características técnicas de los mismos.

Cuadro 3.18  
Matriz de criterios para la selección del aerogenerador

Criterios a evaluar	Valora- ción	ALEKO WG450		GudCraft WG300		Generic	
		/5	/val	/5	/val	/5	/val
Cump. de requisitos	15	5	15	5	15	1	3
Disponibilidad	10	3	6	3	6	3	6
Mantenimiento	10	5	10	5	10	3	6
Costos	15	3	9	3	9	1	3
Eficiencia	10	5	10	5	10	5	10
Tamaño	5	3	3	5	5	5	5
Durabilidad	10	5	10	5	10	3	6
Instalación	10	3	6	5	10	3	6
Seguridad	10	3	6	5	10	3	6
Peso	5	1	1	3	3	5	5
<b>Total</b>	100		76		88		56

Con los resultados de la matriz de evaluación se determina que el aerogenerador GudCraft WG 300 cumple con los criterios establecidos además una de sus principales ventajas es que tiene incluido el regulador. Su curva de potencia es la siguiente:

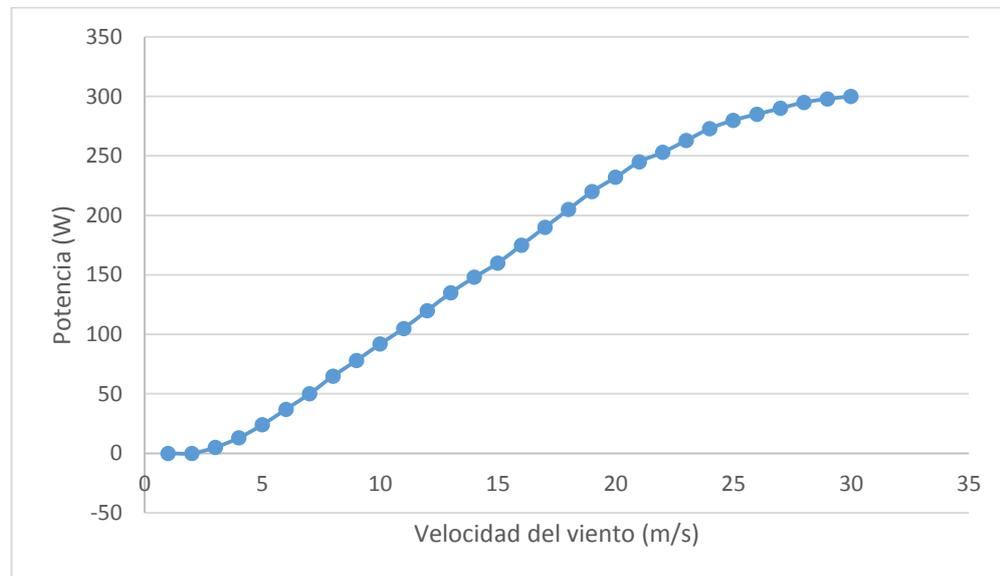


Figura 3.25 Curva de potencia Gudcraft WG300 (Gudcraft, 2013)

Para el diseño del rotor Savonius el primer paso es determinar el área que este deberá tener para cumplir las características que ofrece el rotor multipala a velocidad del viento nominal, siendo esta una potencia de 125 W a 12.5m/s. Además se presenta el cálculo para una velocidad baja de generación siendo esta de 25W a 5m/s. Para el cálculo se utiliza la siguiente fórmula.

$$A = 2 * \frac{P}{C_p * \rho * v^3 * \eta_e * \eta_t} \quad \text{Ec 3.6}$$

(Villarrubia, 2004)

Donde:

- P: Potencia requerida
- $C_p$ : Coeficiente de potencia, para el caso actual este es 0.074.
- $\rho$ : Densidad del aire, para el sector de Sangolquí esta es de  $0.95 \text{ kg/m}^3$  correspondiente a una altura de 2700 m. (CIRSOC, 2012)

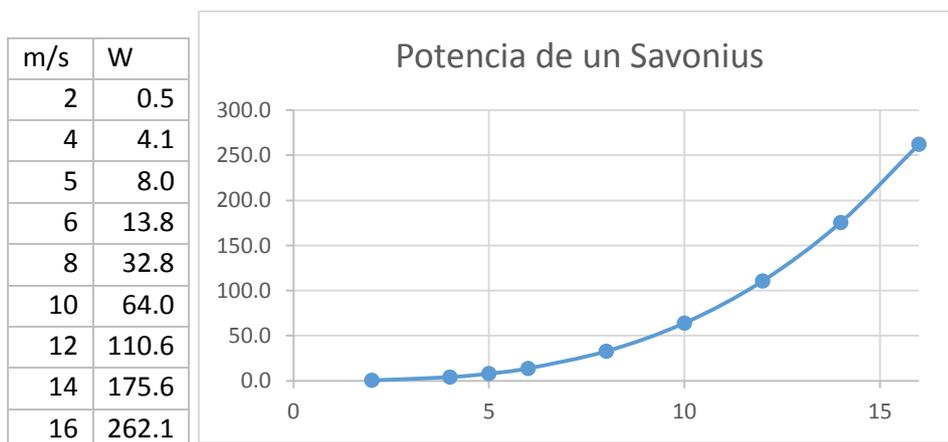
- $v$ : Velocidad del viento en m/s
- $\eta_e$ : Eficiencia del generador eléctrico, usualmente de 0.75 para generadores de polos magnéticos.
- $\eta_t$ : Eficiencia del sistema de transmisión de potencia, usualmente de 0.9.

Cuadro 3.19  
Cálculo del área del Savonius

Área del Savonius	Unidad	Valor	Valor
Potencia de suministro	W	125	25
Perdidas		0.675	0.675
Potencia real del Savonius	W	185.19	37.04
Coficiente		0.074	0.074
velocidad del viento	m/s	12.5	5
densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>	0.95	0.95
Áreas	m <sup>2</sup>	2.70	8.43

Basándose en estos datos se descartó la opción de construir un Savonius que trabaje a 5m/s generando una potencia de 25 W, ya que construirlo con un área de 8.43m<sup>2</sup> no es eficiente en un análisis beneficio-costo. Como siguiente punto a analizar es la curva de potencia que nos proporciona el Savonius, para su cálculo se despeja la potencia de la ecuación 3.6, se mantiene fijo el área a 2.7 m<sup>2</sup> y se varía la velocidad obteniendo lo siguiente:

$$P = \frac{1}{2} * C_p * \rho * v^3 * \eta_e * \eta_t * A \quad \text{Ec 3.7}$$



### Figura 3.26 Potencia de un Savonius

Comparando las dos curvas de potencia, del Gudcraft multipala y el Savonius se observa que a pesar de que a 12.5m/s ambos emiten la misma potencia, a velocidades bajas como 5 m/s el Savonius genera 8W mientras que el Gudcraft genera 25W. En condiciones de trabajo como las que presenta el sector de Sangolquí es necesario una mayor generación a velocidades del viento bajas por lo que con este criterio se decide optar por el aerogenerador Gudcraft WG300 Multipala.



Figura 3.27 Aerogenerador Gudcraft WG300

#### 3.4.2 Análisis del Sistema de generación Eólico

##### *Área frontal barrida por la pala*

Esta área se considera la superficie total barrida por las palas del rotor y perpendicular a la dirección del viento, las palas tienen un diámetro de 1.12 m.

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad \text{Ec 3.8}$$

$$A = 0.99 \text{ m}^2$$

### ***Coefficiente de potencia***

El coeficiente de potencia  $C_p$  junto a la velocidad periférica TSR que se determinará posteriormente representan las características más significativas de un rotor.

El valor de  $C_p$  representa el rendimiento aerodinámico del aerogenerador, es decir la cantidad de energía máxima que se podrá aprovechar de la energía del viento. De la ecuación 3.7 se puede obtener este valor para el aerogenerador Gudcraft WG300.

$$C_p = 2 * \frac{P}{A * \rho * v^3 * \eta_e * \eta_t} \quad \text{Ec 3.9}$$

Donde:

- P: Potencia requerida
- $\rho$ : Densidad del aire, para el sector de Sangolquí esta es de  $0.95 \text{ kg/m}^3$ .
- v: Velocidad del viento en m/s
- $\eta_e$ : Eficiencia del generador eléctrico, usualmente de 0.75 para generadores de polos magnéticos.
- $\eta_t$ : Eficiencia del sistema de transmisión de potencia, usualmente de 0.9.

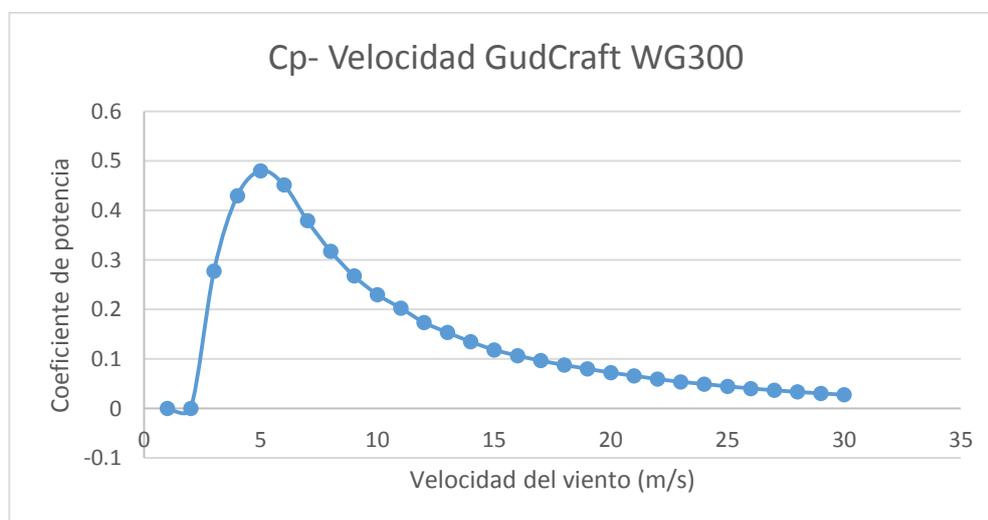


Figura 3.28 Coeficiente de potencia - Velocidad

### ***Relación de velocidad periférica TSR***

Este término es útil para comparar el funcionamiento de diferentes máquinas eólicas e indica que la periferia de la pala circula a una velocidad  $n$  veces mayor que la velocidad del viento. Se calcula mediante la fórmula:

$$\text{TSR} = \frac{\pi \cdot R \cdot n}{30 \cdot v} \quad \text{Ec 3.10}$$

Donde:

- R: Radio de pala (m)
- n: revoluciones por minuto
- v: Velocidad del viento (m/s)

A la velocidad nominal del aerogenerador que es de 12,5 m/s las palas del rotor giran a una velocidad de 800 rpm, obteniendo un TSR de 3,75.

A continuación se presenta un cuadro comparativo de los diferentes tipos de aerogeneradores con los valores de TSR para cada uno y el tipo de pala utilizada para su diseño.

**Tabla 3.7**  
Variación de parámetros según el tipo de generador

<b>Tipo de maquina</b>	<b>TSR de diseño</b>	<b>Tipo de pala</b>	<b>Cy / Cx</b>
Bombeo de agua	1	Placa plana	10
	1	Placa curvada	20-40
	1	Ala de tela	10-25
Generadores eólicos pequeños	3-4	Perfil simple	10-50
	4-6	Perfil alabeado	20-100
	3-5	Ala de tela	20-30
Generadores eólicos grandes	5-15	Perfil alabeado	20-100

(Universidad Nacional del Nordeste, 2014)

Como se observa, el TSR obtenido corresponde al grupo de los generadores eólicos pequeños y para este tipo de rotor se utiliza un perfil simple, al igual que el usado en el Gudcraft WG300.

El TSR también es un valor que influye en el diseño del aerogenerador ya está relacionado con el número de palas del mismo como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 3.8  
TSR y número de palas

TSR	1	2	3	4	5 a 8	8 a 15
Número de palas	6 a 20	4 a 12	3 a 8	3 a 5	2 a 4	1 a 2

(Universidad Nacional del Nordeste, 2014)

Como se observa el aerogenerador Gudcraft WG300 cumple con los parámetros de diseño ya que posee 6 palas que corresponden a un TSR de 3.75.

### ***Coefficiente de solidez $\Omega$***

Está definido como la relación entre el área geométrica de la pala y el área barrida por ella en su giro:

$$\Omega = \frac{Z \cdot R \cdot L}{\pi \cdot R^2} = \frac{Z \cdot L}{\pi \cdot R} \quad \text{Ec 3.11}$$

Donde:

- Z: Número de palas
- L: Ancho medio de pala (m)
- R: Radio de pala (m)

El aerogenerador está formado por 6 palas de radio igual a 0.56 m y cada pala tiene un ancho medio de 0.06 m, en base a estos datos se obtiene una solidez de 0.20. El coeficiente de solidez varía inversamente al TSR.

### *Dinámica del aerogenerador*

El movimiento del rotor del generador eólico se debe a la forma aerodinámica de las palas, las cuales conforman el elemento principal del aerogenerador y permiten obtener energía a través del viento.

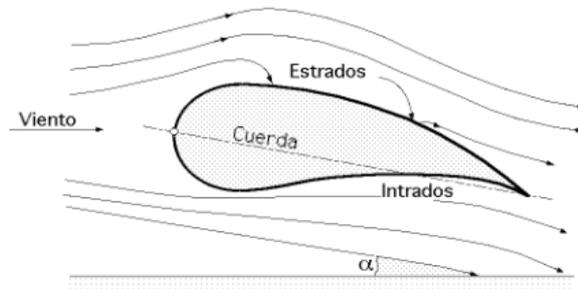


Figura 3.29 Perfil aerodinámico de la pala

Debido al perfil aerodinámico de la pala existe una mayor velocidad en la parte exterior (extradós) que en el interior (intradós), por lo cual se da una diferencia de presión entre las dos caras de la pala originando una fuerza perpendicular a la pala denominada fuerza de sustentación la cual permite el movimiento del rotor, además de esta fuerza se genera una fuerza de arrastre que tiende a frenar el rotor.

Las fuerzas que actúan sobre la pala se obtienen estudiando la acción del viento relativo que recibe la pala de velocidad  $\vec{c}$ , que se puede considerar suma del viento real de velocidad  $\vec{v}$ , y de un viento originado por el movimiento de rotación de la pala, de velocidad  $\vec{u}$  como se indica en la siguiente figura:

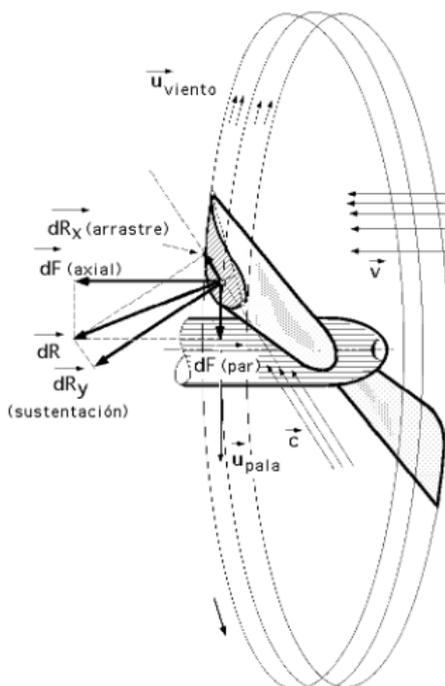


Figura 3.30 Fuerzas que actúan sobre la pala

La fuerza que actúa en el centro aerodinámico de un elemento de pala en rotación, viene dada por  $dR$ , esta fuerza se puede descomponer a su vez en otras dos, tanto a la entrada del viento en el perfil móvil, como a la salida.

- A la entrada del perfil móvil se tiene un viento de velocidad  $v$  que da lugar a la fuerza axial  $F_{ax}$  y a la fuerza de par  $F_{par}$ .
- A la salida del perfil móvil se tiene un viento de velocidad aparente  $c$  que da lugar a la fuerza de arrastre  $F_{arr}$  ( $R_x$ ) y a la fuerza de sustentación  $F_{sust}$  ( $R_y$ ).

Estas fuerzas se calculan mediante las siguientes ecuaciones:

***Fuerza de arrastre***

$$R_x = C_x \left( \frac{1}{2} \rho S c^2 \right) \quad \text{Ec 3.12}$$

***Fuerza de sustentación***

$$R_y = C_y \left( \frac{1}{2} \rho S c^2 \right) \quad \text{Ec 3.13}$$

**Fuerza total**

$$R = C \left( \frac{1}{2} \rho S c^2 \right) \quad \text{Ec 3.14}$$

Donde:

- Cx: Coeficiente de arrastre
- Cy: Coeficiente de sustentación
- C: Coeficiente resultante
- c: módulo de la velocidad aparente del viento
- S: Área característica
- $\rho$ : densidad del aire

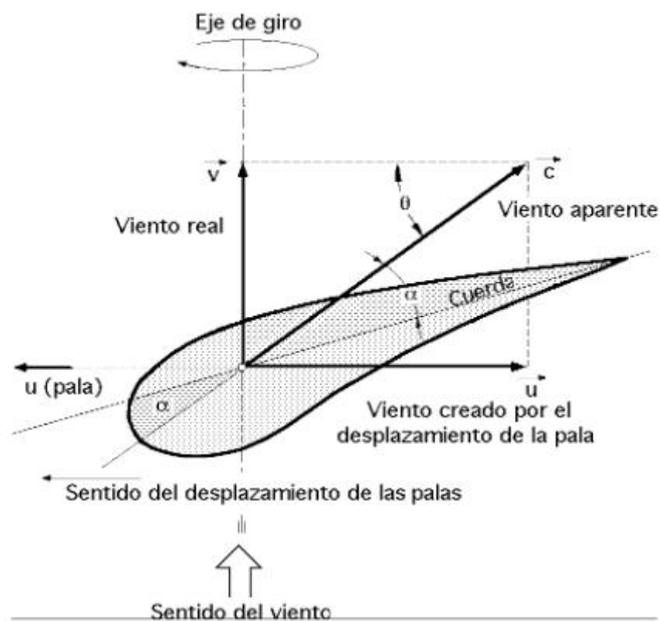


Figura 3. 31 Velocidades sobre la pala de un aerogenerador

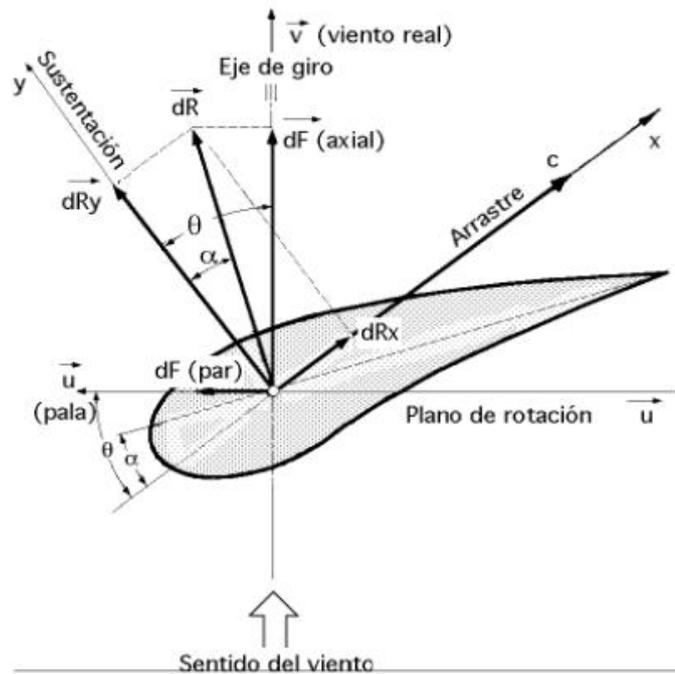


Figura 3. 32 Fuerzas que actúan sobre la pala del aerogenerador

Si se proyectan las fuerzas de arrastre  $R_x$  y de sustentación  $R_y$  sobre el plano de rotación, se obtiene una fuerza útil,  $F_{par}$ , que hace girar la hélice, y otra fuerza perpendicular,  $F_{axial}$  que se compensa por la reacción del soporte del eje del rotor de la hélice. Estas fuerzas se obtienen mediante:

$$F_{par} = C_y \left( \frac{1}{2} \rho S v^2 \right) \frac{\text{sen}(\theta - \alpha)}{\text{sen}^2(\theta) \cos(\alpha)} \quad \text{Ec 3.15}$$

$$F_{axial} = C_y \left( \frac{1}{2} \rho S v^2 \right) \frac{\text{cos}(\theta - \alpha)}{\text{sen}^2(\theta) \cos(\alpha)} \quad \text{Ec 3.16}$$

Donde:

$\theta$ : Ángulo que forma la dirección del viento aparente (relativa), entre los vectores velocidad  $\vec{u}$  y  $\vec{c}$ .

Los coeficientes de arrastre y sustentación dependen de la forma del perfil y del ángulo de ataque  $\alpha$ , que es el ángulo que forma la cuerda del perfil con la velocidad

aparente del viento  $\vec{c}$ . La fuerza de sustentación aumenta con el ángulo de ataque  $\alpha$ , hasta alcanzar un valor máximo.

El mejor funcionamiento de la pala se produce para un ángulo de ataque  $\alpha$  en el que la relación  $(C_y/C_x)$  sea máxima, es decir, el coeficiente de sustentación tiene que ser grande, pero no necesariamente el máximo absoluto, al tiempo que el coeficiente de arrastre tiene que ser lo más pequeño posible, compatible con la relación anterior. Como se indica en la Tabla 3.7

Variación de parámetros según el tipo de generador, los aerogeneradores eólicos pequeños suelen tener un coeficiente  $C_y/C_x$  de 10 a 50.

El aerogenerador Gudcraft WG300 tiene un perfil aproximado al NACA 4412, como se indica en el siguiente gráfico.

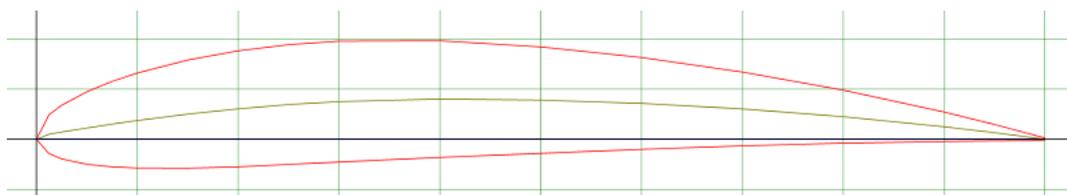


Figura 3.33 NACA 4412

(Airfoil Tools, 2014)

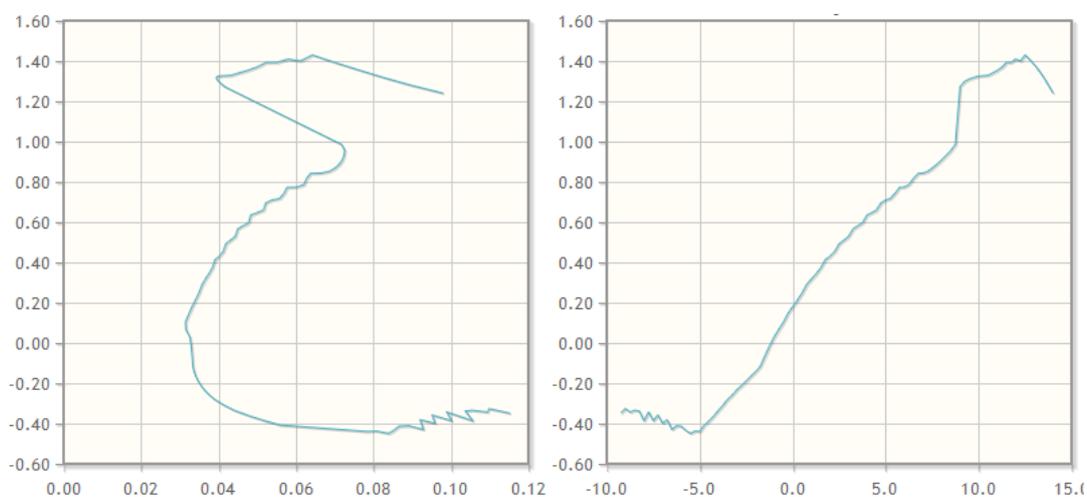


Figura 3.34 Perfil NACA 4412  $C_x/ C_y$  –  $C_x/\alpha$

(Airfoil Tools, 2014)

De acuerdo a las especificaciones del perfil NACA 4412, el coeficiente  $C_x/C_y$  se maximiza con un valor de 33.4 a un ángulo de  $\alpha=9.75^\circ$ , lo que representa valores de  $C_x= 1,32$  y  $C_y=0.04$ . (Airfoil Tools, 2014)

Con estos coeficientes y una densidad de  $0.95 \text{ kg/m}^3$  las fuerzas resultantes en una sección de perfil S en función de la velocidad aparente del viento son:

$$R_x = 0.627 S c^2 \quad \text{Ec 3.17}$$

$$R_y = 0.019 S c^2 \quad \text{Ec 3.18}$$

Realizando una sección en la parte media de una pala del aerogenerador Gudcraft WG300 se obtiene un área aproximada de  $317 \text{ mm}^2$  es decir  $0.000317 \text{ m}^2$ . En esta sección las fuerzas en función de la velocidad son:

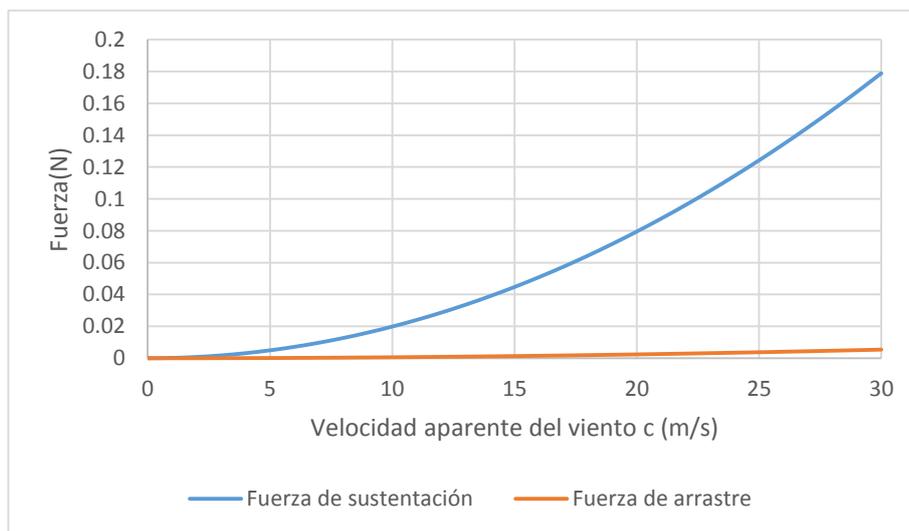


Figura 3.35 Fuerzas de arrastre y sustentación

### ***Rendimiento del aerogenerador***

El rendimiento indica el porcentaje de energía eólica que el aerogenerador aprovecha para transformarla en energía eléctrica dado por la siguiente fórmula:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{dis}} \quad \text{Ec 3.19}$$

Donde:

- $P_u$ : Potencia útil del aerogenerador
- $P_{dis}$ : Potencia eólica disponible

La potencia eólica disponible varía con respecto a la velocidad del viento y se calcula mediante la Ec. 2.1.

La densidad del aire en Sangolquí es  $0.95 \text{ kg/m}^3$  y el área perpendicular al flujo de aire es de  $0.99 \text{ m}^2$ .

Reemplazando en la ecuación 3.6 el rendimiento que se obtiene en función de la velocidad es:

$$\eta = \frac{P_u(v)}{0,47 * v^3} \quad \text{Ec 3.20}$$

La siguiente gráfica muestra la potencia útil del aerogenerador en relación a la potencia del viento disponible y se puede observar que a medida que la velocidad del viento aumenta la energía aprovechada es menor.

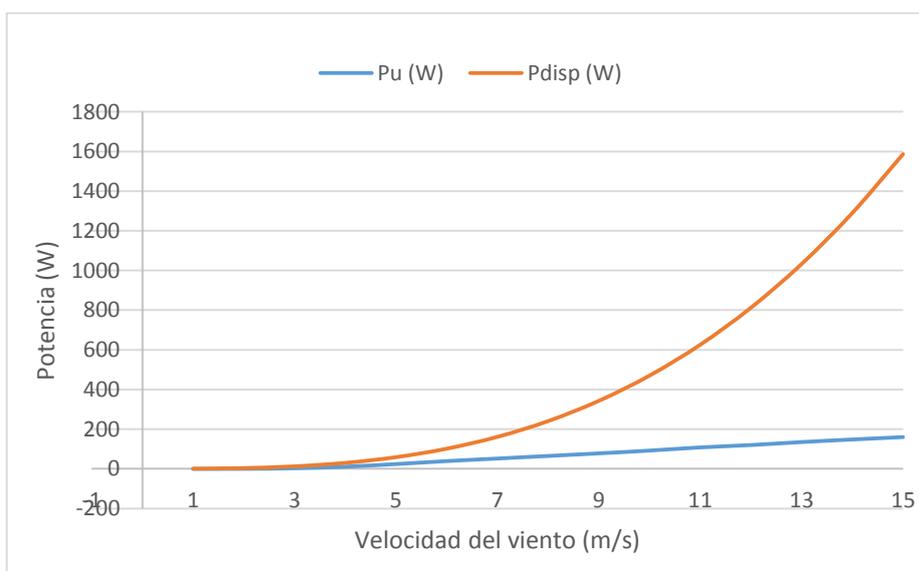


Figura 3.36 Potencia útil y potencia disponible

El rendimiento de un aerogenerador puede variar de 0 a 0.5925, este valor se conoce como límite de Betz que define la máxima potencia eólica que se puede

aprovechar del viento, en la práctica el rendimiento de un aerogenerador puede llegar a alrededor de 0.4.

La siguiente gráfica muestra como varía el rendimiento del aerogenerador GudCraft WG300 en relación a la velocidad del viento, como se puede observar este aerogenerador tiene un mayor rendimiento a velocidades bajas.

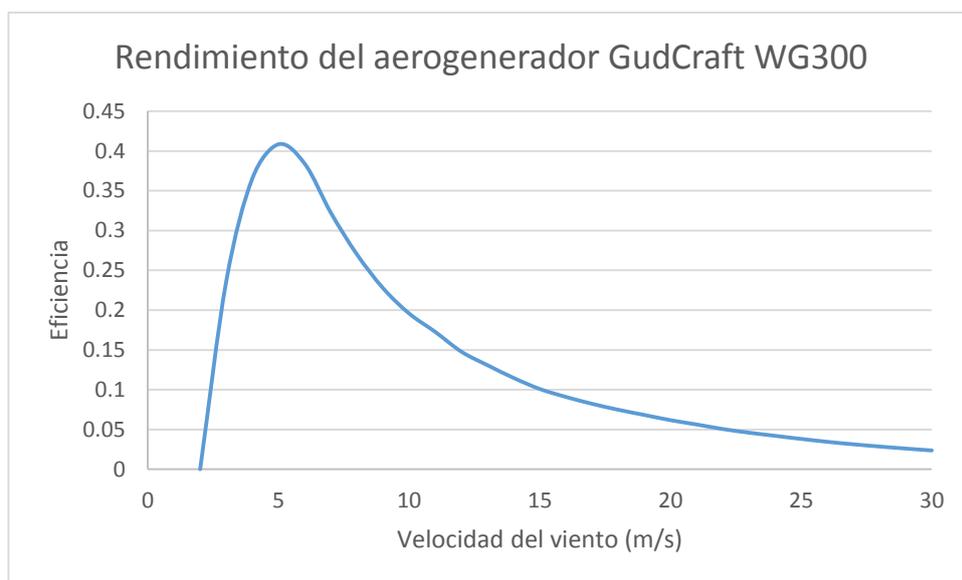


Figura 3.37 Rendimiento del aerogenerador

### ***Producción estimada del aerogenerador***

Como se explicó en la sección 2.3.2 se procede a hallar la potencia media generada en el período de tiempo especificado. A continuación se presenta el cálculo detallado para el mes de Enero. Se usa la Ec. 2.13, con un  $k=1.25$  por la forma presentada en el estudio climatológico, una velocidad media de 1.68 tomada del atlas eólico, un  $c$  de 1.803 calculado mediante la Ec. 2.10,  $\rho$  se calcula con la Ec. 2.8 correspondiente a la ley de Weibull y finalmente  $P_i$  se toma de la Figura 3.25 para cada velocidad media de los intervalos establecidos.

Cuadro 3.20  
Potencia media para el mes de Enero

Intervalo v(m/s)	vi(m/s)	Pi (W)	$\rho_i$ (m/s) <sup>1</sup>	Pi* $\rho_i$ * $\Delta v_i$ (W)
0-3	-	-	0	0
3-4	3.5	7	0.082816	0.57971
4-5	4.5	17.5	0.037871	0.662748
5-6	5.5	31.5	0.016288	0.513087
6-7	6.5	45.5	0.006663	0.303158
7-8	7.5	58.5	0.002611	0.152756
8-9	8.5	71.5	0.000986	0.070475
9-10	9.5	85	0.00036	0.030581
10-11	10.5	100	0.000127	0.012739
11-12	11.5	114	4.39E-05	0.005
12-13	12.5	127.5	1.47E-05	0.001876
13-14	13.5	141.5	4.82E-06	0.000682
14-15	14.5	154	1.54E-06	0.000238
15-16	15.5	167.5	4.84E-07	8.1E-05
<b>P(W)</b>				<b>2.33313</b>

Esto se repite para todos los meses y tenemos las potencias medias para cada mes, multiplicando por las 24 horas del día y los días al mes encontramos la Energía generada a lo largo del año.

Cuadro 3. 21  
Estimación de generación eólica anual

Mes	Días	v (m/s)	P (W)	E (Wh/día)	E (Wh/mes)
<b>Enero</b>	31	1.68	2.33	56.0	1735.9
<b>Febrero</b>	28	1.68	2.33	56.0	1567.9
<b>Marzo</b>	31	1.96	3.87	92.8	2876.1
<b>Abril</b>	30	1.96	3.87	92.8	2783.3
<b>Mayo</b>	31	2.23	5.65	135.7	4206.8
<b>Junio</b>	30	2.51	7.78	186.8	5603.0
<b>Julio</b>	31	2.51	7.78	186.8	5789.8
<b>Agosto</b>	31	2.51	7.78	186.8	5789.8
<b>Septiembre</b>	30	2.23	5.65	135.7	4071.1
<b>Octubre</b>	31	1.96	3.87	92.8	2876.1
<b>Noviembre</b>	30	1.68	2.33	56.0	1679.9
<b>Diciembre</b>	31	1.68	2.33	56.0	1735.9
<b>Energía Generada al año:</b>					<b>40715.6</b>

### 3.5 Sistema de Distribución

#### 3.5.1 Dimensionamiento y selección del regulador

En el mercado existen generadores híbridos que manejan la energía solar y eólica de manera simultánea, pero para la aplicación planteada no son válidos debido a que todos presentan una mayor potencia de generación en la parte eólica, mientras que en las condiciones climáticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE el módulo solar es la principal fuente de energía.

Además se debe considerar que el aerogenerador seleccionado viene con su propio regulador. Para la selección del otro regulador que pasaría a ser el principal y de mayor potencia se debe buscar que tenga las funciones de:

- Regular una carga solar de 440 Wp
- Soportar corrientes de generación superiores a 28 A
- Trabajar a un voltaje nominal de 12 V
- Admitir la conexión de otros sistemas de generación a la batería

De los principales reguladores existentes en el mercado se ha realizado la siguiente tabla comparativa.

Tabla 3.9  
Características técnicas de Reguladores

Característica	Unidad	Phocos CX	ProStar-30	Xantrex
<b>Voltaje nominal</b>	V	12	12	12
<b>Potencia</b>	W	500	300	500
<b>Corriente de Carga</b>	A	40	30	40
<b>Autoconsumo de Corriente</b>	mA	<4	<25	15
<b>Rendimiento</b>	%	84	90	88
<b>Peso</b>	kg	0.179	0.34	1.4
<b>Dimensiones</b>	mm	92x93x38	153x105x55	254x127x635
<b>Voltaje máximo del panel</b>	V	30	30	125
<b>Protección de sobrevoltaje</b>	V	15.5	15.5	--
<b>Protección de bajo voltaje</b>	V	10.5	9	9.8
<b>Visualización</b>		Pantalla	LEDs	Pantalla
<b>Costo</b>	\$	193.5	190	170

Posterior a esto se procede a realizar una matriz de criterios para la selección, teniendo en cuenta las características técnicas y el cumplimiento de las funciones antes mencionadas.

Cuadro 3.22  
Matriz de criterios para la selección del Regulador

Criterios a evaluar	Valora- ción	Phocos CX		ProStar-30		Xantrex	
		/5	/val	/5	/val	/5	/val
<b>Cump. de requisitos</b>	15	3	9	5	15	3	9
<b>Disponibilidad</b>	10	5	10	5	10	1	2
<b>Mantenimiento</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Costos</b>	15	3	9	3	9	5	15
<b>Eficiencia</b>	10	1	2	5	10	3	6
<b>Tamaño</b>	5	5	5	3	3	3	3
<b>Durabilidad</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Instalación</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Seguridad</b>	10	3	6	5	10	3	6
<b>Peso</b>	5	5	5	3	3	1	1
<b>Total</b>	100		76		90		72

Con los resultados de la matriz de evaluación se determina que el regulador ProStar-30 cumple mayoritariamente con los criterios establecidos y además presenta protecciones tanto para cortocircuitos, polarización inversa, sobrecargas, sobre corriente y altas temperaturas.

Este regulador además presenta otras características importantes como:

**Método de carga de la batería:** El regulador ProStar tiene cuatro etapas de carga:

- Recarga con un 100% de disponibilidad de luz solar.
- La regulación PWM: Carga por pulso para restaurar la capacidad total de la batería.
- Flotante: Después de que la batería esté completamente recargada, el ProStar reduce la carga a flotante o carga por “goteo”

- Ecuación: Una carga potenciada que depende del tiempo transcurrido y la historia de la batería.

**Selección del tipo de batería:** Permite seleccionar el tipo de batería que se utilizará, cada una tiene un algoritmo de carga distinto:

- Gel: Se recomiendan bajas regulaciones de tensión y ningún tipo de ecuación. Esta configuración regula a 14.0V (para baterías de 12V).
- Sellada: Se regula a 14,15V (baterías de 12V) con una carga máxima de 14,35V.
- Con líquido: Se regulan a 14,4V con ecuaciones 14,9V y 15,1V (baterías de 12V).

**Desconexión nocturna:** El conjunto solar se desconecta automáticamente a la noche para prevenir pérdidas por el flujo inverso de corriente desde la batería.

### 3.5.2 Dimensionamiento y selección de batería

En el proceso de selección de batería, al igual que se realizó con los elementos anteriores, se procede a determinar las características generales para ser utilizadas en la microcentral y se encontró las siguientes opciones presentes en el mercado.

Tabla 3.10  
Características técnicas de las baterías

Característica	Unidad	Millenium	Ultracel	Ritar
<b>Voltaje nominal</b>	V	12	12	12
<b>Capacidad</b>	Ah	115	120	150
<b>Peso</b>	kg	40	37.6	44.5
<b>Temperatura de trabajo</b>	°C	25	25±3	25±5
<b>Maxima corriente de descarga</b>	A		1170	1500
<b>Resistencia Interna</b>	mW	---	4.8	4.2
<b>Profundidad de descarga</b>	%	55	50	50
<b>Espectativa de vida</b>	meses	60	180	180
<b>Costo</b>	\$	262.08	350	443.52

Posterior a conocer las características técnicas se debe determinar la capacidad necesaria que debe presentar la batería para soportar la autonomía del sistema planteada. Es decir que sea capaz de soportar una carga de 367W durante un tiempo de 4 horas sin la presencia de una fuente de generación. Para el cálculo se utilizó la fórmula detallada en el capítulo 2 en la parte de batería. Los resultados de este cálculo se muestran en la siguiente tabla al igual que el número de baterías necesarias.

Cuadro 3.23  
Cálculo de Capacidad de batería

Calculo de capacidad		Millenium	Ultracel	Ritar
<b>Consumo diario</b>	Wh	1468	1468	1468
<b>Voltaje nominal</b>	Ah	122.33	122.33	122.33
<b>Rendimiento de acumulación</b>	%	90	90	90
<b>Profundidad de descarga</b>	%	55	50	40
<b>Días de autonomía</b>		1	1	1
<b>Capacidad de la batería</b>	Ah	247	340	340
<b>Capacidad de la batería individual</b>	Ah	115	120	150
<b>Número de baterías</b>		2.1	2.8	2.3
<b>Costo total</b>	\$	524.16	786.24	887.04

De esta manera se obtuvo el costo real en baterías y se procede a realizar la matriz de criterios.

Cuadro 3. 24  
Matriz de criterios para la selección de batería

Criterios a evaluar	Valora- ción	Millenium		Ultracel		Ritar	
		/5	/val	/5	/val	/5	/val
<b>Cump. de requisitos</b>	15	5	15	3	9	3	9
<b>Disponibilidad</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Mantenimiento</b>	10	5	10	3	6	5	10
<b>Costos</b>	15	5	15	3	9	1	3
<b>Eficiencia</b>	10	3	6	3	6	3	6
<b>Tamaño</b>	5	5	5	5	5	5	5
<b>Durabilidad</b>	10	1	2	5	10	5	10
<b>Instalación</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Seguridad</b>	10	3	6	5	10	5	10
<b>Peso</b>	5	5	5	5	5	5	5
<b>Total</b>	100		84		80		78

La batería escogida es la Millenium 35 DC-115 siendo la que mejor se adapta a las condiciones que exige la microestación.

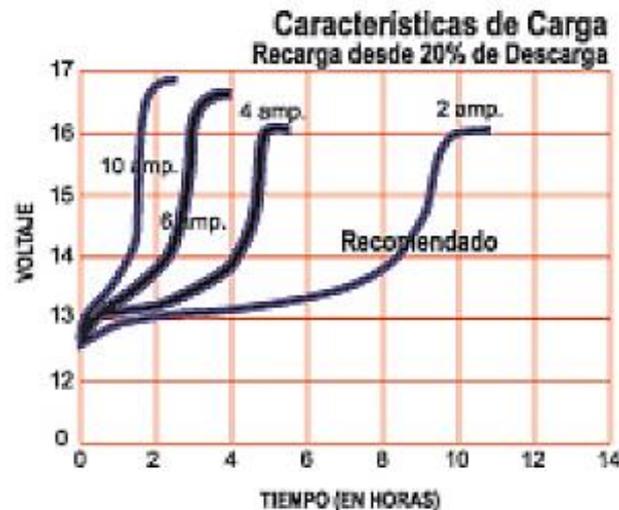


Figura 3.38 Curva de carga de la batería Milleium 35 DC-115 (MILLENNIUM, 2014)

### 3.5.3 Dimensionamiento y selección del inversor

Para la selección del inversor es necesario determinar la potencia que se suministrará en corriente alterna, en este caso el sistema proporcionará una potencia de  $\frac{1}{2}$  hp, es decir 367 W y además es necesario tomar en cuenta el tipo de cargas que se alimentaran ya que algunas al ser muy sensibles requieren una onda sinusoidal pura mientras que otras pueden funcionar con un tipo de onda cuadrada o semisenoidal.

Los inversores funcionan a una determinada potencia nominal pero durante cortos periodos de tiempo esta potencia puede alcanzar valores más altos permitiendo el arranque de motores o bombas.

En base a lo planteado el inversor debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Voltaje de entrada: 12 Vdc
- Voltaje de salida: 110 Vac
- Potencia mínima: 367 W
- Tipo de onda: Sinusoidal pura

Algunos de los inversores que presentan estas características se detallan en la siguiente tabla comparativa:

Tabla 3.11  
Características técnicas Inversores

Características	Unidad	Power Bright	Sunforce 11240	Cotek SK350
Potencia nominal	W	600	1000 W	350 W
Potencia pico	W	1000	2000 W	700 W
Eficiencia	%	90	90	89%
THD	%	< 3%	< 3%	< 3%
Peso	lb	7.8	11.4	3.1 lb
Costo	\$	175 +	182 +	179.20

importación importación

Para realizar la elección del inversor se procede a realizar una matriz de criterios para la selección, teniendo en cuenta las características técnicas y el cumplimiento de las funciones antes mencionadas.

Cuadro 3. 25  
Matriz de criterios para la selección del inversor

Criterios a evaluar	Valora- ción	Power Bright APS600		Sunforce 11240 1000 W		Cotek SK350 60Hz OSP	
		/5	/val	/5	/val	/5	/val
		<b>Cump. de requisitos</b>	15	5	15	5	15
<b>Disponibilidad</b>	10	3	6	3	6	5	10
<b>Mantenimiento</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Costos</b>	15	3	9	1	3	5	15
<b>Eficiencia</b>	10	3	6	3	6	5	10
<b>Tamaño</b>	5	5	5	3	3	3	3
<b>Durabilidad</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Instalación</b>	10	5	10	5	10	5	10
<b>Seguridad</b>	10	3	6	5	10	3	6
<b>Peso</b>	5	5	5	3	3	3	3
<b>Total</b>	100		82		76		92

En base a los resultados de la matriz de evaluación el inversor que cumple mayoritariamente con los criterios establecidos es el Inversor Cotek SK350 cuyas características técnicas son:

- Tensión nominal de batería 12Vdc
- Campo de tensión de entrada 10.5 – 15V
- Potencia de Carga 350W
- Potencia Máxima 700W
- Forma de onda Onda sinusoidal pura (THD<3%)
- Rendimiento máximo (%) 90%
- Tensión de salida Onda sinusoidal 120Vac
- Frecuencia 50/60Hz
- Corriente Stand-by 0.25A
- Corriente sin carga 1.25A
- Sobrevoltaje 15.3V
- Seguridad Fusible de 20 A

#### **3.5.4 Cableado y conexión**

La conexión se realiza de acuerdo al diseño desarrollado anteriormente y se encuentra en la parte de anexos. En el plano eléctrico se observa que existen 11 líneas principales de conexión las cuales son:

- 1 y 2: generación de los paneles
- 3 y 4: generación del rotor
- 5 y 6: conexión a baterías e inversor
- 7 y 8: Carga DC
- 9, 10 y 11: alimentación a los consumidores

Para la determinación de protecciones y cableado primero se identifica la corriente máxima de cada sección y con este dato se procede a la fórmula:

$$S = \frac{2 * \rho * L * I}{\Delta V} \quad \text{Ec 3.21}$$

Donde:

- S: sección de línea (mm<sup>2</sup>)
- ΔV: caída de tensión admisible (V)
- L: Longitud del cable (m)
- ρ: Resistividad del conductor eléctrico (Ω\*mm<sup>2</sup>/m)
- I: corriente de línea

Con la sección de línea se determina mediante tablas el número AWG del cable.

Los cables van a ser adquiridos en la empresa Disensa. El cable es un tipo TW, construidos con cobre de temple suave, además están aislados con una capa de material termoplástico de Cloruro de Polivinilo PVC resistente a la humedad. Este tipo de conductor puede ser usado en lugares secos y húmedos teniendo una temperatura máxima de trabajo de 60°C lo que permite ser utilizado en la presente aplicación.

Tabla 3.12  
Número AWG

Calibre AWG ó MCM	Sección mm <sup>2</sup>	FORMACION	ESP ESOR AISLAMIENTO mm	DIAMETRO EXTERIOR mm	PESO TOTAL Kg/Km	Capacidad de corriente		TIPO CABLE	Altern. de embal.
		No. de Hilos por diámetro en mm.				Para 1 cond. al aire libre Amp.	Para 3 cond. en conduit Amp.		
20	0.52	1 x 0.813	0.76	2.33	9.81	6	7	TF	A,E
18	0.82	1 x 1,02	0.76	2.54	13.16	6	7	TF	A,E
16	1.31	1 x 1,29	0.76	2.81	18.10	10	8	TF	A,B
14	2.08	1 x 1,63	0.76	3.15	26.10	20	15	TW	A,B
12	3.31	1 x 2,05	0.76	3.57	38.30	25	20	TW	A,C
10	5.26	1 x 2,59	0.76	4.11	57.40	40	30	TW	A,D
8	8.34	1 x 3,26	1.14	5.54	95.20	60	40	TW	A,B

(Disensa, 2014)

Se calcula la sección de línea y se selecciona el respectivo número de cable AWG, de acuerdo a la tabla dada por el fabricante dando como resultado:

Cuadro 3. 26  
Secciones de cable y número AWG

Sección	L(m)	I(A)	Resistividad	V(V)	S(mm2)	AWG
1 y 2	4	28	0.0171	1	3.8304	10
3 y 4	5	19	0.0171	1	3.249	14
5 y 6	3	30	0.0171	1	3.078	10
7 y 8	1	20	0.0171	0.6	1.14	14
9, 10 y 11	1	4	0.0171	0.6	0.228	14

### 3.5.5 Protecciones

La microcentral maneja potencia altas, por lo que es necesario que tenga protecciones que le permitan salvaguardar la integridad de los dispositivos que la conforman. En primera instancia tenemos las protecciones propias del controlador solar y el inversor.

El controlador solar presenta:

- Protección para polaridad inversa
- Protección para cortocircuito (desconexión)
- Protección para sobrecorriente (desconexión >30A)
- Protección para altas temperaturas mediante control de corriente o apagado total.
- Previene el regreso de la corriente en horas de baja producción solar.
- Previene corrientes de reversa de la batería en la noche.

El inversor ofrece las siguientes protecciones:

- Protección a sobrevoltaje con desconexión a 16V y reinicio automático a 13V.
- Protección a bajo voltaje con alarma a los 11V. Desconexión a los 10.5V y reinicio automático a 12.5V.

- Protección para sobrecalentamiento del transformador con desconexión a los 55°C y reinicio automático a los 45°C.

Además de estas protecciones propias del inversor y regulador, se instalará fusibles que protejan la integridad de la estación. En el plano eléctrico se puede observar la ubicación de estos fusibles, siendo estos:

- F1: protección para sobrecorriente de los paneles. (30A)
- F2: protección para sobrecorriente del aerogenerador. (20A)
- F3: protección para sobrecorriente hacia el inversor. (30A)
- F4: protección para sobrecorriente en la salida DC. (20A)

### **3.6 Diseño del Sistema de Monitoreo**

#### **3.6.1 Análisis de las variables a monitorear**

Las variables a monitorear se dividen en tres: las variables climáticas, las variables eléctricas y las variables indirectas. Los dos primeros tipos de variables, al ser de adquisición, tendrán una frecuencia de toma de datos cada 10 min y los almacenará en una tarjeta SD para su posterior descarga a la interfaz desarrollada en LabView.

Las variables climáticas son las que nos indican la energía disponible en el sol y el viento que puede ser captada por la microcentral. Son las siguientes:

- Radiación solar: medida en kW/m<sup>2</sup>.
- Velocidad del viento: medida en m/s.
- Dirección del viento: medida en coordenadas geográficas.

Las variables eléctricas son las que muestran el comportamiento de la generación y consumo de la microcentral, se tratan de voltaje y corriente medidos en puntos específicos de la microcentral. Para la medida de Voltaje, como se puede ver en el plano tenemos:

- V1: voltaje de los paneles solares.
- V2: voltaje de las baterías.
- V3: voltaje del aerogenerador.

Para la medida de corriente:

- I1: Corriente de la salida de la suma de los paneles.
- I2: Corriente de la salida del aerogenerador.
- I3: Corriente que llega a la batería 1.
- I4: Corriente que llega a la batería 2.
- I5: Corriente que llega al Inversor.
- I6: Corriente que llega a la salida DC.

En estos dos tipos de variables se visualizará en tres ventanas: diaria, mensual y anual donde cada una tendrá un gráfico de variación promedio, diario o mensual, además de un gráfico de frecuencias. En el caso de diario se podrán comparar dos variables.

El tercer tipo de variables se refiere a las variables calculadas con los valores antes tomados pero que de la misma manera van a ser evaluadas para cada intervalo de toma de datos. En este grupo tenemos:

- Potencia disponible: es la cantidad disponible en el ambiente. En el caso de la estación tenemos la potencia disponible del sol y la potencia disponible en el viento.
- Potencia de generación solar: es la obtenida de los paneles solares.
- Potencia de generación eólica: es la obtenida del aerogenerador.
- Potencia suministrada: es la que brindan en conjunto el regulador eólico y el regulador solar a las baterías y la carga AC.

- Eficiencias: se compara la potencia de entrada y de salida de cada uno de los módulos de generación. Tenemos la del panel solar y la del aerogenerador.
- Potencia de consumo AC: es la que está siendo utilizada por la carga conectada al inversor.
- Potencia de consumo DC: es la que está siendo utilizada por la carga conectada a los terminales DC.
- Nivel de batería: Es porcentaje de carga que tiene la batería.

Estas variables indirectas contarán con gráficas de comparación entre variables de igual manera en diario, mensual y anual además de las gráficas de variación presentes en los dos tipos de variables anteriores.

### 3.6.2 Sensores

Para las variables climáticas se usarán los siguientes sensores:

Tabla 3.13  
Características Anemómetro

Anemómetro Características	Davis 7911
<b>Rango Velocidad</b>	0.5-89 m/s
<b>Precisión Velocidad</b>	±5%
<b>Sensor Velocidad</b>	Pulsos; $V = P(2.25/T)$ mph
<b>Dirección</b>	0-360
<b>Sensor Dirección</b>	Potenciómetro 0- 20 kΩ 10K Ω= sur, 180°
<b>Costo</b>	120
<b>Peso</b>	1.7 lb
<b>Medidas</b>	445 mm x 146 mm x 64 mm

Para determinar la velocidad en m/s en base a la lectura de pulsos se usa la siguiente ecuación:

$$V = P \left( \frac{2.25}{T} \right) * 0.44 \quad \text{Ec 3.22}$$

Donde:

- V: velocidad en m/s
- P: número de pulsos
- T: tiempo de muestreo

Tabla 3.14  
Características piranómetro y sensor de Temperatura

<b>Equipo:</b>	<b>Piranómetro Davis 6450</b>	<b>Temperatura DS18B20</b>
<b>Características</b>		
<b>Señal</b>	0- 3 VDC; 1.67 mV per W/m2	comunicación OneWire
<b>Rango</b>	0 to 1800 W/m2	-40 a 150°C
<b>Precisión</b>	±5%	±1%
<b>Resolución</b>	1 W/m2	0.5°C
<b>Costo</b>	144	5
<b>Peso</b>	0.5 lb	--
<b>Medidas</b>	51 mm x 70 mm x 57 mm	ϕ 7.5mm x 30 mm

Estos sensores de las variables climáticas irán conectados a los terminales del Arduino dependiendo de las características propias del sensor. El anemómetro o sensor de velocidad al brindar pulsos estará conectado a una entrada digital. La veleta o sensor de dirección irá conectado a una entrada análoga. El sensor de temperatura estará

conectado a un terminal digital para poder realizar la comunicación OneWire propia del sensor.

Para los sensores de voltaje se utilizará un divisor de tensión y se censará mediante las entadas análogas del Arduino. Esto se lo realizó debido a que los voltajes máximos a medir son de 20V y el Arduino únicamente trabaja de 0-5V. Los valores de las resistencias de 33K y 10K del divisor, dan una relación de conversión en la que 20V equivalen a 4.65V.

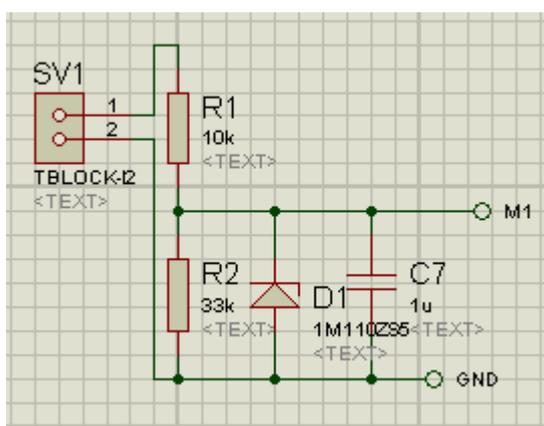


Figura 3. 39 Circuito de sensores de voltaje

Para los sensores de corriente primero se analizó los rangos de medida y se obtuvo.

- I1:0-30A
- I2:0-20A
- I3:0-20A
- I4:0-20A
- I5:0-30A
- I6:0-20A

Para I1 e I5 se utilizará el sensor ACS712 a 30A que permite el rango de medida y su equivalencia está dada por el siguiente gráfico:

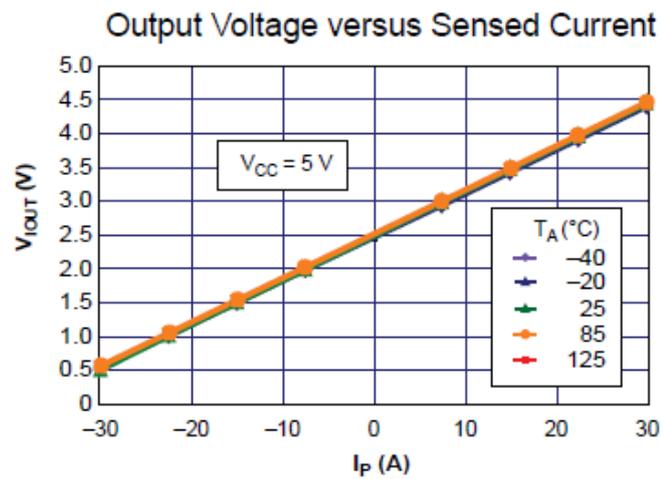


Figura 3.40 Gráfica de trabajo del sensor ACS712 a 30<sup>a</sup>

(Allegro, 2014)

De donde se obtiene que al variar 15A en la corriente en el voltaje varía 1V y su rango va -30A a 30A.

Para medir las demás corrientes se utilizará el mismo ACS712 pero a 20 A. Cuya gráfica de trabajo es la siguiente:

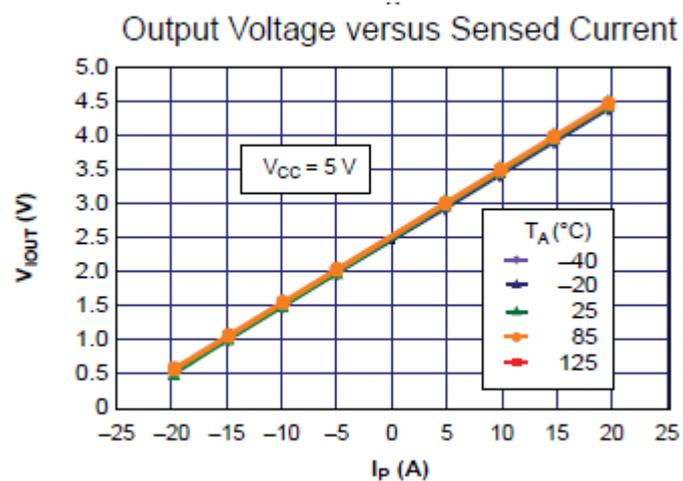


Figura 3.41 Gráfica de trabajo del sensor ACS712 a 20 A

(Allegro, 2014)

A continuación se presenta un resumen de los sensores utilizados:

Cuadro 3.27  
Características Principales Sensores

Nombre	Variable a medir	Cant.	Rango	Precisión	Voltaje	Equivalencia
<b>Davis 7911</b>	Vel. del viento	1	0.5 a 89 m/s	±5%	3.3V	Ec 3.22
	Dir. del viento		0 a 360°	±7°	3.3V	$\Delta 109^\circ \alpha \Delta 1V$
<b>Davis 6450</b>	Radiación solar	1	0 a 1800 W/m <sup>2</sup>	±5%	3.3V	$\Delta 598.8\Omega/\mu^2 \alpha \Delta 1V$
<b>DS18B20</b>	Temp.	1	-55 a 125 °C	±1%	5V	OneWire
<b>Divisor de voltaje</b>	Voltaje	3	0 a 20 V	±5%	5V	$\Delta 4.3\zeta\epsilon \alpha \Delta 1V$
<b>ACS712-20A</b>	Corriente	4	-20 a 20 A	±1.5%	5V	$\Delta 15A \alpha \Delta 1V$
<b>ACS712-30A</b>	Corriente	2	-30 a 30 A	±1.5%	5V	$\Delta 10A \alpha \Delta 1V$

### 3.6.3 Módulo de Control

El módulo de control está formado principalmente por un Arduino MEGA 2560, que es el cerebro que controla la toma de datos y desconecta el consumo AC si la batería está por debajo de las condiciones óptimas de servicio. Para lograr la conexión del Arduino mega con los diferentes sensores y un correcto funcionamiento se agregaron dispositivos para la obtención de la hora actual, almacenamiento de las datos y como medio de conexión y alimentación a los sensores. A continuación se detallan estos dispositivos.

#### *Módulo RTC*

Para poder tomar los datos en un período específico de tiempo se optó por este módulo que al tener su propia batería permite que el Arduino pueda conocer el tiempo real en cualquier instante y se lo pueda almacenar para su uso en la interfaz gráfica.

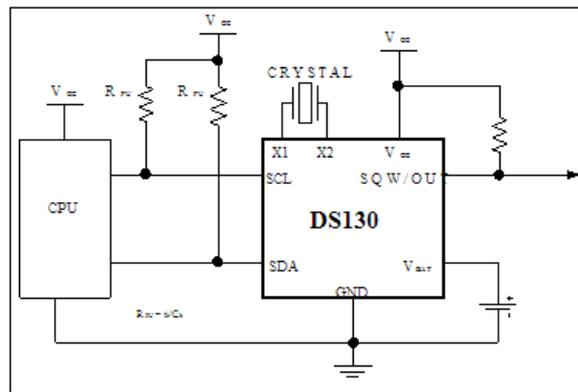


Figura 3.42 Esquemático módulo RTC DS1307

(Maxim, 2008)

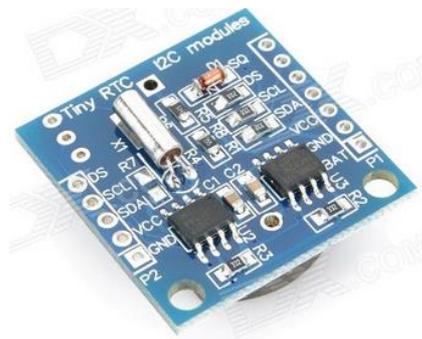


Figura 3.43 Módulo RTC DS1307

Este módulo utiliza comunicación I2C y el Arduino ya cuenta con una librería propia que permite la obtención de hora y fecha. Para su uso se debe realizar las siguientes conexiones.

- Alimentación de 5V
- SDA: Pin 20
- SCL: Pin 21

Los pines utilizados por el Arduino para comunicación I2C son los 20 y 21 por defecto.

### ***Módulo SD***

Para el almacenamiento de datos se optó por guardarlos en archivos separados en una memoria SD. Ya que esto nos permite la conexión y desconexión del equipo de control sin que se pierdan los datos ya tomados. Este módulo permite la inserción de

una tarjeta SD de hasta 1GB de capacidad, que es suficiente para los datos requeridos en la estación.

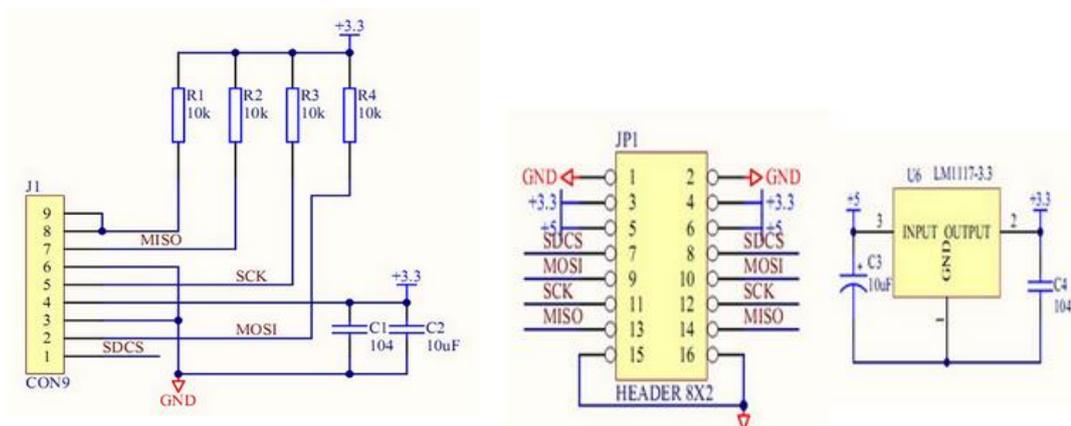


Figura 3.44 Esquemático módulo SD (Biotren, 2014)

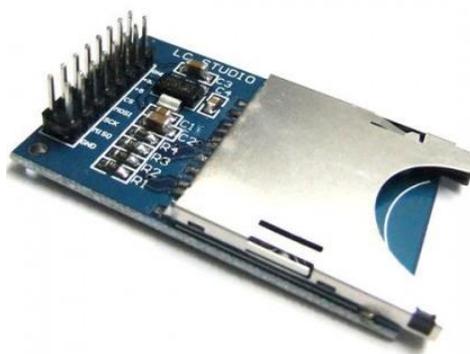


Figura 3.45 Módulo SD

El Arduino tiene una librería propia para comunicación SD y que es compatible con este módulo, para su uso con el Arduino MEGA 2560 se realiza las siguientes conexiones:

- Alimentación de 5V
- MISO: Pin 50
- MOSI: Pin 51
- SCK: Pin 52
- CS: Pin 53

## LCD 16x2

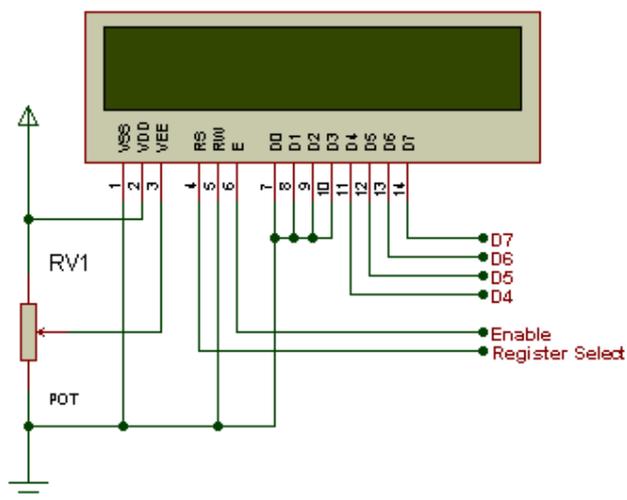


Figura 3.46 LCD 16x2

Para el caso donde no exista una computadora cerca, se añadió este indicador visual donde se irán actualizando la hora y fecha, conjuntamente con todos los valores de los sensores. Para su uso se hace las siguientes conexiones:

- RS: Pin 8
- E: Pin 9
- D4: Pin 10
- D5: Pin 11
- D6: Pin 12
- D7: Pin 13

### *Tarjeta de alimentación y conexiones*

Para obtener la alimentación para los sensores, módulos extras, agregar elementos de conexión e implementar los sensores de voltaje. Se diseña una placa propia para la aplicación donde estarán presentes:

- Regulador de 9V: Alimentación Arduino.
- Regulador de 5V: Alimentación sensores de corriente, módulos RTC y SD.

- Regulador de 3.3V: Alimentación piranómetro, veleta y anemómetro.
- Resistencia OneWire: Sensor de temperatura.
- Potenciómetro de precisión: LCD 16x2
- Sensores de voltaje: V1,V2 y V3
- Terminal remoto para inversor.

El esquemático de esta placa se halla en el ANEXO C.1.

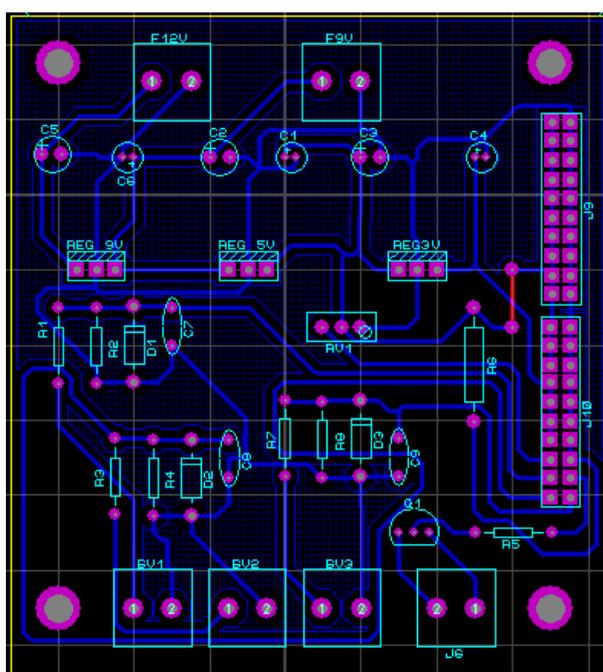


Figura 3.47 Tarjeta de alimentación y conexiones

### *Programación del Arduino*

La programación en el Arduino se realiza con el lenguaje de programación C ajustado a las condiciones propias de Arduino con su compilador. La mayoría de procesos se realizan mediante librerías que facilitan el desarrollo del programa. Las librerías usadas en el presente proyecto son:

- SD.h: es la que establece la comunicación con la tarjeta SD.
- Event.h: Activa los eventos del microcontrolador.

- Timer.h: Predefine las configuraciones necesarios para el uso de un timer en el código.
- LiquidCrystal.h: Predefine la comunicación el LCD 16x2.
- Wire.h: Estable la comunicación I2C para el reloj.
- RTCLib.h: Permite interpretar los datos obtenidos del reloj.
- OneWire.h: Establece la comunicación OneWire para el sensor de temperatura.
- DallasTemperature.h: Permite interpretar los datos del sensor de temperatura.

A continuación se presenta un algoritmo de los procesos a ejecutarse por el microcontrolador:

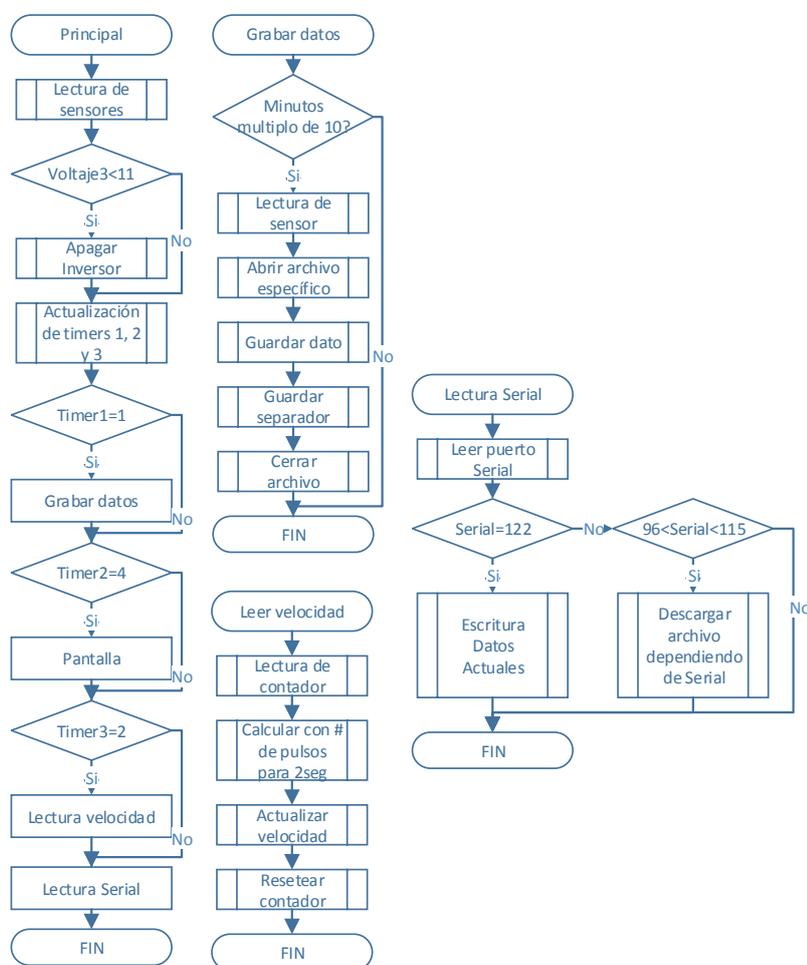


Figura 3.48 Algoritmo Arduino Parte 1

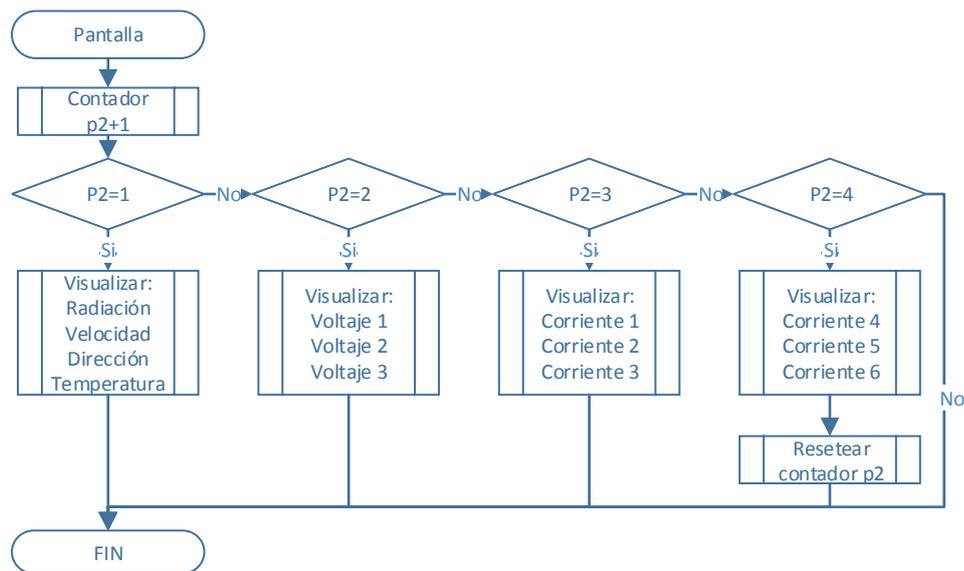


Figura 3.49 Algoritmo Arduino Parte 2

### 3.6.4 Diseño de la interfaz gráfica

#### *Ventana de inicio*

Esta ventana contiene el acceso a dos subprogramas que son análisis de datos y adquisición de datos, el primer subprograma permite visualizar variables y conocer estadísticas de los datos que están almacenados en el archivo mientras que el subprograma de adquisición de datos permite descargar los datos guardados en la memoria SD y visualizar distintas variables en tiempo real, para lo cual necesariamente debe estar conectado el arduino al computador.

En esta ventana también debe seleccionarse el puerto al cual esté conectado el arduino y el destino del archivo en el cual se grabarán los datos almacenados en la SD, destino que a su vez será usado para el análisis de datos.



Figura 3.50 Ventana de Inicio

### *Ventana de Adquisición de Datos*

Esta ventana permite comunicarse directamente con el arduino para visualizar y descargar los datos de los sensores y variables asociadas a la generación de energía.

La ventana Adquisición de datos se subdivide en tres pantallas, estas son:

- Pantalla de adquisición de datos
- Pantalla Tiempo real
- Pantalla Gráficos en tiempo real

### *Pantalla de Adquisición de Datos*

En esta pantalla se descarga los datos almacenados en la tarjeta SD, después de esto se puede visualizar los datos que han sido descargados en un indicador y se guardan las variables en el archivo determinado.

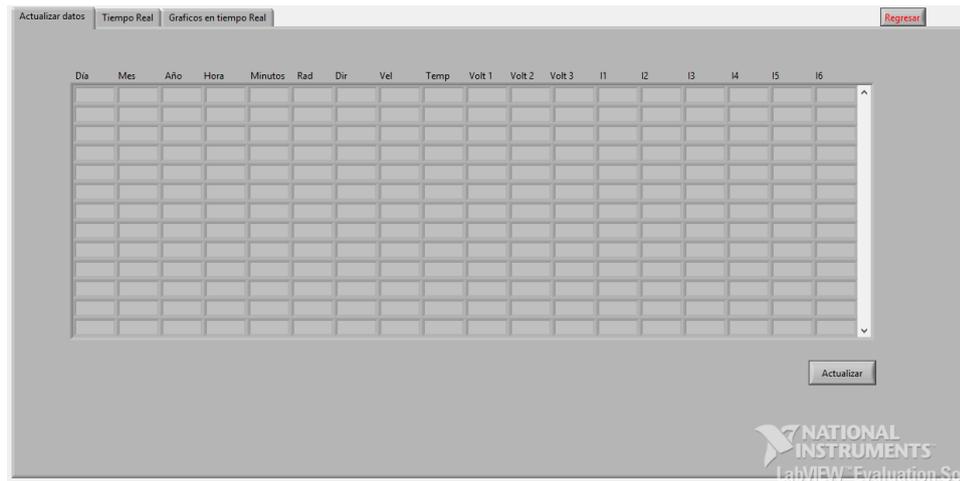


Figura 3.51 Pantalla de Adquisición de Datos

Para este procedimiento se usó el algoritmo:

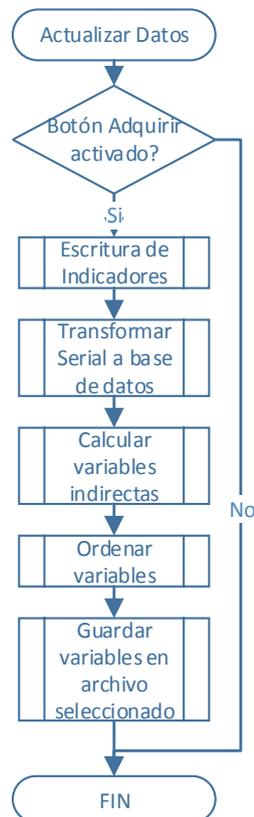


Figura 3.52 Algoritmo Adquisición de Datos

### ***Pantalla Tiempo Real***

En esta pantalla se visualizan todas las variables que se obtienen de los sensores, actualizadas cada segundo.

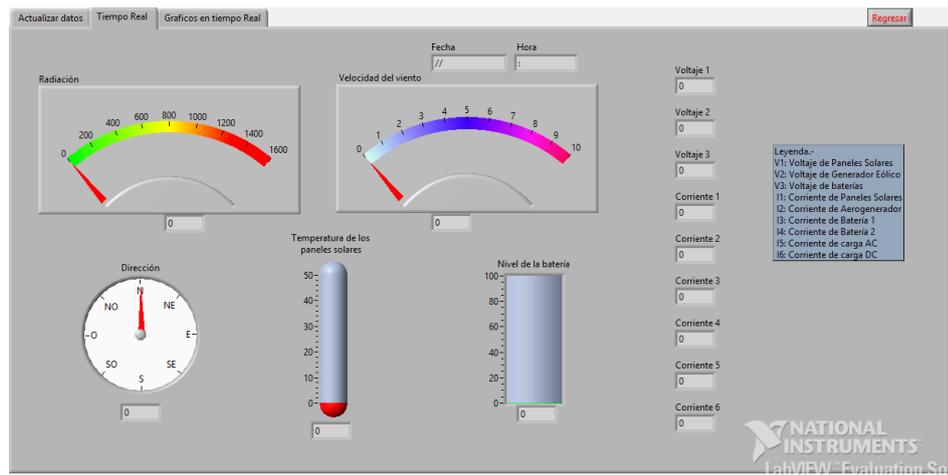


Figura 3.53 Pantalla Tiempo Real

El algoritmo de esta pantalla es simple:



Figura 3.54 Algoritmo Tiempo Real

### ***Pantalla Gráficos en Tiempo Real***

En esta pantalla se visualizan las diferentes potencias, rendimiento del aerogenerador y de los paneles solares al igual que la variación de la corriente de las baterías.

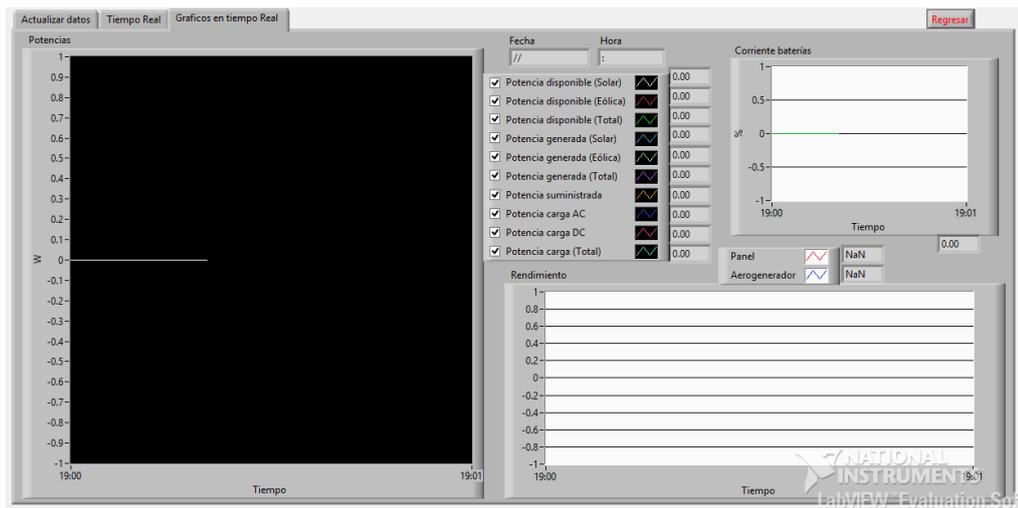


Figura 3.55 Pantalla Gráficos en tiempo real

El algoritmo es el siguiente:

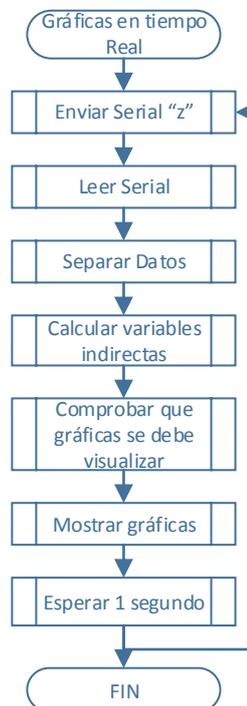


Figura 3.56 Algoritmo Gráficos en tiempo Real

### *Ventana de Análisis de Datos*

Permite analizar todos los datos almacenados en la SD y que posteriormente hayan sido descargados en el computador. Esta ventana contiene pantallas que muestran información como la variación de los datos a lo largo del tiempo, sus promedios

diarios, mensuales y anuales, valores máximos y mínimos, comparación entre distintas variables, histogramas, etc lo que hace posible conocer el comportamiento del sistema híbrido en un determinado día, mes o año.

La ventana Análisis de Datos se subdivide en seis pantallas, estas son:

- Diario individual
- Mensual individual
- Anual individual
- Diario comparativo
- Mensual comparativo
- Anual comparativo

### *Pantalla de Diario individual*

Esta pantalla permite visualizar la variación de una variable de terminada a lo largo del tiempo en el día seleccionado y comparar esta variable con otra, además indica su histograma, promedio diario, valores máximos y mínimos y la hora a la cual se produjeron y una tabla donde se pueden observar los datos tomados en el día.

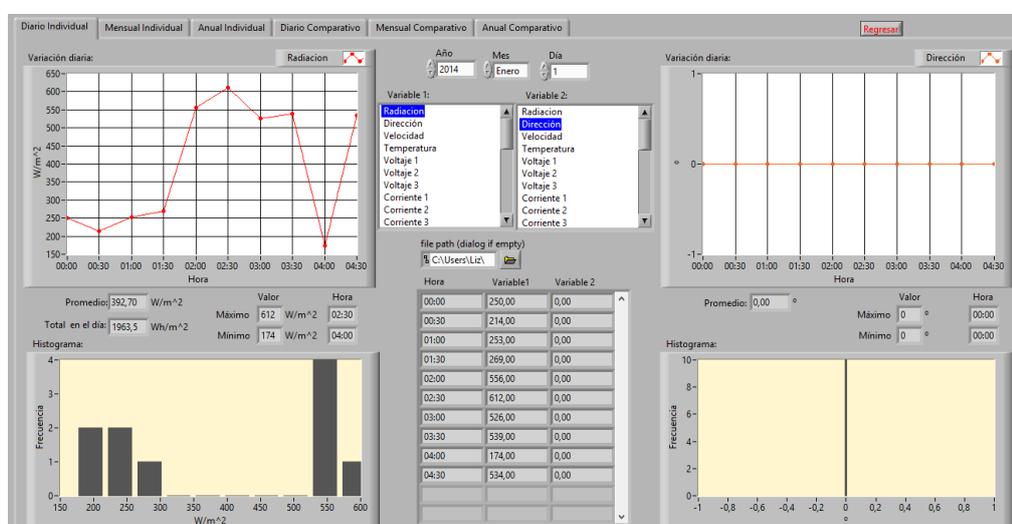


Figura 3.57 Pantalla de Diario individual

El algoritmo usado en esta pantalla es el siguiente:

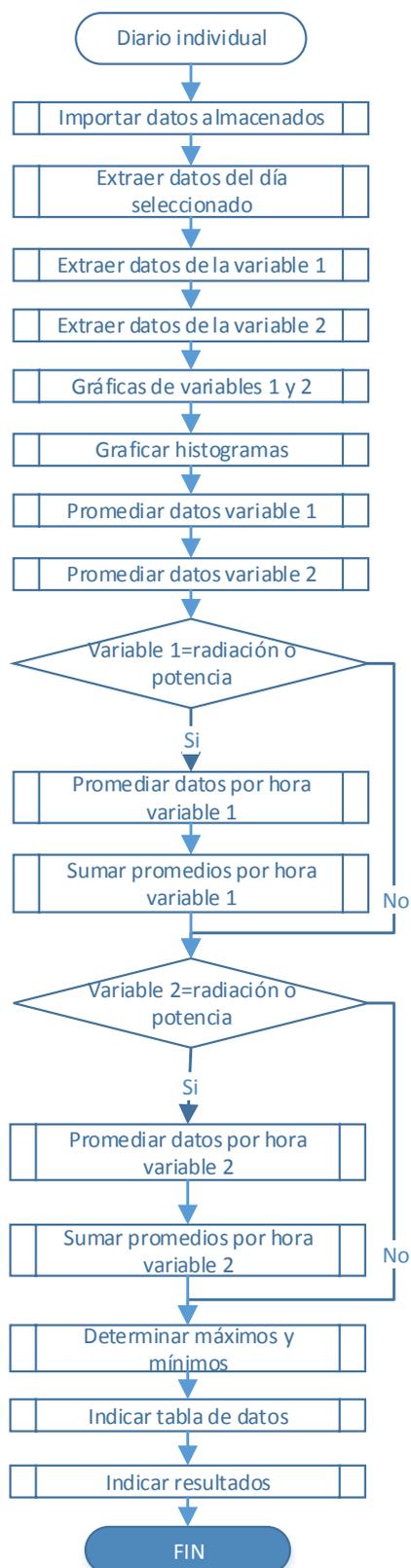


Figura 3.58 Algoritmo de la pantalla diario individual

### *Pantalla mensual individual*

Esta pantalla permite visualizar los promedios diarios de una variable determinada en el mes seleccionado, así como el histograma y la variación de los datos en el tiempo durante todo el mes.

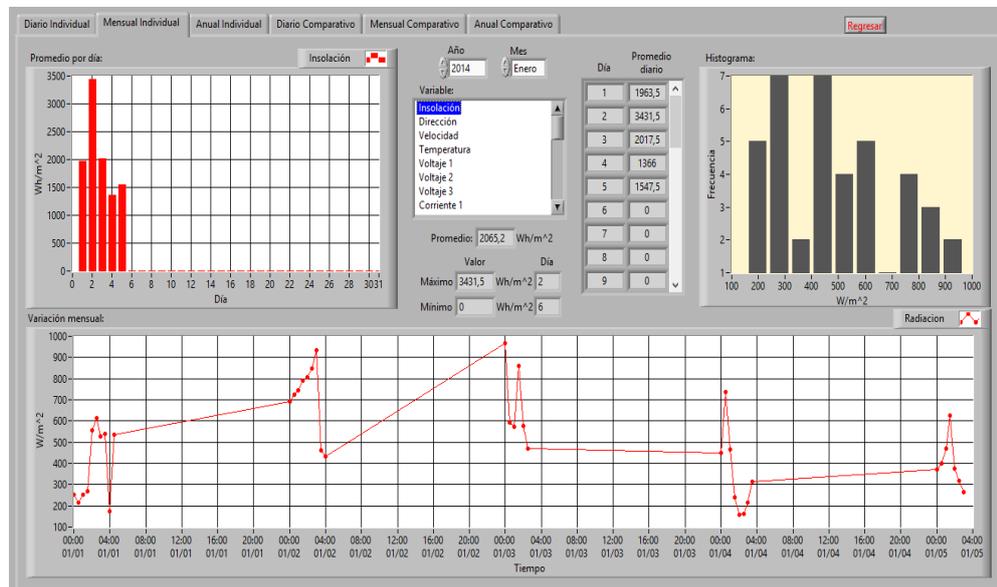


Figura 3.59 Pantalla Mensual individual

En esta pantalla se utiliza el siguiente algoritmo:

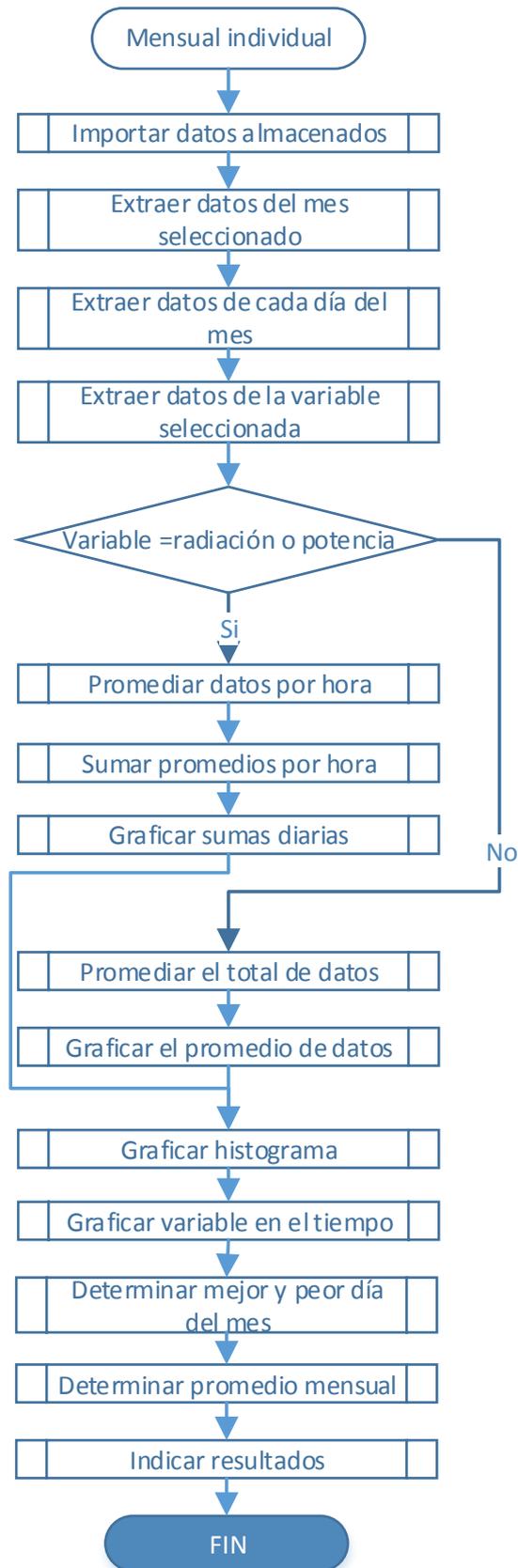


Figura 3.60 Algoritmo de la pantalla mensual individual

### *Pantalla anual individual*

Esta pantalla permite visualizar los promedios mensuales de una variable determinada en el año seleccionado, el mejor y el peor mes, el histograma y la variación de los datos en el tiempo durante todo el año.

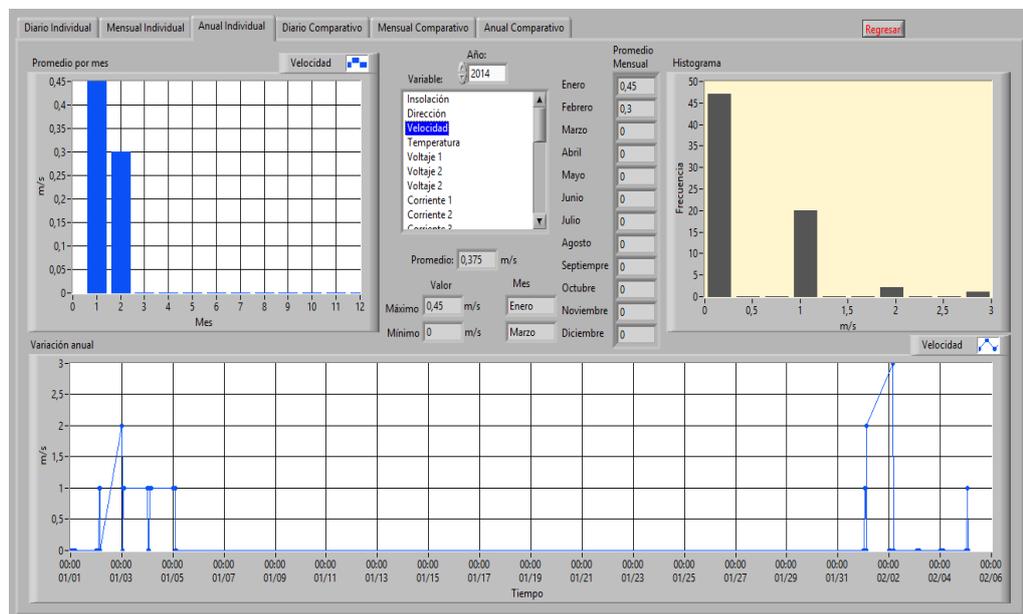


Figura 3.61 Pantalla anual individual

Su Algoritmo es el siguiente:

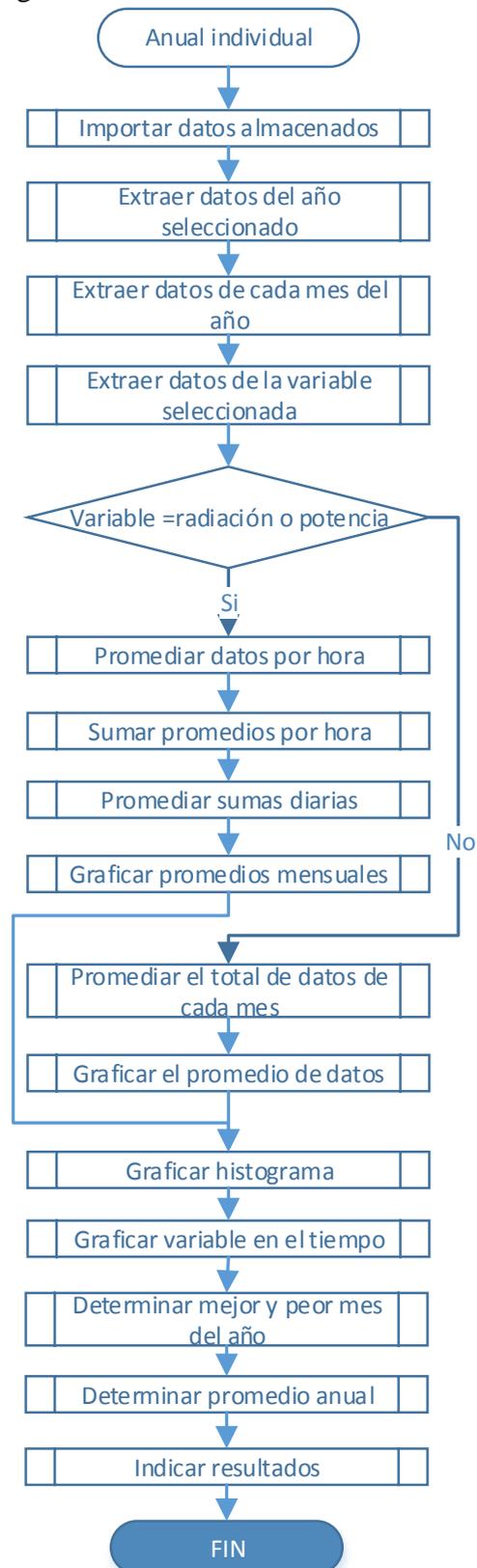


Figura 3.62 Pantalla anual individual

### *Pantalla diario comparativo*

En esta pantalla se pueden visualizar y comparar algunas gráficas de potencias en un día seleccionado, además se indica el total de energía disponible, generada y consumida en el día y el rendimiento del módulo fotovoltaico y eólico.

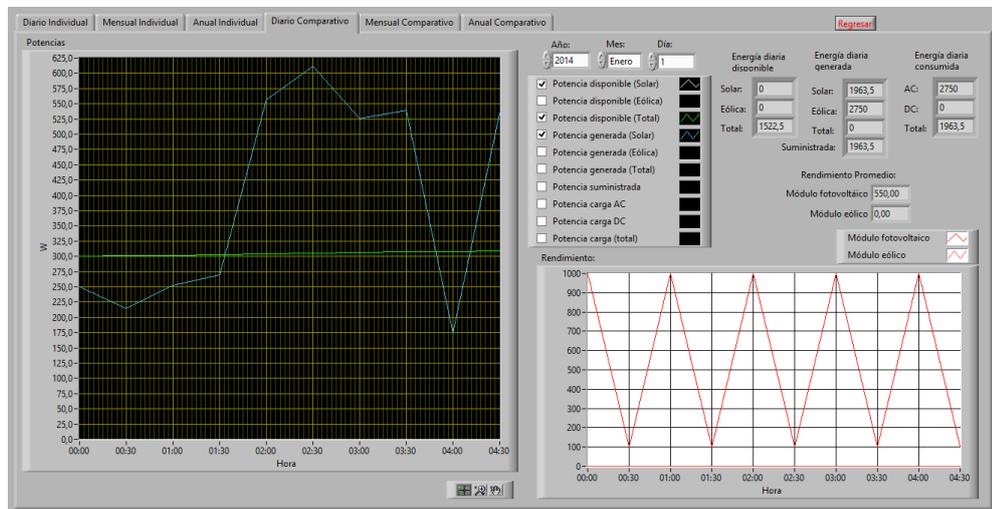


Figura 3.63 Pantalla diario comparativo

El algoritmo se indica a continuación:

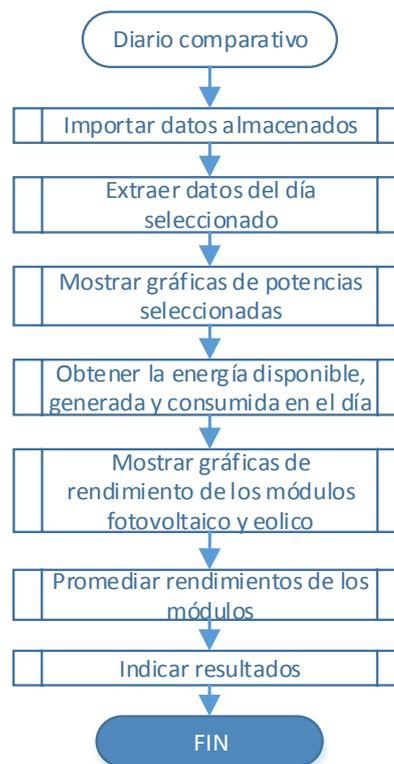


Figura 3.64 Algoritmo de la pantalla diario comparativo

### *Pantalla mensual comparativo*

Esta pantalla contiene una gráfica donde se pueden comparar algunas variables relacionadas con la energía disponible, generada y consumida diariamente en el mes seleccionado, además se indica el total de energía mensual y el promedio del rendimiento del módulo fotovoltaico y eólico.

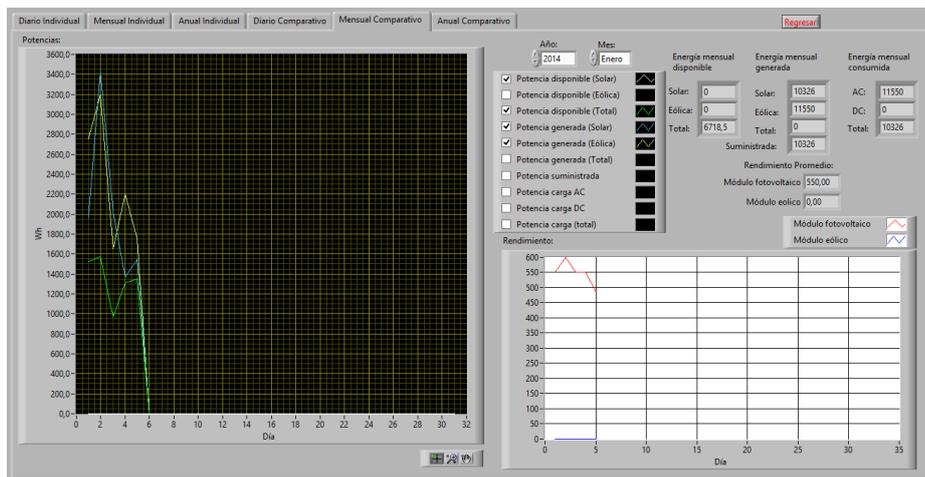


Figura 3.65 Pantalla mensual comparativo

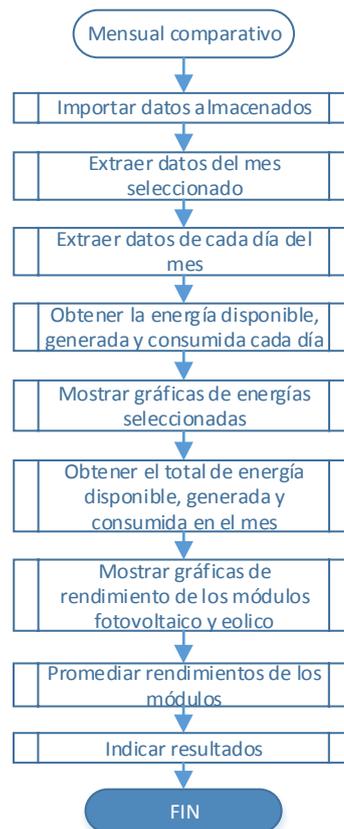


Figura 3.66 Algoritmo de la pantalla mensual comparativo

### *Pantalla anual comparativo*

Esta pantalla contiene una gráfica donde se pueden comparar algunas variables, además se indica la energía disponible, generada y consumida durante todo el año y el promedio del rendimiento del módulo fotovoltaico y eólico.

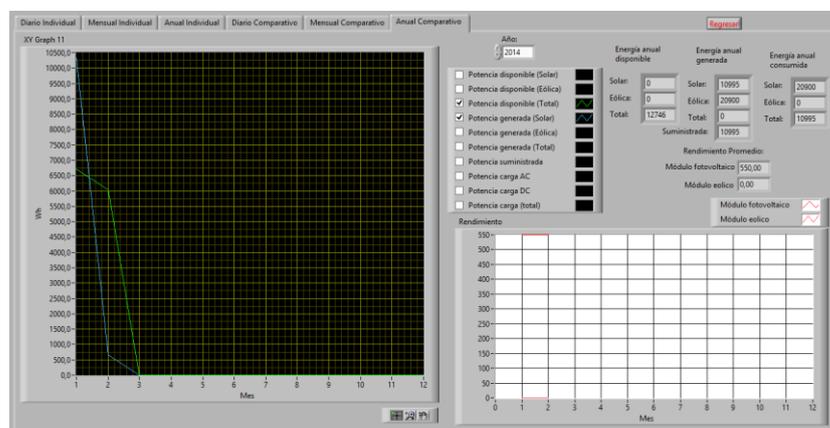


Figura 3.67 Pantalla anual comparativo

Esta pantalla tiene el siguiente algoritmo:

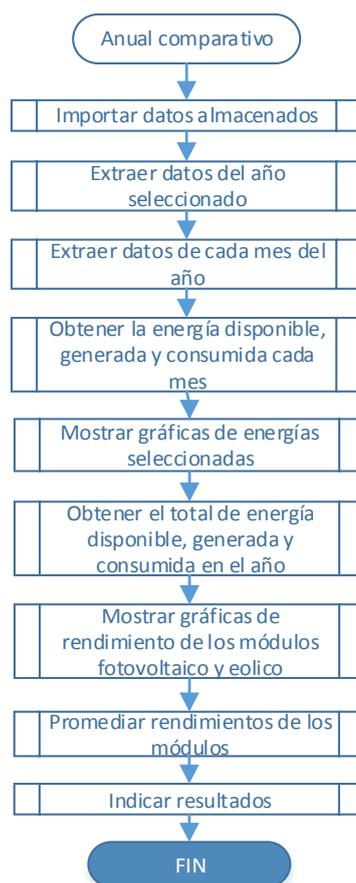


Figura 3.68 Algoritmo anual comparativo

## CAPITULO 4

### IMPELEMENTACIÓN

#### 4.1 Montaje y cableado de componentes

En este capítulo se detalla el montaje y cableado de los módulos que conforman el sistema híbrido realizado en base a los cálculos y consideraciones del capítulo anterior y las instrucciones del manual del fabricante para cada componente específico.

##### 4.1.1 Módulo Fotovoltaico

Los cuatro paneles solares que conforman el módulo fotovoltaico están colocados sobre una estructura rígida inclinada a  $15^\circ$  y ubicado en base a las siguientes consideraciones:

- El módulo debe estar ubicado en un lugar donde nunca habrá sombra, tomando en cuenta los árboles y edificios cercanos.
- Al estar ubicados en el hemisferio sur, la cara frontal del módulo debe estar orientada hacia el norte.
- El aire debe circular libremente alrededor del módulo. De este modo, se consigue disminuir la temperatura de trabajo de las células y consecuentemente, mejorar el rendimiento del módulo.



Figura 4.1 Módulo fotovoltaico

Cada uno de los paneles solares tiene dos cajas de conexión en la parte posterior, siendo una caja para el terminal positivo y otra para el terminal negativo.

Las siguientes figuras muestran los diagramas de las cajas de conexión de los dos terminales:

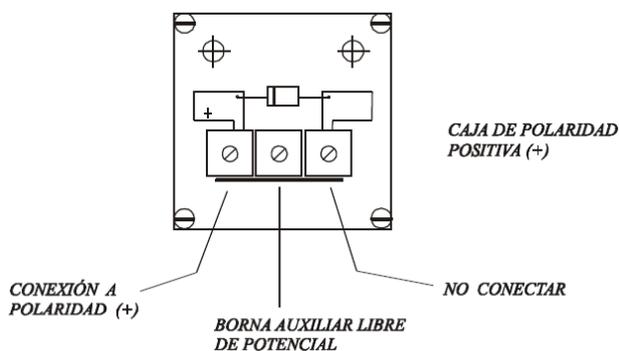


Figura 4.2 Caja de conexión del terminal positivo

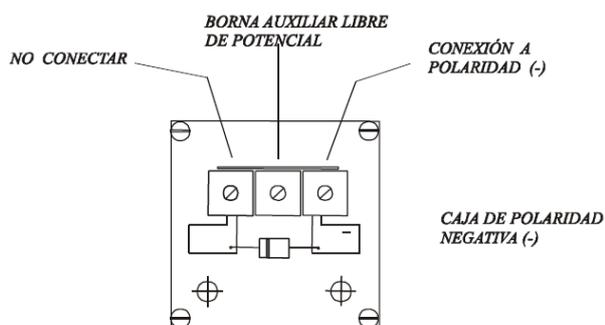


Figura 4.3 Caja de conexión del terminal negativo

Para aumentar la corriente de generación los paneles se conectan en paralelo, es decir se conectan todos los terminales positivos y todos los terminales negativos como se indica en el ANEXO B.

Para realizar la conexión de los terminales se siguen las siguientes recomendaciones:

- Trabajar siempre bajo condiciones secas, tanto para el módulo como las herramientas.

- Cubrir totalmente la superficie del módulo con un material opaco durante la instalación, desmontaje o manipulación.
- Utilizar herramientas que estén debidamente revestidas con material aislante durante los trabajos con el módulo.
- No tocar los contactos mientras el módulo esté expuesto a la luz.

#### 4.1.2 Módulo Eólico

La instalación del aerogenerador se realiza tomando en cuenta los siguientes aspectos:

- Ubicar el aerogenerador lejos de obstáculos que puedan impedir el paso del viento.
- No instalar el aerogenerador donde alguien pueda aproximarse a las palas.
- No permitir que el rotor gire hasta después de realizar el montaje en la torre.

Se instaló el aerogenerador dentro de un tubo de acero con un diámetro interno estándar de 51 mm a una altura de 2.5 m empernado al suelo.



Figura 4.4 Instalación del Aerogenerador

### 4.1.3 Módulo de distribución

El módulo de distribución, conformado por las baterías, reguladores e inversor se encuentra dentro de dos cajas de control, una exclusivamente para las baterías y otra para los demás elementos del sistema.

#### *Baterías*

El sistema cuenta con dos baterías conectadas en paralelo, estas baterías emiten gases que pueden afectar a los demás componentes del sistema, por lo que se instalan en un compartimiento separado. Su instalación se realiza en base a las siguientes recomendaciones:

- Situar las baterías en un compartimento que las proteja de la intemperie para evitar la acción degradante de los agentes atmosféricos.
- Situar las baterías lo más cercano posible a los paneles, para minimizar el costo y la caída de tensión en los mismos.
- Ubicar las baterías en un lugar seco y ventilado para evitar la acumulación de gases al alcanzar la plena carga.
- Asegurar facilidad de acceso para el montaje y mantenimiento de las baterías.



Figura 4.5 Almacenamiento de baterías

### ***Reguladores***

Posteriormente se realiza el montaje de los reguladores tomando en cuenta lo siguiente:

- Los dos reguladores deben ser colocados sobre una superficie vertical asegurando que exista suficiente ventilación, en un área protegida de la lluvia y del sol directo.
- No debe ser ubicado en un lugar donde se puedan acumular los gases de la batería.
- Antes de conectar la batería, medir la tensión de circuito abierto, éste debe estar sobre los 8 voltios para permitir operar a cada controlador.
- Seleccionar el tipo de batería conectada al sistema mediante una llave rotativa que posee el controlador solar. Hay 3 opciones: Batería de gel, sellada y con líquido. Para este sistema se debe seleccionar Batería sellada.
- Asegurarse de la correcta polarización de la batería para conectarla al controlador.

### ***Inversor***

El inversor debe estar ubicado en un lugar que cumpla los siguientes requisitos:

- No permitir el paso de agua al inversor
- Tener una temperatura entre 0°C y 40° C.
- No instalar en el mismo compartimiento que la batería.
- Tener una buena ventilación para evitar sobrecalentamientos.
- No instalar en lugares con polvo o pequeñas partículas que puedan obstruir el funcionamiento del ventilador.



Figura 4.6 Proceso de montaje del módulo de distribución

#### 4.1.4 Módulo de Monitoreo

Los elementos que conforman este módulo están colocados en una caja de control que será la encargada de tomar datos de la estación, almacenarlos en una memoria y comunicarse con el computador mediante una interfaz. Para su implementación se realiza lo siguiente:

- Elaboración de la placa de alimentación y conexiones: Se sueldan los componentes de la placa cuyo circuito impreso se halla en el ANEXO C.2.

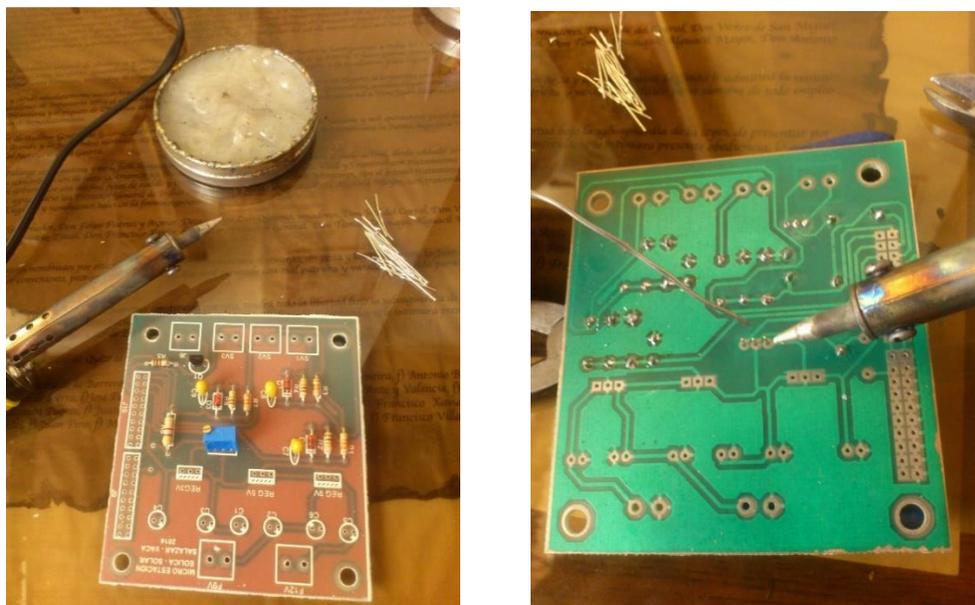


Figura 4.7 Soldadura de componentes

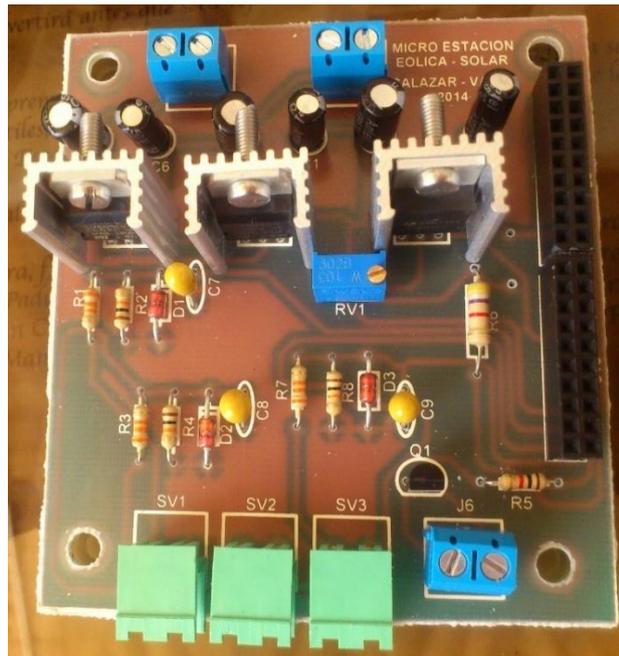


Figura 4.8 Placa de alimentación y conexiones

- Construcción de la caja de control: Se realizan ranuras en la caja para los componentes que se visualizan o manipulan desde el exterior como son: pantalla LCD, ajuste de luz del LCD, interruptor, fusible, tarjeta SD, sensores, alimentación del Arduino y mando remoto del inversor.
- Ensamblaje: Se colocan y fijan en el interior de la caja todos los elementos que la conforman.

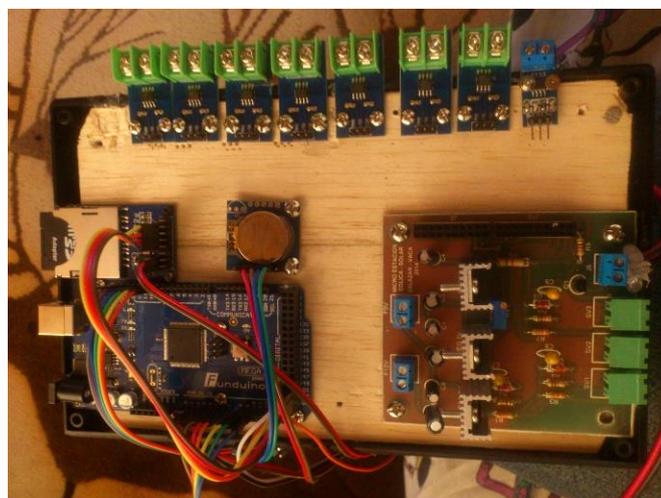


Figura 4.9 Ensamblaje de la caja de control

- Conexión de componentes: Se conectan todos los componentes del sistema.

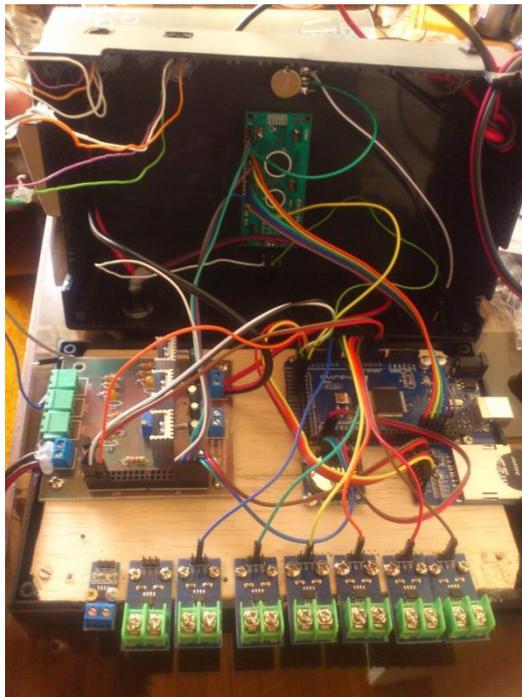


Figura 4.10 Conexión de componentes

- Identificación de sensores y componentes: Se etiquetan todos los conectores y demás componentes para facilitar la conexión.



Figura 4.11 Módulo de monitoreo

### ***Instalación de sensores de variables climáticas***

El piranómetro está ubicado a un costado de los paneles solares sujeto a estos mediante una estructura que permite que este alineado al eje horizontal y así determinar de forma correcta la radiación solar.



Figura 4.12 Piranómetro instalado

El anemómetro y la veleta están colocados en el tubo del rotor mediante dos sujetadores metálicos, éstos se colocan próximos al aerogenerador para determinar con mayor exactitud la dirección y velocidad del viento al que está sometido.



Figura 4.13 Anemómetro y veleta

El sensor de temperatura está colocado sobre uno de los paneles solares cuyo voltaje depende de este factor.



Figura 4.14 Sensor de temperatura

## 4.2 Conexión del sistema

Cada uno de los módulos que conforman el sistema híbrido, están interconectados entre sí de acuerdo a los planos del ANEXO B con sus respectivos fusibles y sensores.

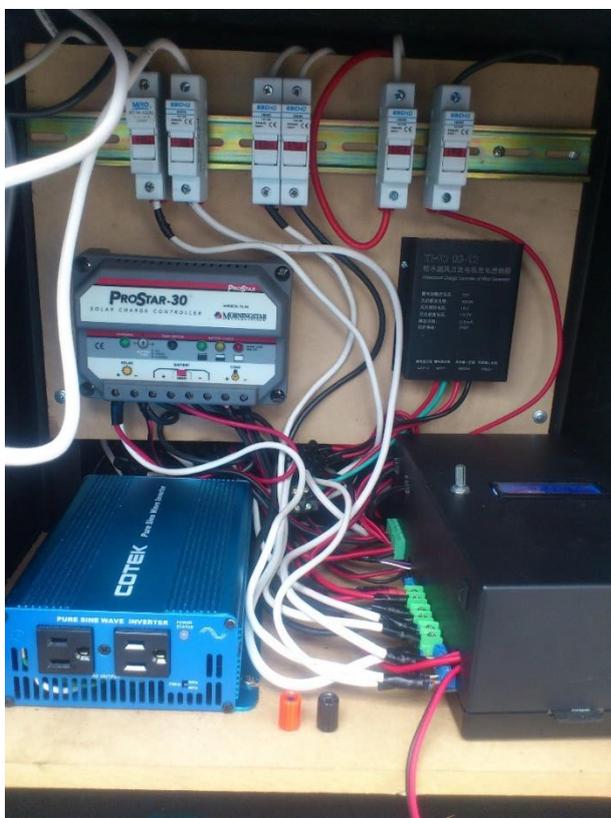


Figura 4.15 Conexiones del módulo de distribución y monitoreo

## 4.3 Puesta en marcha de la Estación

Para que el sistema empiece a funcionar se siguen los procesos y conexiones en el siguiente orden:

- Verificar que el voltaje en los bornes de la batería sea hasta 1.4 veces su voltaje nominal.
- Conectar los cables de la batería al regulador empezando por los terminales próximos al regulador y conectar sus respectivos sensores de corriente. Las baterías deben ser conectadas primero, ya que esto activará las prestaciones de protección de los controladores.

- Conectar los cables de los paneles solares y del aerogenerador a sus respectivos reguladores con sus respectivos sensores de corriente.
- Conectar el inversor a las baterías con su respectivo sensor de corriente. El inversor posee un interruptor con tres posiciones, para realizar la conexión debe estar en OFF y posteriormente activarlo ON o activar su mando remoto.
- Conectar la alimentación del sistema de monitoreo y sus respectivos sensores de voltaje y variables climáticas.

## CAPITULO 5

### PRUEBAS Y RESULTADOS

#### 5.1 Pruebas de sensores

Para asegurar el correcto funcionamiento de los sensores en la estación híbrida se compararan los valores obtenidos por los mismos con los de un instrumento referencial, las variables climatológicas serán comparadas con el equipo meteorológico Vantage-Pro y las variables eléctricas con un multímetro. Se realizarán ocho mediciones cada 5 min y se obtendrá el error relativo antes y después de la calibración de los sensores.

##### 5.1.1 Resultados

Las pruebas se hicieron para los sensores que conforman la microcentral con la excepción de los sensores de temperatura, velocidad del viento y corriente DC. En el caso de la temperatura y velocidad del viento dan directamente el valor sentido, sin necesidad de un acondicionamiento. El sensor de corriente DC presenta exactamente las mismas características del sensor de corriente 2 que corresponde a la generación eólica, por lo que se calibra de la misma manera.

Como se observa en los datos tomados, los sensores necesitan de una calibración a excepción del sensor de corriente 1. Los valores de error son demasiado altos para dejarlos de esa manera. En el caso de la radiación solar se debe a que en el cálculo realizado en el datasheet se usa una alimentación de 3V, mientras que en la microcentral esto se realiza con 3.3V. En los sensores de voltaje y corriente se debe al error propio interno de las resistencias ya que su valor no es exacto.

En la siguiente tabla se indican los resultados obtenidos:

Cuadro 5.1  
Prueba de sensores antes de calibración parte 1

	<b>Toma de datos</b>	<b>Dirección (°)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Voltaje 1 (V)</b>	<b>Voltaje 2 (V)</b>	<b>Voltaje 3 (V)</b>
<b>1</b>	sensor	343	729	16.44	5.54	11.95
	referencia	360	612	18.20	6.50	13.00
	error	4.72	19.12	9.67	14.77	8.08
<b>2</b>	sensor	48	617	16.75	3.34	11.97
	referencia	45	612	18.70	3.90	12.90
	error	6.67	0.82	10.43	14.36	7.21
<b>3</b>	sensor	91	750	16.59	2.38	11.95
	referencia	90	650	18.50	3.00	12.90
	error	1.11	15.38	10.32	20.67	7.36
<b>4</b>	sensor	138	792	15.75	11.18	11.80
	referencia	135	691	17.10	12.30	12.80
	error	2.22	14.62	7.89	9.11	7.81
<b>5</b>	sensor	165	1308	15.41	2.79	11.65
	referencia	180	1145	16.60	3.50	12.60
	error	8.33	14.24	7.17	20.29	7.54
<b>6</b>	sensor	220	294	16.69	6.42	13.70
	referencia	225	276	18.60	7.80	13.23
	error	2.22	6.52	10.27	17.69	3.55
<b>7</b>	sensor	265	300	16.69	6.38	12.74
	referencia	270	279	18.40	7.60	13.00
	error	1.85	7.53	9.29	16.05	2.00
<b>8</b>	sensor	309	306	16.59	7.44	12.68
	referencia	315	287	18.60	8.40	13.00
	error	1.90	6.62	10.81	11.43	2.46
	<b>Error Promedio</b>	3.63	10.61	9.48	15.54	5.75

En el caso de la temperatura y velocidad del viento dan directamente el valor sentido, sin necesidad de un acondicionamiento. El sensor de corriente DC presenta exactamente las mismas características del sensor de corriente 2 que corresponde a la generación eólica, por lo que se calibra de la misma manera.

Cuadro 5.2  
Prueba de sensores antes de calibración parte 2

Toma de datos		Corriente 1 (A)	Corriente 2 (A)	Corriente 3 (A)	Corriente 4 (A)	Corriente 5 (A)
<b>1</b>	sensor	11.56	0.63	7.18	4.83	4.83
	referencia	11.60	0.80	5.00	5.50	5.00
	error	0.34	21.25	43.60	12.18	3.40
<b>2</b>	sensor	12.14	0.49	11.33	6.79	0.88
	referencia	12.20	0.60	12.10	7.80	1.00
	error	0.49	18.33	6.36	12.95	12.00
<b>3</b>	sensor	11.79	2.20	7.62	8.89	2.27
	referencia	11.90	2.40	8.80	10.00	2.50
	error	0.92	8.33	13.41	11.10	9.20
<b>4</b>	sensor	12.18	2.64	2.29	7.67	0.73
	referencia	12.20	2.80	2.80	8.60	0.80
	error	0.16	5.71	18.21	10.81	8.75
<b>5</b>	sensor	11.67	0.05	8.89	3.47	0.37
	referencia	11.70	0.10	10.00	4.00	0.40
	error	0.26	50.00	11.10	13.25	7.50
<b>6</b>	sensor	11.58	1.12	3.81	9.86	1.54
	referencia	11.60	1.30	4.20	11.20	1.70
	error	0.17	13.85	9.29	11.96	9.41
<b>7</b>	sensor	12.23	1.22	4.39	3.96	0.44
	referencia	12.30	1.40	5.00	4.50	0.50
	error	0.57	12.86	12.20	12.00	12.00
<b>8</b>	sensor	11.34	1.61	8.30	5.18	0.37
	referencia	11.40	1.90	8.60	6.00	0.40
	error	0.53	15.26	3.49	13.67	7.50
<b>Error Promedio</b>		0.43	18.20	14.71	12.24	8.72

Como se observa en los datos tomados, los sensores necesitan de una calibración a excepción del sensor de corriente 1. Los valores de error son demasiado altos para dejarlos de esa manera. En el caso de la radiación solar se debe a que en el cálculo realizado en el datasheet se usa una alimentación de 3V, mientras que en la microcentral esto se realiza con 3.3V. En los sensores de voltaje y corriente se debe al error propio interno de las resistencias ya que su valor no es exacto.

Cuadro 5.3  
Prueba de sensores calibrados parte 1

	<b>Toma de Datos</b>	<b>Dirección (°)</b>	<b>Radiación (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Voltaje 1 (V)</b>	<b>Voltaje 2 (V)</b>	<b>Voltaje 3 (V)</b>
<b>1</b>	sensor	358	295	18.55	11.48	12.50
	referencia	360	294	18.5	11.50	12.56
	error	0.56	0.34	0.27	0.17	0.48
<b>2</b>	sensor	43	293	15.3	4.77	12.53
	referencia	45	292	14.9	4.80	12.58
	error	4.44	0.34	2.68	0.63	0.40
<b>3</b>	sensor	87	293	15	10.60	12.48
	referencia	90	292	14.6	10.50	12.53
	error	3.33	0.34	2.74	0.95	0.40
<b>4</b>	sensor	134	310	18.65	11.70	12.57
	referencia	135	309	18.6	11.60	12.62
	error	0.74	0.32	0.27	0.86	0.40
<b>5</b>	sensor	178	302	18.62	6.34	12.55
	referencia	180	302	18.7	6.50	12.62
	error	1.11	0.00	0.43	2.46	0.55
<b>6</b>	sensor	223	305	18.79	11.26	12.46
	referencia	225	302	18.7	11.30	12.52
	error	0.89	0.99	0.48	0.35	0.48
<b>7</b>	sensor	265	308	18.65	4.29	12.48
	referencia	270	309	18.5	4.40	12.55
	error	1.85	0.32	0.81	2.50	0.56
<b>8</b>	sensor	312	321	15.35	6.82	12.90
	referencia	315	320	14.7	6.80	13.00
	error	0.95	0.31	4.42	0.29	0.77
<b>Error Promedio</b>		1.73	0.37	1.51	1.03	0.50

Después de realizada la calibración, el error máximo es de 3.5 correspondiente a la generación eólica. Esto se debe a que los valores de esta variable son bajos, logrando que una pequeña variación amplía el error absoluto.

Cuadro 5.4  
Prueba de sensores calibrados parte 2

Toma de Datos		Corriente 1 (A)	Corriente 2 (A)	Corriente 3 (A)	Corriente 4 (A)	Corriente 5 (A)
<b>1</b>	sensor	21.75	1.53	5.03	4.74	11.87
	referencia	22.10	1.60	5.00	4.90	11.70
	error	1.58	4.38	0.60	3.27	1.45
<b>2</b>	sensor	4.03	2.67	3.22	3.12	19.56
	referencia	4.10	2.70	3.30	3.10	19.90
	error	1.71	1.11	2.42	0.65	1.71
<b>3</b>	sensor	11.06	2.26	2.34	2.25	19.41
	referencia	11.20	2.30	2.30	2.30	20.00
	error	1.25	1.74	1.74	2.17	2.95
<b>4</b>	sensor	7.47	2.64	3.61	3.47	20.07
	referencia	7.60	2.70	3.60	3.50	20.30
	error	1.71	2.22	0.28	0.86	1.13
<b>5</b>	sensor	10.84	1.32	4.79	4.64	15.01
	referencia	10.80	1.30	4.70	4.50	14.80
	error	0.37	1.54	1.91	3.11	1.42
<b>6</b>	sensor	8.42	1.12	3.61	3.47	22.05
	referencia	8.60	1.30	3.70	3.50	21.90
	error	2.09	13.85	2.43	0.86	0.68
<b>7</b>	sensor	8.50	3.54	4.39	4.30	21.24
	referencia	8.50	3.60	4.40	4.30	21.50
	error	0.00	1.67	0.23	0.00	1.21
<b>8</b>	sensor	8.79	2.56	4.44	4.35	17.65
	referencia	8.90	2.60	4.40	4.40	18.00
	error	1.24	1.54	0.91	1.14	1.94
<b>Error Promedio</b>		1.24	3.50	1.32	1.51	1.56

Después de realizada la calibración, el error máximo es de 3.5 correspondiente a la generación eólica. Esto se debe a que los valores de esta variable son bajos, logrando que una pequeña variación amplía el error absoluto.

## 5.2 Pruebas de generación

Estas pruebas pretenden obtener el rendimiento de los paneles solares y el generador eólico, para lo cual se utiliza la ecuación 3.8. Se tomaran datos de 4 días y posteriormente se comparará el promedio con los valores teóricos.

Los datos tomados se indican en la siguiente tabla:

**Cuadro 5.5**  
Datos prueba de Generación

	<b>Día</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>Promedio</b>
	<b>Fecha</b>	13/06	23/06	25/06	26/06	
<b>Solar</b>	<b>Ener. Disp.</b>	16698	18526	15495	6447	14291.5
	<b>Ener. Gen.</b>	1690	1468	1572	603	1333.25
	<b>Eficiencia</b>	10.1%	7.9%	10.1%	9.3%	9.3%
<b>Eólica</b>	<b>Ener. Disp.</b>	37.16	170.06	42.32	16.31	66.4625
	<b>Ener. Gen.</b>	2.64	19.07	2.33	0	6.01
	<b>Eficiencia</b>	7.1%	11.2%	5.5%	0%	5.9%

Los datos fueron tomados en días donde se produjo el consumo de la energía generada, ya que en días donde no hay consumo no se puede saber la eficiencia real de los módulos de generación.

### 5.2.1 Resultados

A continuación se muestra una tabla comparativa donde se muestran los valores teóricos y prácticos:

**Cuadro 5.6**  
Resultados pruebas de generación

	<b>Solar</b>		<b>Eólica</b>	
	<b>Práctica</b>	<b>Teórica</b>	<b>Práctica</b>	<b>Teórica</b>
<b>Ener. Disponible</b>	14291.5	19408.5	66.4625	178.3735
<b>Ener. generada</b>	1333.25	1872.75	6.01	60
<b>Eficiencia</b>	9.4%	9.6%	6.0%	33.6%

A continuación se muestran las gráficas del día 1 correspondiente al 13 de junio.

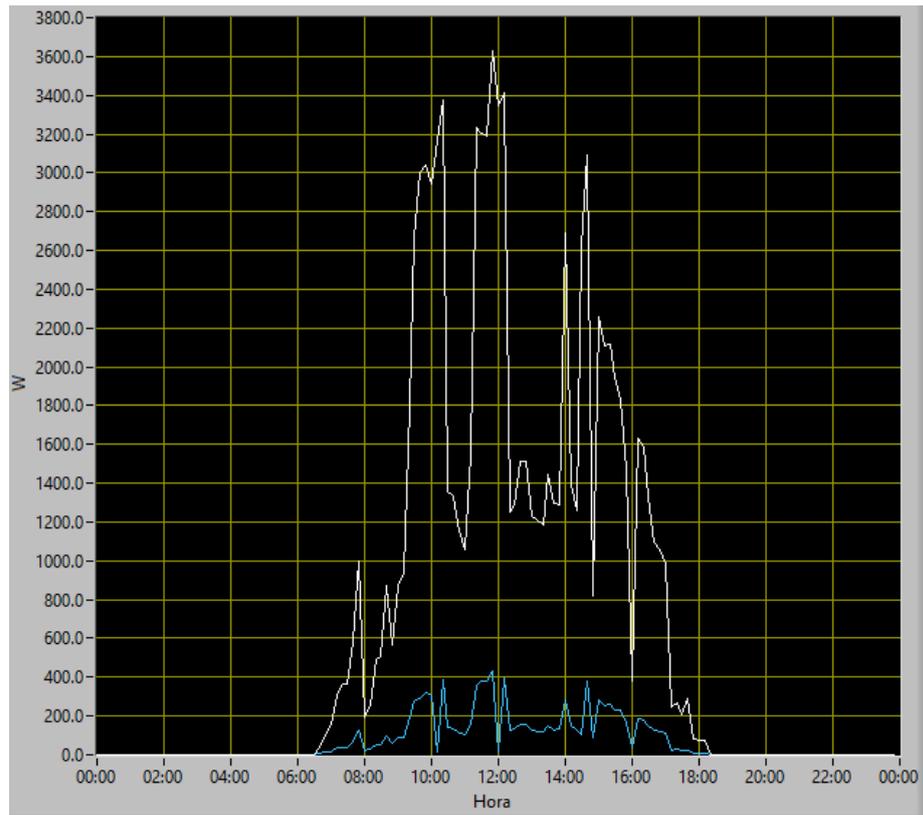


Figura 5.1 Potencia Generada vs Potencia Disponible (Solar)

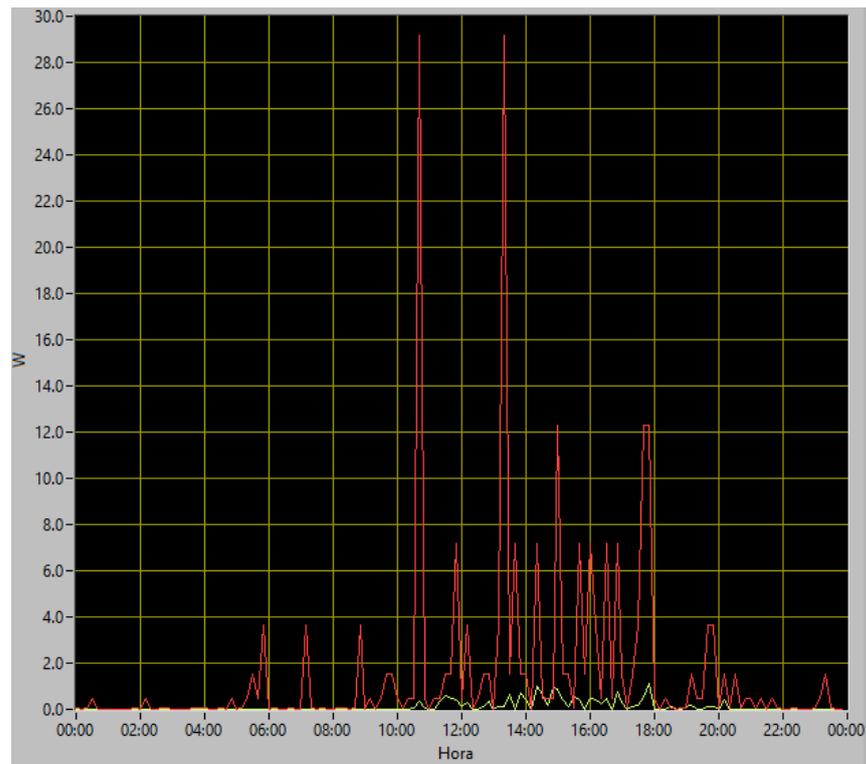


Figura 5.2 Potencia Generada vs Potencia Disponible (Eólica)

Teóricamente el módulo fotovoltaico tiene una eficiencia de 12%, mientras que en las pruebas de generación se obtuvo una eficiencia de 9.3%. En la práctica no se llega a este valor debido a que la temperatura en la superficie del panel se eleva hasta los 60° C, mientras que la temperatura óptima de trabajo es de 25°C.

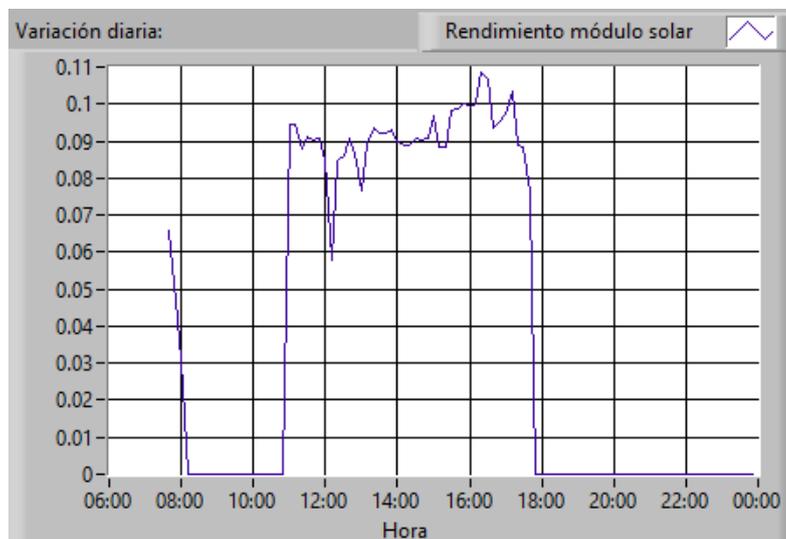


Figura 5.3 Rendimiento módulo Solar (13/06/2014)

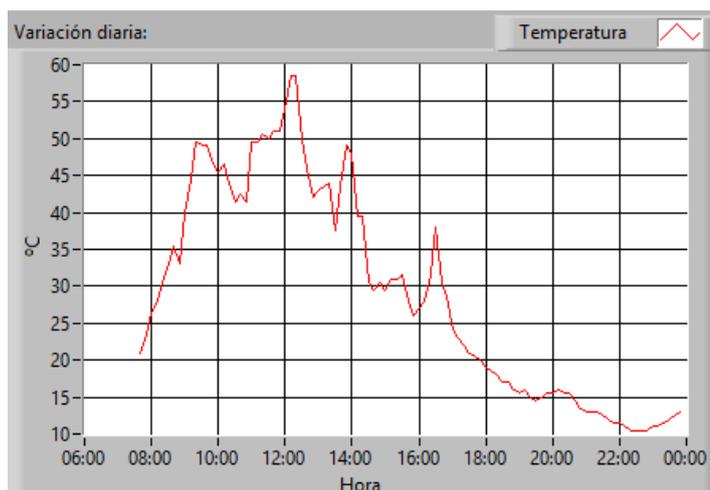


Figura 5.4 Temperatura (13/06/2014)

La eficiencia obtenida del aerogenerador es de 5.9%, mientras que su eficiencia teórica es de 33.6% a 5 m/s. Principalmente se debe a que el aerogenerador se halla trabajando a velocidades bajas, llegando al punto de detenerse por períodos de tiempo prolongados.

### 5.3 Pruebas de descarga

Se realizarán dos pruebas de descarga para verificar la autonomía del sistema, se desconectarán los sistemas de generación y se partirá con la batería completamente llena. Se simulará cargas predefinidas como se detallan a continuación.

#### 5.3.1 Descarga 1

En esta prueba se conectará la carga de 300 W AC para observar el proceso de descarga y la duración de la batería.

Cuadro 5.7  
Resultados Descarga 1

	Unidad	Horas				
		1	2	3	4	5
<b>Carga</b>	W	325.00	325.00	325.00	300.00	300.00
<b>Corriente de batería 1</b>	A	-0.79	-15.69	-15.67	-14.04	-14.32
<b>Corriente de batería 2</b>	A	-0.55	-15.35	-15.18	-13.92	-14.14
<b>Nivel de batería</b>	%	94.79	75.83	65.21	50.42	28.13
<b>Corriente Consumo</b>	A	10.36	31.04	30.85	27.95	28.46
<b>Energía de Consumo</b>	Wh	120.26	357.17	352.32	315.95	316.32
<b>Hora Inicio:</b>		14h40		<b>Hora Fin:</b>		18h50
<b>Tiempo de descarga:</b>		4h 10m		<b>Ener. Consumida (Wh)</b>		1462

El consumo total diario durante la primera prueba de descarga fue de 1462 Wh, lo cual cumple con la energía AC esperada de 1440 Wh.

Como se observa en la tabla la potencia de consumo es mayor a la de la carga, esto se debe a que el inversor posee un ventilador interno para disminuir la temperatura de trabajo, esta potencia es de aproximadamente 25W.

A partir de la cuarta hora de trabajo continuo la carga se disminuyó a 300W debido a que el inversor dio la alerta de temperatura elevada, sin embargo el consumo total diario si cumplió con lo deseado.

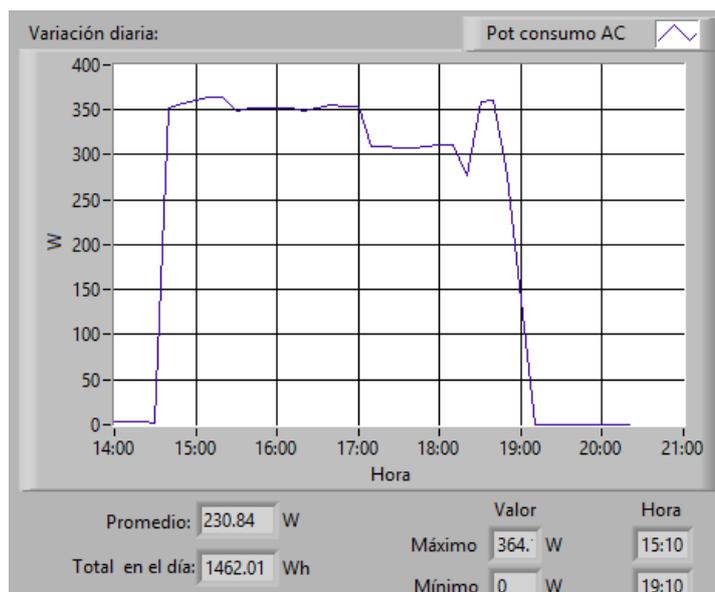


Figura 5.5 Potencia consumo AC (09/06/2014)

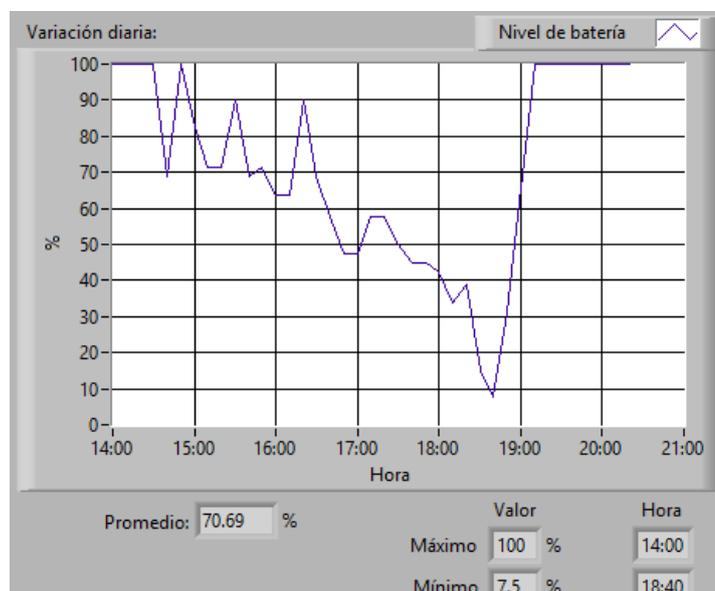


Figura 5.6 Nivel de batería (09/06/2014)

### 5.3.2 Descarga 2

En esta prueba las cargas se partirá de una carga establecida de 285W y se irá disminuyendo cada hora hasta que la batería llegue a su mínimo, con esta prueba se pretende observar el comportamiento de la batería ante la variación de las cargas.

Cuadro 5.8  
Resultados descarga 2

		Horas			
	Unidad	1	2	3	4
<b>Carga</b>	W	285.00	260.00	200.00	180.00
<b>Corriente de batería 1</b>	A	-11.77	-12.22	-9.95	-8.88
<b>Corriente de batería 2</b>	A	-11.47	-11.56	-9.47	-8.39
<b>Nivel de batería</b>	%	78.75	57.29	37.08	39.75
<b>Corriente Consumo</b>	A	25.80	24.09	20.10	17.83
<b>Energía de Consumo</b>	Wh	296.56	273.70	225.02	198.58

		Horas			
		5	6	7	8
<b>Carga</b>	W	160.00	145.00	85.00	60.00
<b>Corriente de batería 1</b>	A	-7.39	-7.49	-5.13	-1.49
<b>Corriente de batería 2</b>	A	-6.89	-6.63	-3.39	-0.86
<b>Nivel de batería</b>	%	32.50	7.75	0.63	22.92
<b>Corriente Consumo</b>	A	15.54	14.66	8.60	1.70
<b>Energía de Consumo</b>	Wh	173.45	160.72	93.39	18.74
<b>Hora Inicio</b>	11h10	<b>Hora Fin:</b>		18h30	
<b>Tiempo de descarga:</b>	5h 20m	<b>Ener. Consumida (Wh):</b>		1442.84	

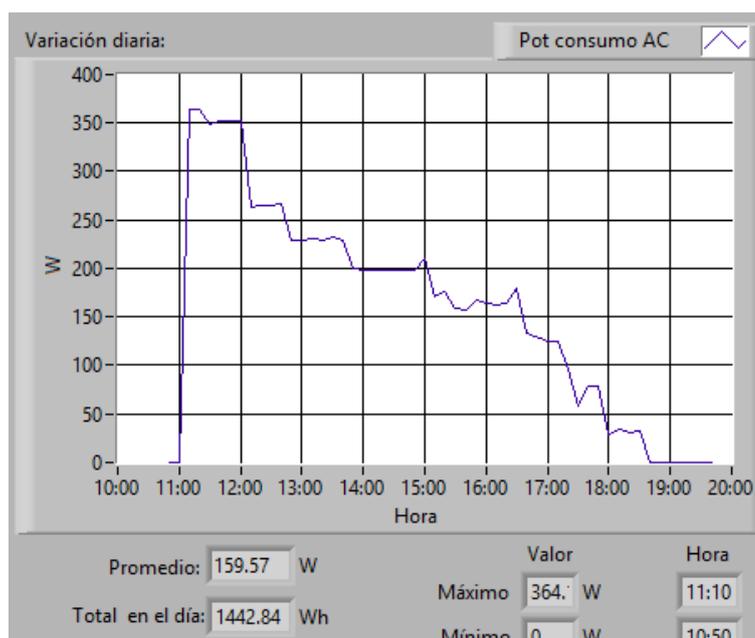


Figura 5.7 Potencia consumo AC (10/06/2014)

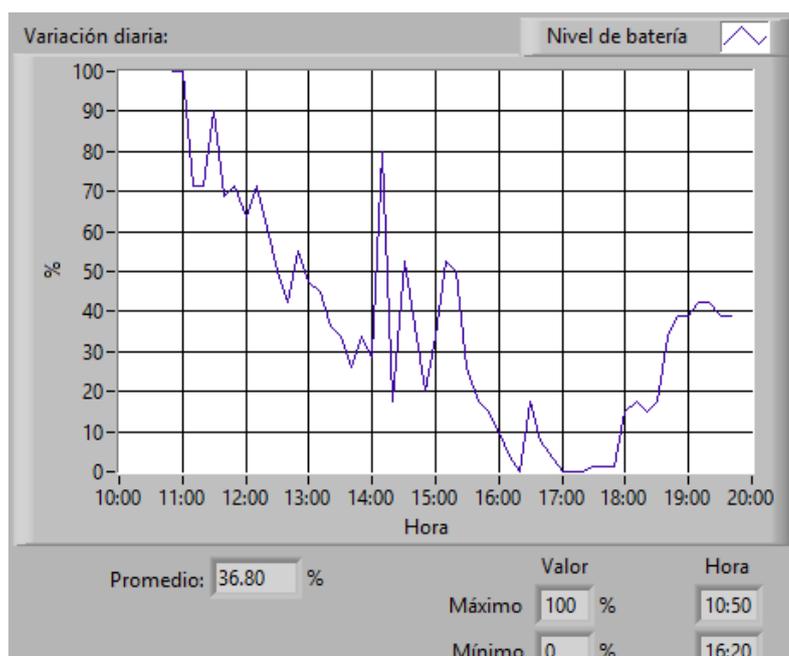


Figura 5.8 Nivel de batería (10/06/2014)

El consumo total durante la segunda prueba de descarga fue de 144.84 Wh, que al igual que al prueba anterior cumple con la energía AC esperada de 1440 Wh.

Como se observa en la gráfica del nivel de batería, cuando se disminuye la carga, aumenta significativamente el nivel, esto se debe a que este valor depende únicamente del voltaje de la batería.

#### 5.4 Pruebas de carga

Para verificar la carga de las baterías se realizarán dos pruebas, la primera consiste en analizar la carga con las dos fuentes de generación: eólica y solar, y la segunda prueba solo con energía solar. Los resultados obtenidos se indican a continuación:

##### *Carga solar*

La primera prueba se realizó sin la conexión del aerogenerador, se parte de una batería completamente descargada con un voltaje de 11.75 V y los resultados de carga se indican a continuación:

Cuadro 5.9  
Prueba de carga (Energía solar)

	Unidad	Horas				
		6	7	8	9	10
<b>Radiación</b>	W	6.83	135.17	140.83	600.17	649.50
<b>Voltaje paneles</b>	V	9.13	13.41	13.51	14.43	14.97
<b>Voltaje baterías</b>	V	11.75	12.16	12.23	12.72	12.73
<b>Corriente panel</b>	A	0.23	3.99	3.81	14.35	11.98
<b>Corriente batería 1</b>	A	-0.10	1.79	1.79	7.63	4.54
<b>Corriente batería 2</b>	A	-0.09	1.72	1.61	7.14	4.11
<b>Ener. generada solar</b>	Wh	2.88	54.08	51.67	209.98	181.71
		Horas				
		11	12	13	14	15
<b>Radiación</b>	W	773.17	600.33	373.00	578.00	571.33
<b>Voltaje paneles</b>	V	16.01	15.30	14.43	15.37	16.17
<b>Voltaje baterías</b>	V	12.86	12.88	12.93	13.11	13.25
<b>Corriente panel</b>	A	18.34	10.55	8.97	11.89	14.60
<b>Corriente batería 1</b>	A	9.30	4.97	4.19	6.46	6.14
<b>Corriente batería 2</b>	A	9.01	5.06	4.33	6.67	6.10
<b>Ener. generada solar</b>	Wh	302.24	163.11	129.51	187.99	237.20
<b>Energía de carga total (Wh)</b>				1280.29		
<b>Tiempo total de carga (horas)</b>				8		

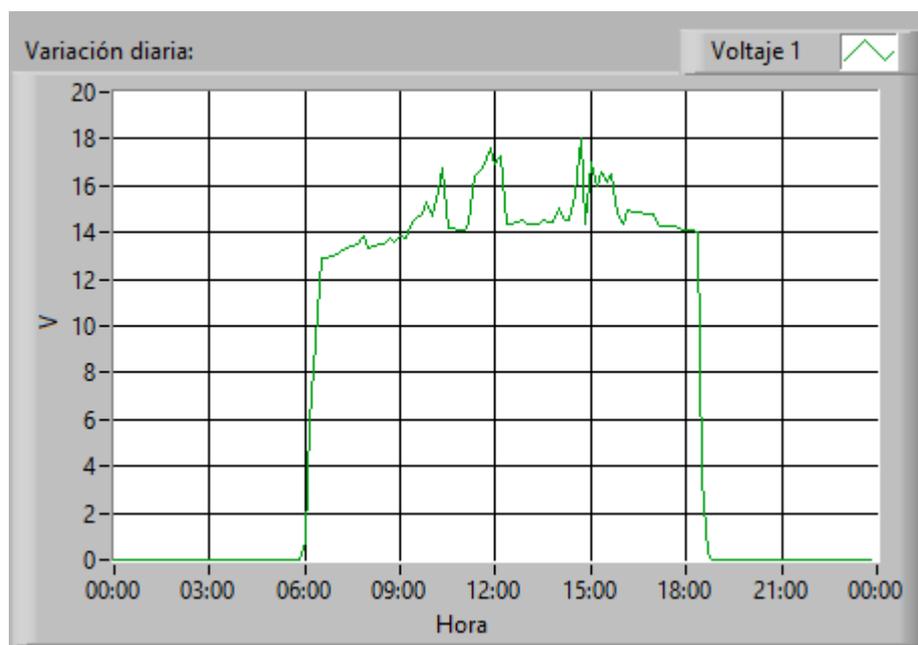


Figura 5.9 Voltaje paneles (13/06/2014)

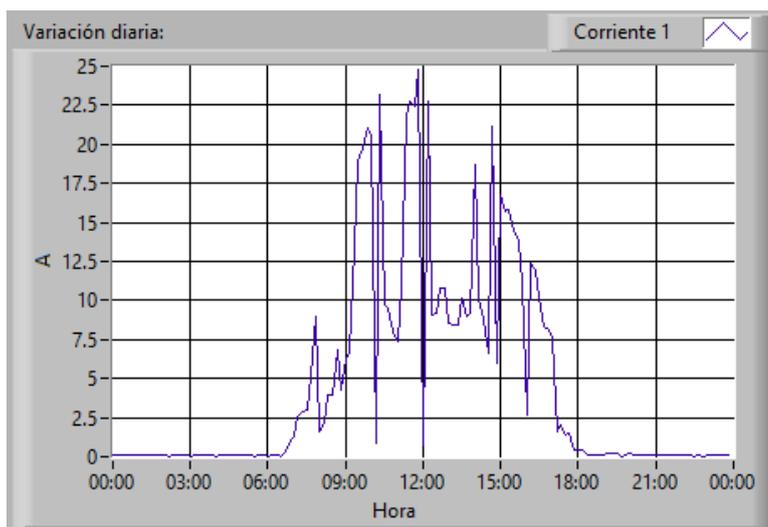


Figura 5.10 Corriente paneles (13/06/2014)

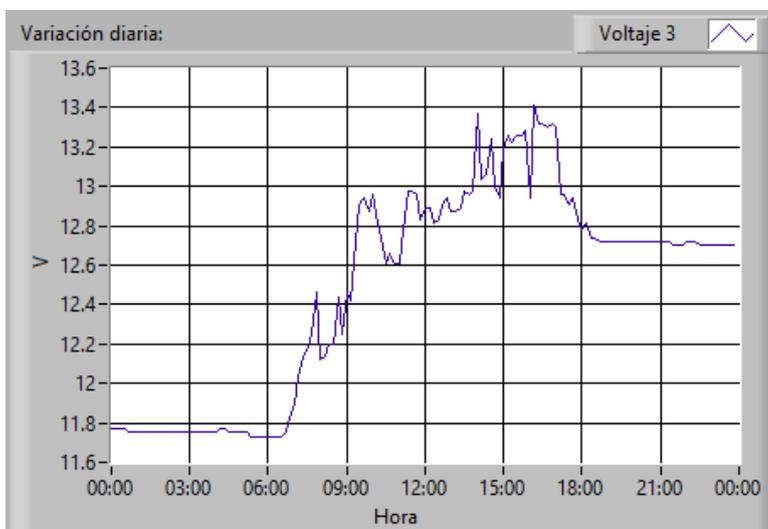


Figura 5.11 Voltaje baterías (13/06/2014)

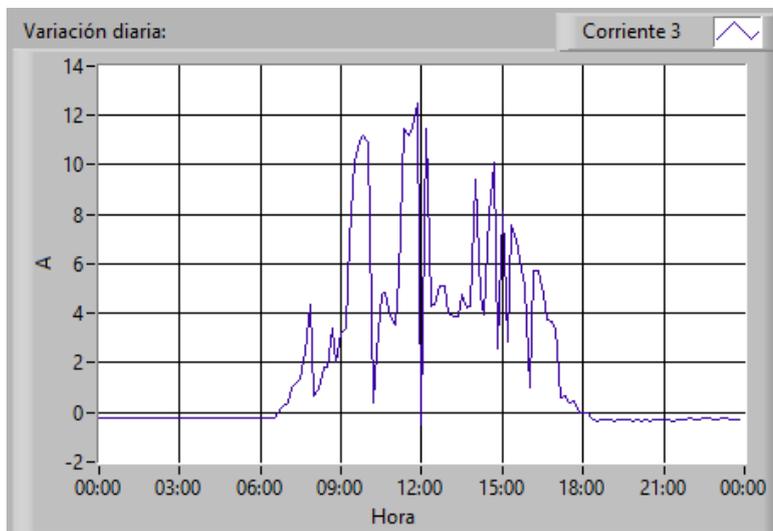


Figura 5.12 Corriente baterías (13/06/2014)

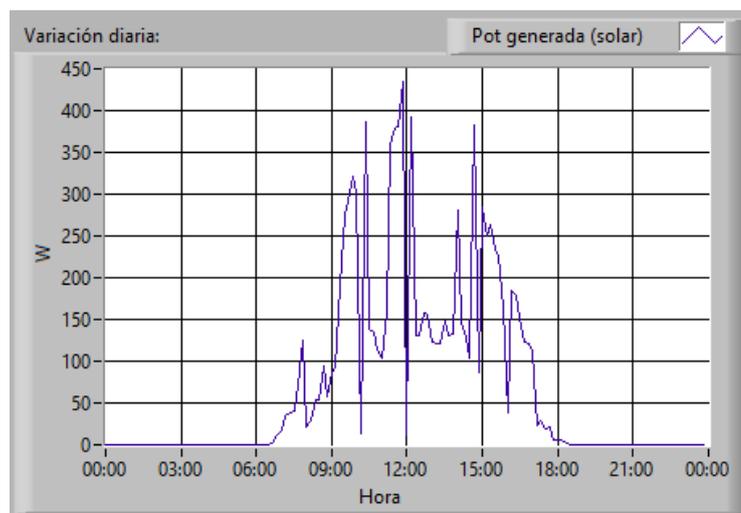


Figura 5.13 Potencia generada solar (13/06/2014)

Como se puede observar en el Cuadro 5.9 la batería empieza con un nivel de carga bajo correspondiente a 11.75 V, durante el proceso de carga se genera una energía de 1280.29 Wh y está totalmente cargada dentro de 8 horas, alcanzando un voltaje de 13.11 V, la variación del voltaje correspondiente al nivel de carga de la batería se muestra en la Figura 5.11, la cual se relaciona con el voltaje generado por los paneles solares mostrado en la Figura 5.9.

### ***Carga eólica y solar***

En la segunda prueba se cargó la batería con los dos sistemas de generación partiendo con baterías con un nivel de descarga menor al de la prueba anterior y un voltaje de 12.09 V.

En el Cuadro 5.10 se muestran los resultados de carga de la batería, en esta prueba se empieza con un nivel de descarga menor al de la prueba anterior correspondiente a 12.09 V, razón por la cual el tiempo de carga es menor y alcanza el 100% con un voltaje de 13.15 V después de 6 horas y ocupando una energía de 713.05 Wh.

Los resultados de carga se indican en la siguiente tabla:

Cuadro 5.10  
Prueba de carga (Energía eólica y solar)

	Unidad	Horas			
		6	7	8	9
<b>Radiación</b>	W	6.5	172.83	390.17	691.3
<b>Velocidad media</b>	m/s	0.25	0	0.4967	0.91
<b>Voltaje paneles</b>	V	9.8767	13.898	14.398	15.7
<b>Volt. aerogenerador</b>	V	0	0	0	0.862
<b>Voltaje baterías</b>	V	12.093	12.58	12.875	13
<b>Corriente panel</b>	A	0.4167	5.36	11.643	11.09
<b>Corr. aerogenerador</b>	A	0	0	0	0
<b>Corriente batería 1</b>	A	-0.052	2.4317	5.59	6.437
<b>Corriente batería 2</b>	A	0.0317	2.5817	5.795	6.72
<b>Ener. generada solar</b>	Wh	5.1984	74.699	167.8	168.7
<b>Ener. generada eólica</b>	Wh	0	0	0	0
		Horas			
		10	11	12	13
<b>Radiación</b>	W	470.33	874	532.5	481.5
<b>Velocidad media</b>	m/s	1.075	1.9817	1.5683	1.817
<b>Voltaje paneles</b>	V	15.03	16.77	15.348	15.85
<b>Volt. aerogenerador</b>	V	0	0.6017	4.355	7.355
<b>Voltaje baterías</b>	V	12.895	12.928	13.145	13.14
<b>Corriente panel</b>	A	7.6183	3.3683	9.52	4.968
<b>Corr. aerogenerador</b>	A	0	0	0	0
<b>Corriente batería 1</b>	A	3.6783	1.5367	4.5183	3.54
<b>Corriente batería 2</b>	A	3.6967	1.4667	4.7533	3.963
<b>Ener. generada solar</b>	Wh	110.41	49.47	141.94	72.96
<b>Ener. generada eólica</b>	Wh	0	0	0	0
<b>Energía de carga total (Wh)</b>				713.05	
<b>Tiempo total de carga (horas)</b>				6	

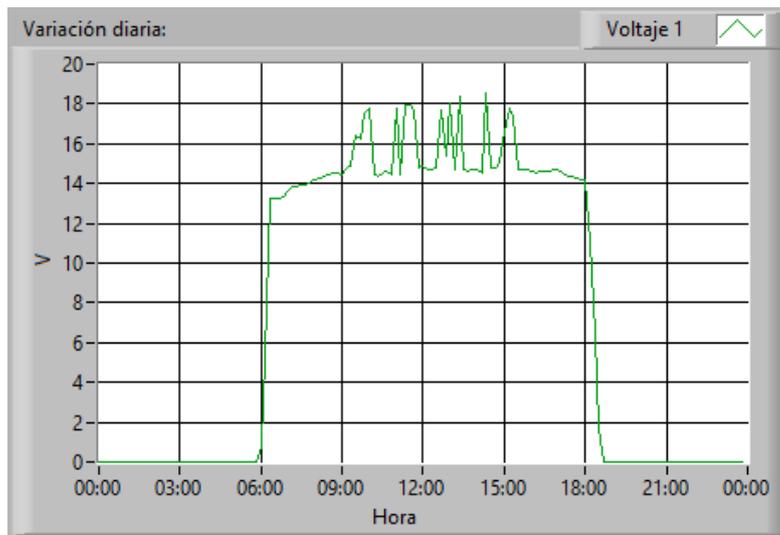


Figura 5.14 Voltaje paneles (26/06/2014)

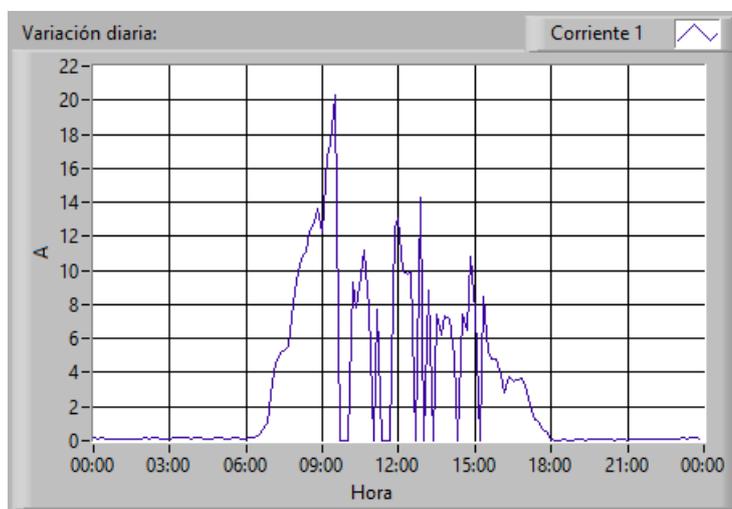


Figura 5.15 Corriente paneles (26/06/2014)

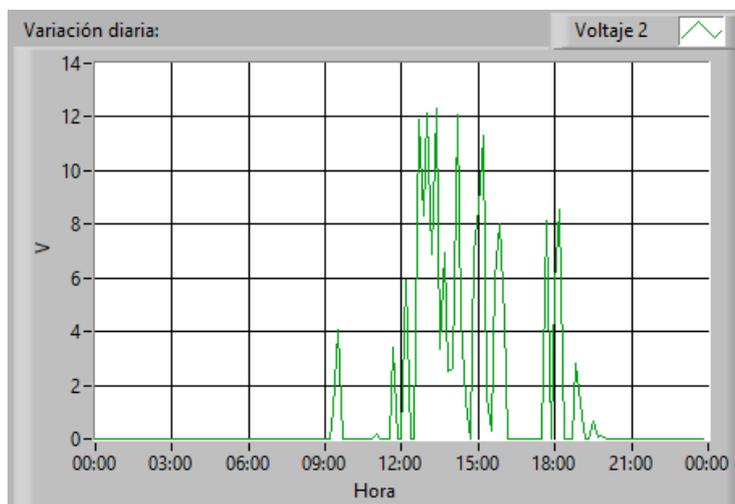


Figura 5.16 Voltaje aerogenerador (26/06/2014)

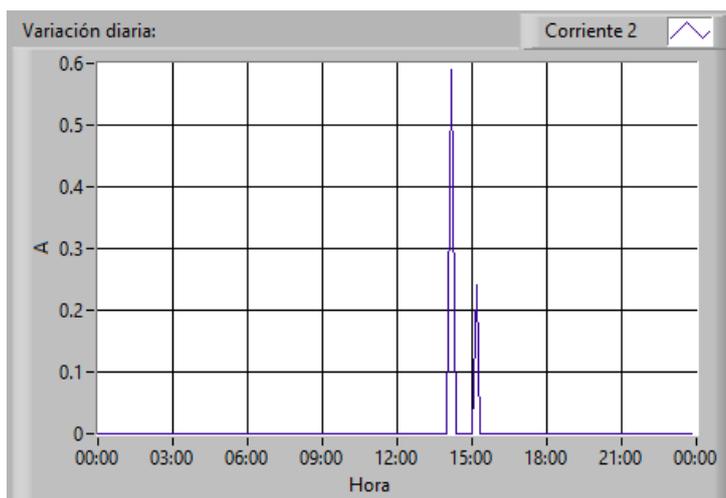


Figura 5.17 Corriente aerogenerador (26/06/2014)

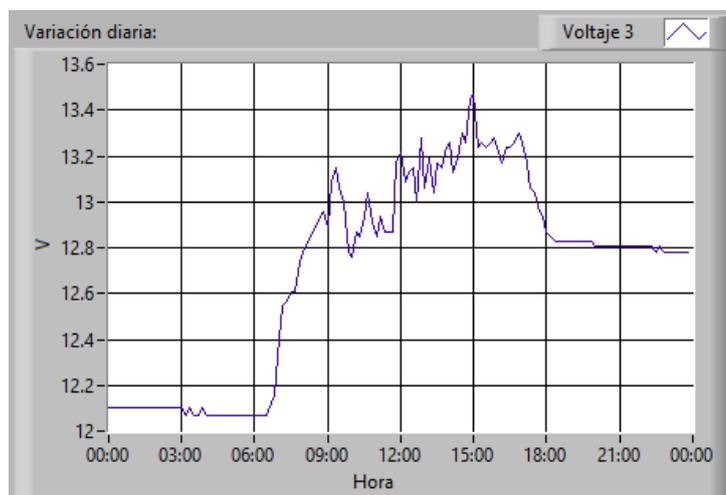


Figura 5.18 Voltaje de las baterías (26/06/2014)

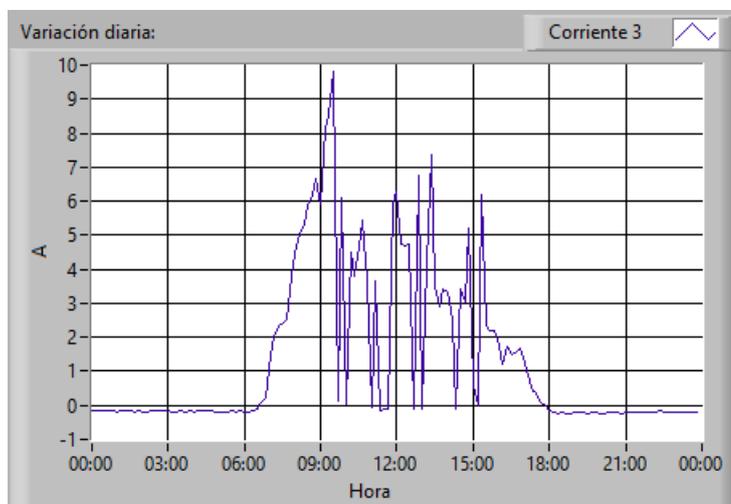


Figura 5. 19 Corriente de las baterías (26/06/2014)

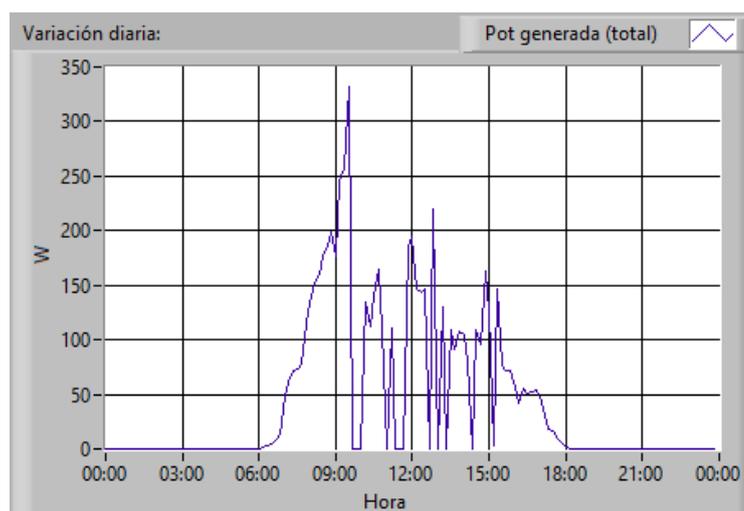


Figura 5.20 Potencia generada total (26/06/2014)

La Figura 5.15 y la Figura 5.17 indican la corriente aportada por los paneles y el aerogenerador, como se observa, la mayor parte de corriente que carga a las baterías la generan los paneles solares, esto se debe a las bajas velocidades del viento del lugar de aplicación.

### 5.5 Pruebas de funcionamiento continuo

Para verificar el funcionamiento de toda la estación se realizará una prueba donde se consumirá diariamente una energía de 1440Wh, la prueba tendrá una duración de tres días consecutivos. Los resultados obtenidos se indican a continuación:

Cuadro 5.11  
Resultados funcionamiento continuo.

	Unidad	Día 1	Día 2	Día 3
<b>Fecha</b>		23/06	24/06	25/06
<b>Insolación</b>	Wh/m2/día	5515	5104	3553
<b>Velocidad promedio</b>	m/s	1.78	1.38	0.94
<b>Energía Disponible</b>	Wh	19029	17536.1	12193.1
<b>Energía Generada</b>	Wh	1437.83	1005.13	1224.83
<b>Generación fotovoltaica</b>	%	98.7	99.5	99.8
<b>Generación eólica</b>	%	1.3	0.5	0.2
<b>Energía Consumida</b>	Wh	1476.71	1446.05	1659.97
<b>Corriente max. batería 1</b>	A	4.25	6.54	6.74
<b>Corriente max. batería 2</b>	A	4.05	5.13	6.88
<b>Corriente max. consumo AC</b>	A	26.22	21.02	28.93
<b>Nivel de Batería</b>	%	100	100	60

Energía diaria disponible (Wh)		Energía diaria generada (Wh)		Energía diaria consumida (Wh)	
Solar:	18863.6	Solar:	1440.01	AC:	1476.71
Eólica:	165.466	Eólica:	19.055	DC:	0
Total:	19029	Total:	1437.83	Total:	1476.71
		Suministrada:	1012.23		

Figura 5.21 Energías día 1

Energía diaria disponible (Wh)		Energía diaria generada (Wh)		Energía diaria consumida (Wh)	
Solar:	17455.7	Solar:	1008.24	AC:	1445.6
Eólica:	80.4171	Eólica:	4.24805	DC:	0
Total:	17536.1	Total:	1005.13	Total:	1446.05
		Suministrada:	763.379		

Figura 5.22 Energías día 2

Energía diaria disponible (Wh)		Energía diaria generada (Wh)		Energía diaria consumida (Wh)	
Solar:	12152.4	Solar:	1226.89	AC:	1656.14
Eólica:	40.7429	Eólica:	2.05758	DC:	0
Total:	12193.1	Total:	1224.83	Total:	1659.97
		Suministrada:	1017.56		

Figura 5.23 Energías día 3

Como se puede observar, en los tres días de funcionamiento continuo hubo un consumo de más de 1440 Wh diarios. Durante los tres días se generó una energía total de 3667.79 Wh y se ocupó una energía de 4582.73Wh.

Al final de los dos primeros días la batería sigue conservando el 100% de su nivel, esto se debe a que la insolación fue elevada, en el tercer día la insolación disminuye, por lo que el nivel de batería baja hasta el 60%, sin embargo en días posteriores será posible seguir consumiendo la misma cantidad de energía.

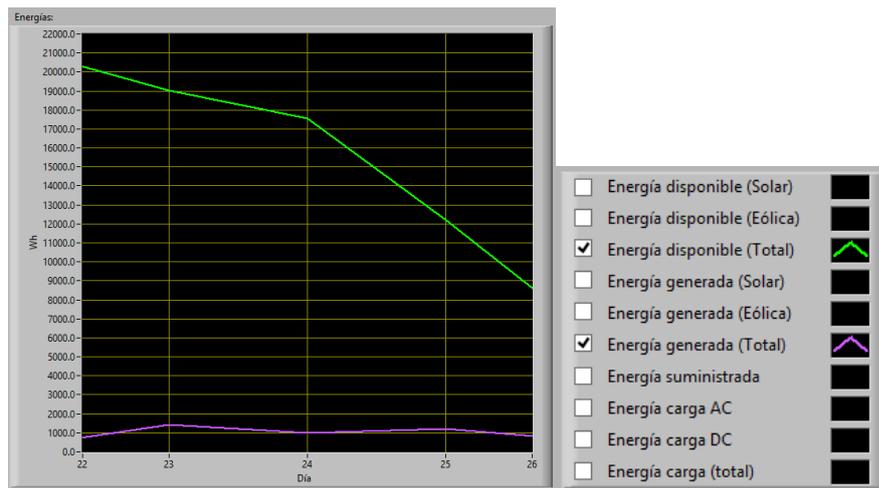


Figura 5.24 Energía disponible vs. Energía generada

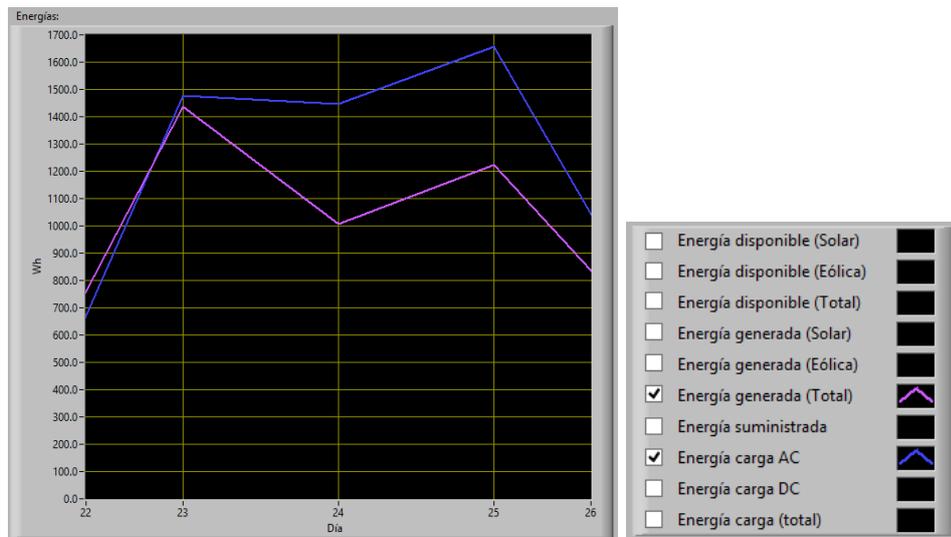


Figura 5.25 Energía consumida AC vs Energía generada

## CAPITULO 6

### ANALISIS ECONOMICO

#### 6.1 Detalle de Inversión

Para el cálculo de la inversión inicial primero calculamos el costo por módulos:

Cuadro 6.1  
Costo por módulos

Ítem	Denominación	Cant.	Valor unitario (\$)	Valor parcial (\$)
<b>1</b>	<b>Módulo fotovoltaico</b>			<b>690</b>
1.1	Panel Solar 110 Wp	4	140	560
1.2	Soporte	1	130	130
<b>2</b>	<b>Módulo eólico</b>			<b>430</b>
2.1	Aerogenerador Gudcraft 300 W	1	350	350
2.2	Soporte	1	80	80
<b>3</b>	<b>Módulo de distribución</b>			<b>894</b>
3.1	Regulador solar	1	190	190
3.2	Batería Millenium 115 Ah	2	262	524
3.3	Inversor Cotek SK350	1	180	180
<b>4</b>	<b>Módulo de control</b>			<b>500</b>
4.1	Anemómetro y veleta	1	120	120
4.2	Piranómetro	1	144	144
4.3	Sensores de corriente	6	18	108
4.4	Sensor de temperatura	1	5	5
4.5	Controlador Arduino	1	48	48
4.6	Placa de control	1	75	75
<b>5</b>	<b>Varios</b>			<b>300</b>
5.1	Cableado y protecciones	1	50	50
5.2	Cajas de conexión	2	70	140
5.3	Varios	1	110	110
<b>Total</b>				<b>2814</b>

Como indica el siguiente gráfico el mayor costo es en el módulo de distribución correspondiente al 34% esto se debe al elevado precio de los acumuladores, este gasto se podría eliminar en estaciones conectadas a la red donde el exceso de energía se transmite a la red y no se almacena, siendo una de las principales ventajas de las estaciones generadoras a gran escala.

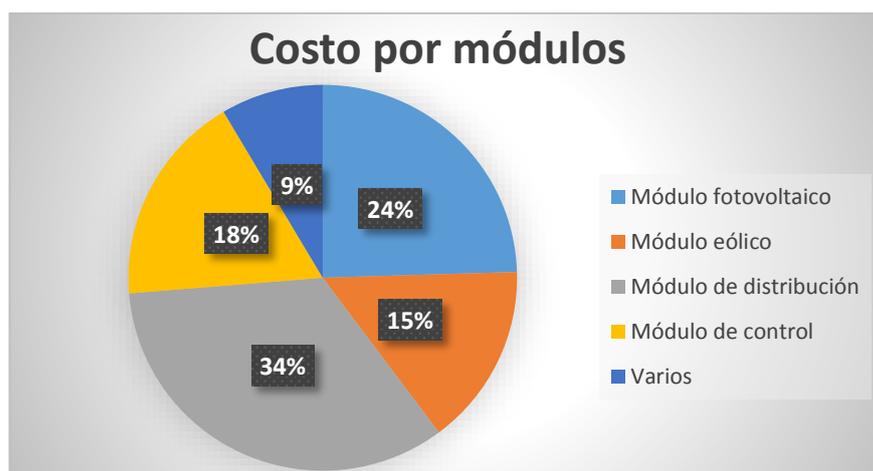


Figura 6.1 Costo por módulos

Además de la inversión en los módulos se toma en cuenta los costos de diseño e implementación, mismos que corresponden al 30% y 10% respectivamente del costo por módulos, lo que nos da una inversión inicial de:

Cuadro 6.2  
Inversión inicial

Ítem	Denominación	Valor (\$)
1	Costo por módulos	2814
2	Diseño Ingenieril	845
3	Implementación	280
	<b>Inversión inicial</b>	<b>3939</b>

## 6.2 Costo de generación de kWh

El funcionamiento óptimo de la microcentral está estimado para 20 años a partir del cual su rendimiento empieza a decaer. La mayoría de componentes presentan una vida útil de 20 años a excepción de las baterías, las cuales ofrecen una durabilidad de 5 años por lo que pasado este tiempo deben ser reemplazadas. Esto representa un costo adicional a la inversión inicial, además para mantener el correcto funcionamiento se debe realizar un mantenimiento preventivo cada seis meses.

Los costos adicionales a lo largo de los 20 años serán:

Cuadro 6.3  
Costos adicionales en 20 años

Denominación	Cant.	Cost. Unit. (\$)	Cost. total (\$)
Bat. adicionales	6	262	1572
Mantenimiento	40	20	800
Repuestos	1	50	50
<b>Total</b>			<b>2422</b>

El costo total de la microcentral para un funcionamiento óptimo en 20 años es:

Cuadro 6.4  
Costo total

Denominación	Valor (\$)
Inversión inicial	3939
Costos adicionales	2422
<b>Total</b>	<b>6361</b>

El costo del kWh se calcula con la energía generada en 20 años para lo que se usa la estimación de generación anual fotovoltaica del Cuadro 3.17 y de generación anual eólica del Cuadro 3. 21

Cuadro 6.5  
Generación de la microcentral

Módulo	Generación anual kWh	Generación en 20 años kWh
Fotovoltaico	651.12	13022.36
Eólico	40.72	814.31
<b>Total</b>	<b>691.83</b>	<b>13836.67</b>

En base a estos datos y al costo total de la microcentral se determina que el costo por kWh es de 0.46 dólares, lo cual es un precio elevado en comparación al costo de venta al consumidor que es de \$0.087 y a los valores establecidos en la regulación 001-13 vigente del CONELEC, a continuación se indican los valores establecidos para fuentes de generación renovables.

Cuadro 6.6  
Costos establecidos en la Regulacion 001-13 CONELEC

<b>Centrales</b>	<b>Territorio Continental USDc</b>	<b>Territorio Insular de Galápagos USDc</b>
<b>Eólicas</b>	2,39	2,62
<b>Fotovoltaicas</b>	11,80	12,99
<b>Solar Termoeléctrica</b>	8,74	9,61
<b>Corrientes Marinas</b>	12,77	14,05
<b>Biomasa y Biogás &lt; 5 MW</b>	2,86	3,5
<b>Biomasa y Biogás &gt; 5 MW</b>	2,50	2,75
<b>Geotérmicas</b>	3,36	3,69
<b>Centrales Hidroeléctricas menores 10MW</b>	2,07	-
<b>Centrales Hidroeléctricas mayores a 10MW hasta 30MW</b>	1,98	-
<b>Centrales Hidroeléctricas mayores a 30MW hasta 50MW</b>	1,78	-

El costo elevado se debe:

- Tamaño pequeño de la estación: Si se aumenta el tamaño de la estación los costos de generación disminuyen.
- Costo del sistema de monitoreo: Para el funcionamiento de una estación de estas condiciones no es necesario un sistema de monitoreo.
- Falta de recurso eólico: En el lugar de aplicación de la microcentral el recurso eólico es bajo y no se aprovecha el potencial del aerogenerador.
- Sistema independiente: Este sistema implica el uso de acumuladores, mismos que representan un gran porcentaje del costo total.

Se muestra un análisis de la microcentral si se usaría energía únicamente solar o únicamente eólica.

#### ***Costo de Generación Fotovoltaica***

Los costos de inversión serían:

Cuadro 6.7  
Inversión Inicial (Generación Fotovoltaica)

Ítem	Denominación	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
<b>1</b>	Módulo fotovoltaico			690
<b>1.1</b>	Panel Solar 110 Wp	4	140	560
<b>1.2</b>	Soporte	1	130	130
<b>2</b>	Módulo de distribución			894
<b>2.1</b>	Regulador solar	1	190	190
<b>2.2</b>	Batería Millenium 115 Ah	2	262	524
<b>2.3</b>	Inversor Cotek SK350	1	180	180
<b>3</b>	Módulo de control			500
<b>3.1</b>	Anemómetro y veleta	1	120	120
<b>3.2</b>	Piranómetro	1	144	144
<b>3.3</b>	Sensores de corriente	6	18	108
<b>3.4</b>	Sensor de temperatura	1	5	5
<b>3.5</b>	Controlador Arduino	1	48	48
<b>3.6</b>	Placa de control	1	75	75
<b>4</b>	Varios			240
<b>4.1</b>	Cableado y protecciones	1	50	50
<b>4.2</b>	Cajas de conexión	2	70	140
<b>4.3</b>	Varios	1	50	50
<b>Total</b>				2324

Se suman los costos de diseño ingenieril, implementación y adicionales correspondientes al 30% de la inversión inicial, 10% de la inversión inicial y mantenimiento respectivamente.

Cuadro 6.8  
Costo total (Generación Fotovoltaica)

Ítem	Denominación	Valor
<b>1</b>	Costo por módulos	2324
<b>2</b>	Diseño Ingenieril	700
<b>3</b>	Implementación	230
<b>4</b>	Costos adicionales	2212
<b>Inversión inicial</b>		5466

La producción de energía fotovoltaica estimada en 20 años es de 13022.36 kWh según el Cuadro 6.5, con el costo total de \$5466, se obtiene un costo de generación de \$0.42 por kWh.

### Costo de Generación Eólica

Los costos de inversión serían:

Cuadro 6.9  
Inversión Inicial (Generación Eólica)

Ítem	Denominación	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
<b>1</b>	Módulo eólico			430
<b>1.1</b>	Aerog. Gudcraft 300 W	1	350	350
<b>1.2</b>	Soporte	1	80	80
<b>2</b>	Módulo de distribución			704
<b>2.1</b>	Batería Millenium 115 Ah	2	262	524
<b>2.2</b>	Inversor Cotek SK350	1	180	180
<b>3</b>	Módulo de control			500
<b>3.1</b>	Anemómetro y veleta	1	120	120
<b>3.2</b>	Piranómetro	1	144	144
<b>3.3</b>	Sensores de corriente	6	18	108
<b>3.4</b>	Sensor de temperatura	1	5	5
<b>3.5</b>	Controlador Arduino	1	48	48
<b>3.6</b>	Placa de control	1	75	75
<b>4</b>	Varios			240
<b>4.1</b>	Cableado y protecciones	1	50	50
<b>4.2</b>	Cajas de conexión	2	70	140
<b>4.3</b>	Varios	1	50	50
<b>Total</b>				1874

Se suman los costos de diseño ingenieril, implementación y adicionales correspondientes al 30% de la inversión inicial, 10% de la inversión inicial y mantenimiento respectivamente.

Cuadro 6.10  
Costo total (Generación Eólica)

Ítem	Denominación	Valor
<b>1</b>	Costo por módulos	1874
<b>2</b>	Diseño Ingenieril	620
<b>3</b>	Implementación	200
<b>4</b>	Costos adicionales	2012
<b>Inversión inicial</b>		4706

La producción de energía eólica estimada en 20 años es de 814.31 kWh según el Cuadro 6.5, con el costo total de \$4706, se ve que existe un costo de generación de \$5.78 por kWh.

Con esto podemos apreciar que el costo de generación fotovoltaico es menor al costo de generación eólica e híbrida.

Cuadro 6.11  
Costos de Generación KWh

Denominación	Costo kWh
Fotovoltaica	\$0.42
Eólica	\$5.78
Híbrida	\$0.46

### 6.3 Implementación en Sistemas conectados a la red

A diferencia de los sistemas autónomos, los sistemas conectados a la red no poseen un sistema de acumulación de energía, esto implica la eliminación de las baterías y la regulación de carga, lo cual disminuye los costos de forma significativa. Además, el inversor, en los sistemas conectados a red, deberá estar en fase con la con la tensión de la red.

#### 6.3.1 Análisis de la energía diaria generada

Se procede a realizar una estimación de la energía solar y eólica promedio generada cada mes por el sistema híbrido conformado por un panel solar ISOFOTON i110-12 y el aerogenerador Gudcraft WG300. La estimación se realiza en base a los datos obtenidos de los atlas solar y eólico. A continuación se presenta la estimación para el mes de Enero. La estimación de todos los meses se halla en el ANEXO H.

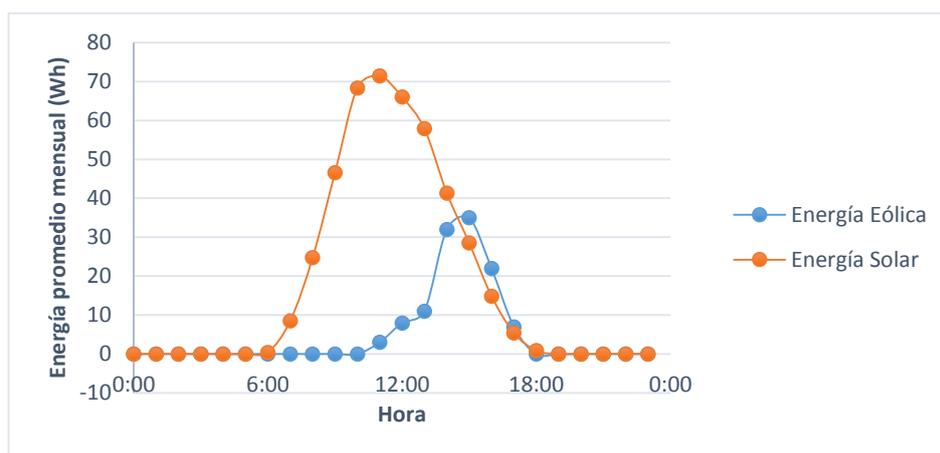


Figura 6.2 Energía solar y eólica promedio del mes de Enero

Por medio de esta estimación se puede determinar las horas de inicio y fin de mayor potencial eólico y solar a lo largo del día tomando de referencia una potencia base de base de 15W. Los datos obtenidos se indican a continuación:

Cuadro 6.12

Horas con mayor potencial eólico y solar y energía generada

Mes	Energía Solar			Energía Eólica		
	Energía diaria (Wh)	Hora inicio	Hora fin	Energía diaria (Wh)	Hora inicio	Hora fin
<b>Enero</b>	405	8:00	16:00	89	12:00	16:00
<b>Febrero</b>	392	8:00	15:00	89	12:00	16:00
<b>Marzo</b>	392	8:00	15:00	147	13:00	16:00
<b>Abril</b>	365	8:00	15:00	147	13:00	16:00
<b>Mayo</b>	405	8:00	15:00	234	12:00	17:00
<b>Junio</b>	452	8:00	15:00	309	11:00	17:00
<b>Julio</b>	462	8:00	16:00	309	11:00	17:00
<b>Agosto</b>	478	8:00	16:00	309	11:00	17:00
<b>Septiembre</b>	462	8:00	16:00	234	12:00	17:00
<b>Octubre</b>	452	8:00	16:00	147	13:00	16:00
<b>Noviembre</b>	405	8:00	16:00	89	12:00	16:00
<b>Diciembre</b>	392	8:00	15:00	89	12:00	16:00
<b>TOTAL</b>	5059			2192		

Se debe tomar en cuenta que durante las horas indicadas en la tabla anterior no se genera el máximo de potencia que los paneles solares y el aerogenerador pueden

aportar. La máxima generación se produce aproximadamente a partir de las 10h00 hasta las 13h00.

### 6.3.2 Detalle de Inversión

En los sistemas conectados a la red, los costos se reducen significativamente debido a que no se necesitan acumuladores de energía y por ende reguladores de carga. En este apartado se analizará el costo del kWh de un sistema conectado a la red sin tomar dichos elementos ni los que conforman el sistema de monitoreo.

Los costos de cada módulo se detallan a continuación:

Cuadro 6.13

Costo por módulos de Sistema conectado a la red

Ítem	Denominación	Cant.	Valor unitario	Valor parcial
<b>1</b>	Módulo fotovoltaico			690
<b>1.1</b>	Panel Solar 110 Wp	4	140	560
<b>1.2</b>	Soporte	1	130	130
<b>2</b>	Módulo eólico			430
<b>2.1</b>	Aerogenerador Gudcraft 300 W	1	350	350
<b>2.2</b>	Soporte	1	80	80
<b>3</b>	Módulo de distribución			170
<b>3.1</b>	ALEKO WSB500 500W On Grid	1	170	170
<b>4</b>	Varios			110
<b>4.1</b>	Cableado y protecciones	1	50	50
<b>4.2</b>	Cajas de conexión	1	35	35
<b>4.3</b>	Varios	1	25	25
<b>Total</b>				1400

En el siguiente gráfico se indica el porcentaje de costo de cada módulo, como se observa, a diferencia de los sistemas híbridos aislados, el mayor costo corresponde al módulo fotovoltaico, el cual es el generador de la mayor cantidad de energía del sistema. Los costos de inversión se han reducido significativamente debido a la eliminación del módulo de control y gran parte del módulo de distribución.

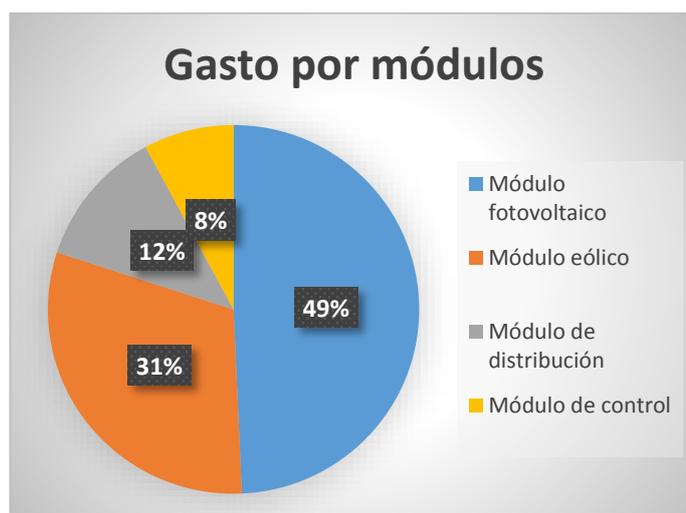


Figura 6.3 Costo por módulos de Sistema conectado a la red

A este costo se incrementa el costo por diseño e implementación correspondientes al 30% y 10% del costo por módulos respectivamente. Además un costo por mantenimiento de \$400, obteniendo un costo total de \$2360.

Cuadro 6.14

Inversión total Sistema conectado a la red

Ítem	Denominación	Valor
1	Costo por módulos	1400
2	Diseño Ingenieril	420
3	Implementación	140
4	Mantenimiento	400
<b>Inversión total</b>		<b>2360</b>

### 6.3.3 Costo de generación

Todos los componentes de la estación híbrida tienen una vida útil de 20 años. A continuación se detalla la producción estimada a lo largo de este periodo de tiempo en base a la energía diaria generada del Cuadro 6.12

Cuadro 6.15  
Generación anual Sistemas red (Energía Solar)

Mes	Días	Wh/día	Wh/mes
<b>Enero</b>	31	405	12555.0
<b>Febrero</b>	28	392	10963.8
<b>Marzo</b>	31	392	12138.5
<b>Abril</b>	30	365	10940.8
<b>Mayo</b>	31	405	12555.0
<b>Junio</b>	30	452	13551.2
<b>Julio</b>	31	462	14311.3
<b>Agosto</b>	31	478	14829.5
<b>Septiembre</b>	30	462	13849.7
<b>Octubre</b>	31	452	14002.9
<b>Noviembre</b>	30	405	12150.0
<b>Diciembre</b>	31	392	12138.5
<b>Total 1 panel</b>			153986.4
<b>Total 4 paneles</b>			615945.4

Cuadro 6.16  
Generación anual Sistemas red (Energía Eólica)

Mes	Días	Wh/día	Wh/mes
<b>Enero</b>	31	89	2759.0
<b>Febrero</b>	28	89	2492.0
<b>Marzo</b>	31	147	4557.0
<b>Abril</b>	30	147	4410.0
<b>Mayo</b>	31	234	7254.0
<b>Junio</b>	30	309	9270.0
<b>Julio</b>	31	309	9579.0
<b>Agosto</b>	31	309	9579.0
<b>Septiembre</b>	30	234	7020.0
<b>Octubre</b>	31	147	4557.0
<b>Noviembre</b>	30	89	2670.0
<b>Diciembre</b>	31	89	2759.0
<b>Total</b>			66906.0

Cuadro 6.17  
Generación estimada en 20 años para Sistemas conectados a la red

<b>Módulo</b>	<b>Generación anual kWh</b>	<b>Generación en 20 años kWh</b>
<b>Fotovoltaico</b>	615.95	12318.91
<b>Eólico</b>	66.91	1338.12
<b>Total</b>	682.85	13657.03

Con una generación estimada de 13657 kWh en 20 años y un costo de implementación y mantenimiento de \$2360 se determina que el costo por kWh es de 0.17 dólares, lo cual disminuye considerablemente en relación a los sistemas aislados.

A continuación se realizará un análisis de los costos de generación si se aprovecha de forma individual la energía eólica y solar.

### *Generación eólica*

Los costos de inversión para una microcentral eólica se detallan a continuación:

Cuadro 6.18  
Inversión inicial (Generación eólica)

<b>Ítem</b>	<b>Denominación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor parcial</b>
<b>1</b>	<b>Módulo eólico</b>			<b>430</b>
<b>1.1</b>	Aerog. Gudcraft 300 W	1	350	350
<b>1.2</b>	Soporte	1	80	80
<b>2</b>	<b>Módulo de distribución</b>			<b>170</b>
<b>2.1</b>	ALEKO WSB500 500W	1	170	170
<b>3</b>	<b>Varios</b>			<b>58</b>
<b>3.1</b>	Cableado y protecciones	1	50	25
<b>3.2</b>	Cajas de conexión	1	35	18
<b>3.3</b>	Varios	1	25	15
<b>Total</b>				<b>658</b>

Adicional a esto se incrementan los costos de diseño, implementación y mantenimiento, obteniendo una inversión total de \$1321.20 durante los 20 años de vida útil de acuerdo al siguiente detalle:

Cuadro 6.19  
Inversión total (Generación eólica)

Ítem	Denominación	Valor (\$)
1	Costo por módulos	658
2	Diseño Ingenieril	197.4
3	Implementación	65.8
4	Mantenimiento	400
<b>Inversión total</b>		<b>1321.2</b>

Como indica el Cuadro 6.17 la generación eólica durante los 20 años es de 1338.12 kWh, con una inversión total de \$1321,20 se obtiene un costo de generación de \$0.99, lo que constituye un costo muy elevado, esto se debe a las bajas velocidades del viento en el lugar de instalación.

#### *Generación Fotovoltaica*

Cuadro 6.20  
Inversión inicial (Generación solar)

Ítem	Denominación	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
1	Módulo fotovoltaico			690
1.1	Panel Solar 110 Wp	4	140	560
1.2	Soporte	1	130	130
2	Módulo de distribución			170
2.1	ALEKO WSB500 500W	1	170	170
3	Varios			58
3.1	Cableado y protecciones	1	50	25
3.2	Cajas de conexión	1	35	18
3.3	Varios	1	25	15
<b>Total</b>				<b>918</b>

Adicionalmente se consideran los costos de diseño, implementación y mantenimiento, obteniendo un costo total de \$1685.20 como se indica a continuación:

Cuadro 6.21  
Inversión total (Generación solar)

Ítem	Denominación	Valor
1	Costo por módulos	918
2	Diseño Ingenieril	275.4
3	Implementación	91.8
4	Mantenimiento	400
<b>Inversión total</b>		<b>1685.20</b>

Como indica el Cuadro 6.17 la generación solar durante los 20 años es de 12318.91 kWh, con una inversión total de \$1685,20 se obtiene un costo de generación de \$0.136, lo que indica que en el lugar de aplicación el recurso solar es el dominante y su instalación de forma individual genera un menor costo por kWh.

Cuadro 6.22  
Comparación del costo por kWh en sistemas red

Microcentral	Costo kWh
<b>Solar</b>	0.14
<b>Eólica</b>	0.99
<b>Híbrida</b>	0.17

## 6.4 Implementación en aplicaciones rurales

El siguiente análisis se desarrolla para el sector de la parroquia Sigchos en la provincia de Cotopaxi, el mismo va a ser únicamente de manera teórica y se tomarán los datos dados por el atlas eólico y solar del Ecuador.

### 6.4.1 Definición de la carga

Se propone dar el suministro de luz eléctrica al centro comunitario para que puedan desarrollar diferentes reuniones para capacitación de los habitantes, mediante el cual se pueda promover su desarrollo. El consumo que se estima es el siguiente:

Cuadro 6.23  
Consumo de aplicación rural

Equipo	Potencia (W)	horas	Energía (Wh)
Bomba de agua	400	2	800
Equipo de Sonido	120	4	480
Impresora	27	2	54
12 Lámparas 15W	180	6	1080
Lector-reproductor DVD	12.2	4	48.8
3 PC's 65 W	195	7	1365
TV	100	4	400
Cafetera	110	2	220
Router	30	7	210
<b>Energía diaria consumida</b>			<b>4657.8</b>

Para los posteriores cálculos se usará el valor de 4700 Wh de consumo diario.

Mismo que estará dividido en 4000Wh de recurso solar y 700Wh de recurso eólico

#### 6.4.2 Módulo Fotovoltaico

El ángulo de inclinación se calcula mediante la Ec 3.1 donde la latitud es de  $0.46^\circ$  hacia el sur lo que nos da un ángulo  $\beta$  de  $10.46^\circ$ , y al igual que la microcentral de la Universidad de las Fuerzas Armadas por motivos de lluvia y acumulación de polvo este ángulo debe ser de  $15^\circ$ . Al estar sobre la zona tórrida y en el hemisferio sur del planeta su ángulo de Azimut es de  $0^\circ$  en dirección Norte.

El recurso solar en la zona es favorable ya que según el atlas se tiene una insolación promedio anual de 5400. Con los datos del atlas, la Ec 3.3, la Ec 3.4 y conociendo un voltaje nominal de 24V procedemos a calcular el mes menos favorable.

Por la tabla anterior se obtiene que el mes menos favorable es el mes de abril con una duración solar de 4.8 horas y que para lograr generar los 4000 Wh al día a un voltaje nominal de 24V, debe soportar una corriente de 36.88 A. Con esta duración y un rendimiento del sistema de distribución de 75% se calcula mediante la Ec. 2.2 el número necesario de paneles para la aplicación rural y su costo.

Cuadro 6.24  
Mes menos favorable para aplicación rural

	Unidad	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
<b>Inc. (B)</b>	°	15	15	15	15	15	15
<b>Factor A</b>		0.986	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986
<b>Gdm(0)</b>	KWh/m2/dia	5.1	5.1	4.95	4.8	5.1	5.45
<b>Factor B</b>		0.0155	0.0085	0	-0.0093	-0.0177	-0.0223
<b>(Gdm(0))^2</b>		26.01	26.01	24.50	23.04	26.01	29.70
<b>Gdm(B)</b>	KWh/m2/dia	5.43	5.25	4.88	4.52	4.57	4.71
<b>Energía</b>	Wh/dia	4000	4000	4000	4000	4000	4000
<b>Im</b>	A	30.68	31.75	34.15	36.89	36.48	35.38
	Unidad	Julio	Agosto	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
<b>Inc. (B)</b>	°	15	15	15	15	15	15
<b>Factor A</b>		0.986	0.986	0.986	0.986	0.986	0.986
<b>Gdm(0)</b>	KWh/m2/dia	5.8	5.8	5.4	5.55	5.4	5.4
<b>Factor B</b>		-	-0.0127	-0.0034	0.0058	0.0138	0.0178
<b>(Gdm(0))^2</b>		0.0202	33.64	33.64	29.16	30.80	29.16
<b>Gdm(B)</b>	KWh/m2/dia	5.04	5.29	5.23	5.65	5.73	5.84
<b>Energía</b>	Wh/dia	4000	4000	4000	4000	4000	4000
<b>Im</b>	A	33.07	31.50	31.90	29.49	29.10	28.52

Cuadro 6.25  
Número de paneles en aplicación rural

Energía Solar	Unidad	ISOFOTON
<b>Energía diaria</b>	Wh	4000
<b>Radiación Solar al día</b>	Wh/m2	4800
<b>Duración solar</b>	h/dia	4.8
<b>Energía del panel</b>	Wp	110
<b>Num de paneles teórico</b>		7.58
<b>Rendimiento sist.</b>	%	0.75
<b>Distribución</b>		
<b>Total de Paneles</b>		10.10
<b>Costo unitario</b>	\$	140.00
<b>Costo total</b>	\$	1400.00

Los paneles Isofoton I110 funcionan a 12V por lo que se deberán instalar de manera que 5 paneles en serie estén en paralelo con los otros 5 paneles. En la sección 3.4.2 se determinó las características de los paneles por lo que la eficiencia es de 12.8%, el conjunto llegaría a dar una corriente máxima de 31.6A, llegando a producir

1100 W simultáneamente en condiciones óptimas de  $1000\text{Wh/m}^2$  y  $25^\circ\text{C}$  de temperatura. Seleccionado y dimensionado el módulo fotovoltaico se procede a estimar su generación anual con los datos propios de la zona, mediante la Ec 3.5.

Cuadro 6.26

Generación anual fotovoltaica estimada para aplicación rural

Mes	HSP	Días	Wh/día	Wh/mes
<b>Enero</b>	5.1	31	4207.5	130432.5
<b>Febrero</b>	5.1	28	4207.5	117810.0
<b>Marzo</b>	4.95	31	4083.8	126596.3
<b>Abril</b>	4.8	30	3960.0	118800.0
<b>Mayo</b>	5.1	31	4207.5	130432.5
<b>Junio</b>	5.45	30	4496.3	134887.5
<b>Julio</b>	5.8	31	4785.0	148335.0
<b>Agosto</b>	5.8	31	4785.0	148335.0
<b>Septiembre</b>	5.4	30	4455.0	133650.0
<b>Octubre</b>	5.55	31	4578.8	141941.3
<b>Noviembre</b>	5.4	30	4455.0	133650.0
<b>Diciembre</b>	5.4	31	4455.0	138105.0
<b>Total</b>				1602975.0

### 6.4.3 Módulo Eólico

En el caso del módulo Eólico se usará el aerogenerador GudCraft seleccionado en la sección 3.4. Se toman los datos dados por el atlas eólico, se calcula las velocidades promedio a 10m, y mediante el método de la ley de Weibull se calcula la producción anual.

Se observa que el mes con menor generación eólica corresponde al mes de abril con una generación de 187.5Wh diarios. Para lograr satisfacer la demanda presentada de 700Wh al día se deben instalar 4 aerogeneradores Gudcraft como el instalado en la Universidad de las Fuerzas Armadas, siendo su equivalente de 24V para que trabaje en perfectas condiciones con el módulo Fotovoltaico.

Cuadro 6.27  
Energía diaria generada en la aplicación rural

Mes	V (m/s)	P (W)	Wh/día
<b>Enero</b>	2.79	10.17	244.1
<b>Febrero</b>	2.65	8.97	215.2
<b>Marzo</b>	2.65	8.97	215.2
<b>Abril</b>	2.51	7.81	187.5
<b>Mayo</b>	2.79	10.17	244.1
<b>Junio</b>	3.35	15.43	370.4
<b>Julio</b>	3.63	18.28	438.7
<b>Agosto</b>	4.19	24.28	582.8
<b>Septiembre</b>	3.63	18.28	438.7
<b>Octubre</b>	3.35	15.43	370.3
<b>Noviembre</b>	3.07	12.72	305.3
<b>Diciembre</b>	2.79	10.17	244.1

Teniendo la energía generada por 4 aerogeneradores se realiza el cálculo con los días respectivos de cada mes y finalmente obtenemos la energía eólica generada en el año.

Cuadro 6.28  
Generación anual eólica estimada para aplicación rural

Mes	Días	Wh/día	Wh/mes
<b>Enero</b>	31	976.4	30267.8
<b>Febrero</b>	28	860.7	24099.7
<b>Marzo</b>	31	860.7	26681.8
<b>Abril</b>	30	750.1	22502.4
<b>Mayo</b>	31	976.4	30267.8
<b>Junio</b>	30	1481.4	44443.4
<b>Julio</b>	31	1754.6	54393.3
<b>Agosto</b>	31	2331.3	72270.9
<b>Septiembre</b>	30	1754.6	52638.6
<b>Octubre</b>	31	1481.4	45924.8
<b>Noviembre</b>	30	1221.2	36635.5
<b>Diciembre</b>	31	976.4	30267.8
<b>Energía Generada Eólica (Wh)</b>			<b>470393.95</b>

#### 6.4.4 Sistema de distribución

##### *Reguladores*

Se usará el mismo método para el sistema de distribución es decir la conexión del regulador solar y eólico en vez de uno híbrido. Los aerogeneradores vienen con su propio regulador, mientras que para el regulador solar debe tener las siguientes funciones:

- Regular una carga solar de 1100 Wp
- Soportar corrientes de generación superiores a 38 A
- Trabajar a un voltaje nominal de 24 V
- Admitir la conexión de otros sistemas de generación a la batería

El equivalente de la misma marca que el usado anteriormente, es el Tristar-45 que ofrece las siguientes características y funciones.

**Control de carga:** La carga de la batería puede realizarse mediante un control On-Off o control PWM el cual está diseñado para cargarla eficientemente. Además tiene 4 estados de carga: Carga inicial, regulación PWM, carga completa y ecualización de carga las cuales permiten mantener su capacidad y vida útil.

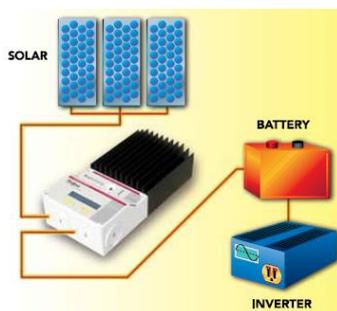


Figura 6.4 Control de carga

**Control de consumo:** Permite el arranque de motores y bombas, soporta una corriente de irrupción de hasta 300 A y además posee protecciones de cortocircuito y sobrecarga con reconexión automática.

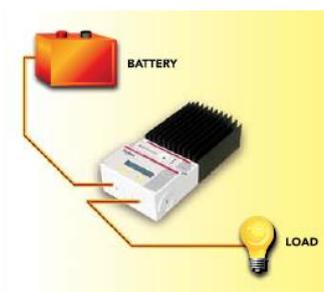


Figura 6.5 Control de consumo

**Control de energía:** El regulador permite la adición de otras fuentes de energía además de la solar, como la eólica e hidroeléctrica, para proteger a la batería de sobrecarga el exceso de energía puede desviarse a una batería secundaria o a una carga resistiva.

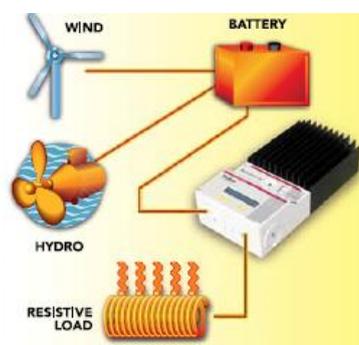


Figura 6.6 Control de energía

Tabla 6.1  
Características técnicas Regulador Tristar-45

Característica	Unidad	TriStar-45
<b>Voltaje nominal</b>	V	12
<b>Potencia</b>	W	4500
<b>Corriente de Carga</b>	A	45
<b>Autoconsumo de Corriente</b>	mA	<20
<b>Rendimiento</b>	%	99
<b>Peso</b>	kg	1.6
<b>Dimensiones</b>	mm	260x127x71
<b>Voltaje máximo del panel</b>	V	125
<b>Proteccion de sobrevoltaje</b>	V	48
<b>Proteccion de bajo voltaje</b>	V	9
<b>Visualizacion</b>		RS232
<b>Costo</b>	\$	220

### ***Baterías***

Para las baterías se determina una autonomía de un día lo que significa que la energía que puede ser usada diariamente de las baterías es de 4700 Wh. Para aminorar costos en esta aplicación se pretende utilizar baterías Ultracel de 150Ah ya que estas a diferencia de las Millenium tienen una vida útil de 15 años lo que disminuye costos de mantenimiento. Mediante la ecuación 2.10 se calcula las baterías necesarias tomando en cuenta que al ser de 12V para su uso con un sistema de 24V deben ser instaladas dos en serie.

**Cuadro 6.29**

**Cálculo de número de baterías aplicación rural**

<b>Cálculo de capacidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ultracel</b>
<b>Consumo diario</b>	Wh	4700
<b>Voltaje nominal</b>	Ah	391.67
<b>Rendimiento de acumulación</b>	%	90
<b>Profundidad de descarga</b>	%	50
<b>Días de autonomía</b>		1
<b>Capacidad de la batería</b>	Ah	870
<b>Capacidad de la batería individual</b>	Ah	150
<b>Número de baterías</b>		5.8
<b>Costo individual</b>	\$	410.00
<b>Costo total</b>	\$	2460.00

Se determina que se necesitan 6 baterías Ultracel de 150Ah, las cuales tienen las siguientes características:

**Tabla 6.2**

**Características de la batería Ultracel**

<b>Característica</b>	<b>Unidad</b>	<b>Ultracel</b>
<b>Voltaje nominal</b>	V	12
<b>Capacidad</b>	Ah	150
<b>Peso</b>	kg	37.6
<b>Temperatura de trabajo</b>	°C	25±3
<b>Máxima corriente de descarga</b>	A	1400
<b>Resistencia Interna</b>	mW	4.8
<b>Profundidad de descarga</b>	%	40
<b>Expectativa de vida</b>	meses	180
<b>Costo</b>	\$	410

### ***Inversor***

Para determinar el inversor analizamos que corriente de descarga es aceptable para una larga duración de las baterías. Las baterías pueden trabajar perfectamente a 15A cada una. Sumando los 3 grupos de baterías se obtiene una corriente de 45A, multiplicada por un voltaje nominal de 24V se obtiene una potencia de 1080W. Lo que nos indica que el inversor debe soportar una potencia de 1080A. Siendo este una potencia aceptable para la carga asignada. Además el inversor debe tener un voltaje nominal de entrada de 24VDC y 110VAC de salida.

En el mismo proveedor para la microcentral de la Universidad de las Fuerzas Armadas se encontró un inversor que cumple con los requerimientos de la aplicación rural. El inversor Innotec 1300-24 ofrece las siguientes características:

Tabla 6.3  
Características técnicas Inversor Innotec 1300-24

<b>Características</b>	<b>Unidad</b>	<b>Innotec 1300-24</b>
<b>Potencia nominal</b>	W	1300
<b>Potencia pico</b>	W	2800
<b>Eficiencia máxima</b>	%	94
<b>THD</b>	%	< 5%
<b>Peso</b>	Kg	8.5
<b>Costo</b>	\$	560

#### **6.4.5 Sistema de monitoreo**

El sistema de monitoreo que se va a utilizar es el mismo que se instaló en la Universidad de las Fuerzas Armadas. Con pequeñas adaptaciones en cuanto a la potencia que puede manejar el equipo, esto nos permite observar que el sistema de monitoreo es perfectamente adaptable a aplicaciones de gran escala, al estar desarrollado en un sistema modular. Para la presente aplicación rural es necesario

cambiar el tipo de sensor de corriente para que soporte la corriente requerida. El nuevo sensor es un CMCJU 19 de 45A que tiene un costo de 18 dólares.

#### 6.4.6 Detalle de Inversión

Se realiza el cálculo del costo por módulos:

Cuadro 6.30  
Costo por módulos de aplicación rural

Ítem	Denominación	Cant.	Valor unitario (\$)	Valor parcial (\$)
<b>1</b>	<b>Módulo fotovoltaico</b>			<b>1700</b>
1.1	Panel Solar 110 Wp	10	140	1400
1.2	Soporte	1	300	300
<b>2</b>	<b>Módulo eólico</b>			<b>1720</b>
2.1	Aerogenerador Gudcraft 300 W	4	350	1400
2.2	Soporte	4	80	320
<b>3</b>	<b>Módulo de distribución</b>			<b>3150</b>
3.1	Regulador solar	1	190	190
3.2	Batería Ultracel 150 Ah	6	410	2460
3.3	Inversor Innotec 1300-24	1	500	500
<b>4</b>	<b>Módulo de control</b>			<b>536</b>
4.1	Anemómetro y veleta	1	120	120
4.2	Piranómetro	1	144	144
4.3	Sensores de corriente	8	18	144
4.4	Sensor de temperatura	1	5	5
4.5	Controlador Arduino	1	48	48
4.6	Placa de control	1	75	75
<b>5</b>	<b>Varios</b>			<b>350</b>
5.1	Cableado y protecciones	1	100	100
5.2	Cajas de conexión	2	70	140
5.3	Varios	1	110	110
<b>Total</b>				<b>7456</b>

Como se observa en el gráfico 6.5 el mayor costo continua siendo el módulo de distribución, debido al precio elevado de las baterías, siendo este gasto aminorado en los costos adicionales ya que las baterías Ultracel presentan una vida útil superior al de las baterías Millenium.

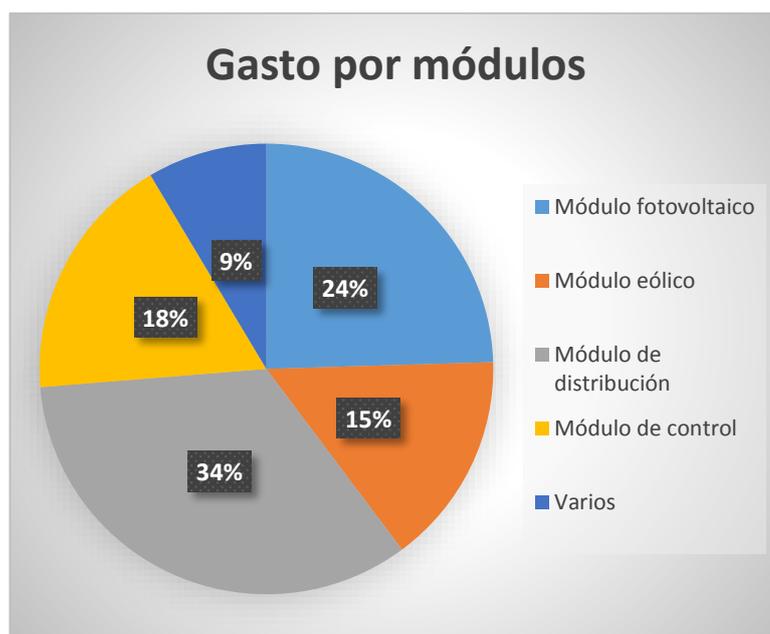


Figura 6.7 Costo por módulos de aplicación rural

A este costo por módulos se le aumentan los costos de 30% adicional por diseño y 10% adicional por la implementación. Lo que nos da una inversión inicial total de 10986 dólares.

Cuadro 6.31  
Inversión inicial aplicación rural

Ítem	Denominación	Valor (\$)
1	Costo por módulos	7456
2	Diseño Ingenieril	2300
3	Implementación	800
<b>Inversión inicial</b>		<b>10556</b>

#### 6.4.7 Costo de generación kWh

El funcionamiento eficiente está estimado para 20 años. Los únicos componentes que presentan una vida útil menor a 20 años son las baterías que presentan una vida útil de 15 años lo que pasado este tiempo deben ser reemplazadas. Adicional a esto se debe añadir los costos de mantenimiento preventivo y pequeños repuestos para la estación, lo que constituye costos adicionales a lo largo de 20 años.

Cuadro 6.32  
Costos adicionales para aplicación rural

<b>Denominación</b>	<b>Cant.</b>	<b>Cost. Unit.</b> <b>(\$)</b>	<b>Costo total</b> <b>(\$)</b>
<b>Bat. adicionales</b>	6	410	2460
<b>Mantenimiento</b>	40	20	800
<b>Repuestos</b>	1	50	50
<b>Total</b>			3310

Los costos adicionales ascienden a \$3310 a esto sumamos la inversión inicial y obtenemos el costo total de \$13866.

Cuadro 6.33  
Costo total aplicación rural

<b>Denominación</b>	<b>Valor (\$)</b>
<b>Inversión inicial</b>	10556
<b>Costos adicionales</b>	3310
<b>Total</b>	13866

Para el cálculo de la energía generada en 20 años se toman los datos del Cuadro 6.26 y del Cuadro 6.28, dando como resultado una generación en 20 años de 41.47 MWh.

Cuadro 6.34  
Generación en la aplicación rural

<b>Módulo</b>	<b>Generación anual</b> <b>kWh</b>	<b>Generación en 20 años</b> <b>kWh</b>
<b>Fotovoltaico</b>	1602.98	32059.50
<b>Eólico</b>	470.39	9407.88
<b>Total</b>	2073.37	41467.38

Con esto se determina el costo por kWh en \$0.33, lo cual continúa siendo un precio superior al establecido en el CONELEC. Esto se debe a que el CONELEC regula las estaciones que están conectadas a la red y no a las estaciones aisladas y como se dijo antes, en estas estaciones no se requiere el uso de acumuladores.

A continuación se realizará un análisis de los costos de generación si se aprovecha de forma individual la energía eólica y solar.

### ***Costo de Generación Fotovoltaica***

Los costos de inversión para una microcentral fotovoltaica se detallan a continuación:

**Cuadro 6.35**  
**Inversión Inicial (Generación Fotovoltaica)**

<b>Ítem</b>	<b>Denominación</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Valor unitario</b>	<b>Valor parcial</b>
<b>1</b>	Módulo fotovoltaico			1700
<b>1.1</b>	Panel Solar 110 Wp	10	140	1400
<b>1.2</b>	Soporte	1	300	300
<b>2</b>	Módulo de distribución			3150
<b>2.1</b>	Regulador Solar	1	190	190
<b>2.2</b>	Batería Ultracel 150 Ah	6	410	2460
<b>2.3</b>	Inversor Cotek SK350	1	500	500
<b>3</b>	Módulo de control			536
<b>3.1</b>	Anemómetro y veleta	1	120	120
<b>3.2</b>	Piranómetro	1	144	144
<b>3.3</b>	Sensores de corriente	8	18	144
<b>3.4</b>	Sensor de temperatura	1	5	5
<b>3.5</b>	Controlador Arduino	1	48	48
<b>3.6</b>	Placa de control	1	75	75
<b>4</b>	Varios			350
<b>4.1</b>	Cableado y protecciones	1	100	100
<b>4.2</b>	Cajas de conexión	2	70	140
<b>4.3</b>	Varios	1	110	110
<b>Total</b>				<b>5736</b>

Se suman los costos de diseño ingenieril, implementación y adicionales correspondientes al 30% de la inversión inicial, 10% de la inversión inicial y mantenimiento respectivamente.

La producción de energía eólica estimada en 20 años es de 32059.5 kWh según el Cuadro 6.34, con el costo total de \$10238, se ve que existe un costo de generación de \$0.34 por kWh.

Cuadro 6.36  
Costo Total (Generación Fotovoltaica)

Ítem	Denominación	Valor
1	Costo por módulos	5736
2	Diseño Ingenieril	1720
3	Implementación	570
4	Costos adicionales	2212
<b>Inversión inicial</b>		<b>10238</b>

*Costo de Generación Eólica*

Los costos de inversión para una microcentral eólica se detallan a continuación:

Cuadro 6.37  
Inversión inicial (Generación Eólica)

Ítem	Denominación	Cantidad	Valor unitario	Valor parcial
<b>1</b>	Módulo eólico			1720
1.1	Aerog. Gudcraft 300 W	4	350	1400
1.2	Soporte	4	80	320
<b>2</b>	Módulo de distribución			2960
2.1	Batería Ultracel 150 Ah	6	410	2460
2.2	Inversor Cotek SK350	1	500	500
<b>3</b>	Módulo de control			536
3.1	Anemómetro y veleta	1	120	120
3.2	Piranómetro	1	144	144
3.3	Sensores de corriente	8	18	144
3.4	Sensor de temperatura	1	5	5
3.5	Controlador Arduino	1	48	48
3.6	Placa de control	1	75	75
<b>4</b>	Varios			350
4.1	Cableado y protecciones	1	100	100
4.2	Cajas de conexión	2	70	140
4.3	Varios	1	110	110
<b>Total</b>				<b>5566</b>

Se suman los costos de diseño ingenieril, implementación y adicionales correspondientes al 30% de la inversión inicial, 10% de la inversión inicial y mantenimiento respectivamente.

Cuadro 6.38  
Costo total Generación Eólica

Ítem	Denominación	Valor
1	Costo por módulos	5566
2	Diseño Ingenieril	1670
3	Implementación	560
4	Costos adicionales	2012
	<b>Inversión inicial</b>	<b>9808</b>

La producción de energía eólica estimada en 20 años es de 9407.88 kWh según el Cuadro 6.34, con el costo total de \$9808, se ve que existe un costo de generación de \$1.04 por kWh.

Como se puede apreciar con la generación híbrida y las condiciones de la aplicación rural es posible disminuir el costo de producción a 33 ctvs de dólar.

Cuadro 6.39  
Costo kWh aplicación rural

Denominación	Costo kWh
<b>Fotovoltaica</b>	\$0.34
<b>Eólica</b>	\$1.04
<b>Híbrida</b>	\$0.33

## 6.5 Ventajas de la Instalación de una microcentral Eólica y Solar

Algunas de las ventajas de una instalación de este tipo son:

- Aprovecha eficientemente los recursos eólico y solar.
- Permite el uso de energía eléctrica en lugares de difícil acceso o donde el costo de una conexión al sistema nacional de electricidad resultaría elevado.
- Potencia el desarrollo de comunidades alejadas, ya que la posibilidad de acceso a nuevas tecnologías les permite una tecnificación de sus procesos productivos y el acceso al conocimiento, siendo el mismo un recurso importante para cualquier actividad que se esté desempeñando.

- Además, el modelo presentado de una microcentral es perfectamente adaptable a diferentes comunidades y necesidades ya que dependiendo de los recursos eólicos y solares se puede aumentar o disminuir el tamaño de los diferentes módulos.
- La implementación de estas microestaciones contribuye a la conservación del medio-ambiente, un punto de importancia relevante para el país, ya que uno de los potenciales turísticos del Ecuador es la naturaleza y su conservación, nos permite disfrutar de estos ingresos al ser uno de los principales destinos ecoturísticos del planeta.
- El desarrollo de microestaciones contribuye a disminuir la influencia de los combustibles fósiles, principalmente el petróleo. Siendo esta ventaja de gran beneficio ante la inminente crisis por falta de petróleo que se empieza a sentir en el planeta.
- El sistema de monitoreo presenta un histórico que muestra el consumo diario, mensual y anual de la locación donde se instale la estación , con estos datos se puede expandir la microcentral para aprovechar al máximo este recurso o en su defecto disminuir su tamaño para que la misma no sea subutilizada.
- Entre más instalaciones de este tipo se lleguen a instalar se puede crear una base de datos con los datos tomados mediante el sistema de monitoreo, siendo una herramienta valiosa para el estudio y desarrollo de futuras tecnologías adaptadas a las condiciones climáticas propias del Ecuador.

## CONCLUSIONES

- Se realizó la instalación del sistema fotovoltaico constituido por cuatro paneles solares ISOFOTON de 110Wp cada uno, este sistema constituye la principal fuente de energía de la microcentral ya que aporta alrededor del 94% del total de energía.
- Se realizó la instalación de un aerogenerador como fuente de apoyo a la energía solar de tipo Gudcraft WG300 multipala, el cual a comparación del tipo Savonius presenta un mayor coeficiente de potencia y eficiencia para bajas velocidades de viento. El rotor tipo Savonius con un área de 2.7 m<sup>2</sup> genera 8W a 5 m/s mientras que el tipo multipala genera 25W a dicha velocidad.
- El aerogenerador Gudcraft WG300 tiene una potencia nominal de 125 W a 12.5 m/s y puede alcanzar potencias de hasta 300W, sin embargo debido a la baja velocidad del viento en el lugar de aplicación y a los cambios drásticos de dirección, ocasionados por las turbulencias de los edificios cercanos, no alcanza a la potencia nominal.
- Se obtuvo una autonomía diaria de la microcentral, con un consumo de 1468 Wh, mediante la instalación de dos baterías Millenium de 115 Ah y un inversor Cotek de 350W, encargado de transmitir la energía en corriente sinusoidal hacia los consumidores. El dimensionamiento se llevó a cabo con los métodos descritos en el presente proyecto y además mediante dos pruebas separadas se comprobó su funcionamiento, estando apagados totalmente los sistemas de generación.
- La autonomía en la microcentral de generación, es uno de los puntos de mayor costo para su instalación, correspondiente al 34% del costo total, dando a reconocer que lo sistemas aislados se deben utilizar únicamente en poblaciones aisladas o de

difícil acceso al Sistema Nacional Interconectado, ya que la energía más costosa es la que no llega a donde se la necesita.

- Es conveniente la implementación de un sistema de monitoreo que permita analizar los datos de generación y consumo ya que en base a los mismos se puede establecer la posibilidad de instalar sistemas de mayor potencia mediante fuentes de energía renovable.
- El sistema de control y monitoreo de datos, mediante la lectura de sensores de todas las variables climatológicas y eléctricas, permite realizar un análisis detallado de la cantidad de energía disponible, generada, almacenada y consumida, tanto diario, como mensual y anualmente. El uso de la interfaz gráfica realizada en LabView facilita el almacenamiento, visualización y análisis de los datos transmitidos por el controlador.
- Para las condiciones propias de la zona de Sangolquí, es factible la instalación de generación fotovoltaica a gran escala debido a su alta insolación solar, superior a  $4500 \text{ Wh/m}^2/\text{día}$ , mientras que los datos obtenidos del atlas eólico determinan que no es una zona favorable para la generación eólica debido a la alta incidencia de obstáculos y bajas velocidades del viento con un promedio mensual máximo de  $2.51 \text{ m/s}$ .
- En nuestro país existen zonas rurales de difícil acceso, o totalmente aisladas, dónde el acceso a un recurso básico como lo es la energía eléctrica es complicado. La implementación de una microcentral eólica-fotovoltaica es una solución factible para este tipo de circunstancias, siendo capaz de aprovechar los recursos climáticos propios de la zona, ofreciendo autonomía, sin la necesidad de la construcción de un módulo de conexión al Sistema Nacional Interconectado.

- Una vez realizado el análisis económico y las pruebas de funcionamiento se ha determinado que, para las condiciones climáticas de la Universidad de la Fuerzas Armadas –ESPE, la generación solar fotovoltaica presenta una alta ventaja en comparación a la generación eólica, siendo el costo del kWh de \$0.42 y \$5.78 respectivamente.

## RECOMENDACIONES

- Para aprovechar la potencia nominal que brinda el aerogenerador es recomendable ubicarlo a una altura elevada, ya que la velocidad del viento incrementa con la altura y a la vez disminuye la posibilidad de que le afecten las perturbaciones del lugar.
- Se debe tomar en cuenta las especificaciones técnicas y rangos de trabajo de los sensores para evitar daños con las altas corrientes y el tiempo prolongado de uso.
- El presente proyecto, ha sido realizado como un primer acercamiento a la generación híbrida en el sector de Sangolquí, siendo un método factible para la determinación de la generación eólica-fotovoltaica, se recomienda realizar un estudio estadístico durante un período de 5 años acerca de los recursos climatológicos y con estos datos reajustar la investigación.
- La generación hidroeléctrica en nuestro país sigue siendo la de menor costo para el estado y el consumidor, por lo que difícilmente será superada por una microcentral híbrida. En el caso de que se decida por una microcentral eólica-fotovoltaica se aconseja la realización de un estudio previo y se determine si es realmente favorable la instalación de la misma, teniendo en cuenta el costo de generación y la cercanía a una conexión preexistente.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Airfoil Tools. (2014). *Airfoil Tools*. Retrieved from NACA 4412:  
<http://airfoiltools.com>
- Allegro. (2014). *Datasheet Sensor de corriente ACS712*.
- Atmospheric Fan System. (2014). *Energía Atmosférica*. Retrieved from Extractores:  
<http://www.extractores.com.mx>
- Bello, J. (2014, febrero 15). *Estado de la mar*. Retrieved from josebelloseakayaking:  
<http://josebelloseakayaking.blogspot.com>
- Biotren. (2014). *Adaptador Memoria Sd Para Arduino Pic Avr*.
- CIRSOC. (2012). *Reglamentos CIRSOC*. Retrieved from Instituto Nacional de Tecnología Industrial: <http://www.inti.gob.ar/cirsoc/>
- CONELEC. (2008). *Atlas Solar del Ecuador*. Quito: CIE.
- Creus, A. (2008). *Aerogeneradores*. Cataluña: Ediciones Cey.
- DAEnotes. (2014). *Inverter project*. Retrieved from DAEnotes:  
<http://www.daenotes.com>
- Disensa. (2014). *Electrocables*. Quito.
- EUSKAMPOS. (2013). *Análisis de Datos*. Retrieved from Energías Renovables:  
<http://www.sc.ehu.es>
- Fariñas, E. Y. (2013). *Estudio para el diseño aerodinámico de los aerogeneradores verticales tipo Giromill*.
- Gipe, P. (2000). *Energía eólica practica*. España: Progensa.
- Gudcraft. (2013, 04). *Aleko WG300*. Retrieved from gudcraftonline:  
<http://www.gudcraftonline.com>
- Institute for Energy Research. (2012).

- ISOFOTON. (1999). *Manual de Usuario Paneles Isofoton*. Madrid.
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Barcelona: Ceac.
- LATIn. (2014). *INTRODUCCION AL ESTUDIO DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGIA*. Retrieved from LATIn: <http://escritura.proyectolatin.org>
- Maxim. (2008). *Datasheet I2C Real Time Clock DS1307*.
- MILLENNIUM. (2014). *Batería 31DC115*.
- Ortega Rodríguez, M. (2002). *Energías Renovables*. España: Paraninfo.
- Perez, P. C. (2013). *Módulos Fotovoltaicos*. Retrieved from Oretano: <http://oretano.iele-ab.uclm.es/>
- Proviento. (2014). *Baterías Solares+Ciclo Profundo*. Retrieved from Proviento: <http://www.proviento.com.ec>
- Ropatek. (2013). *FAQ*. Retrieved from Ropatek: <http://www.ropatec.it>
- Universidad Nacional del Nordeste. (2014). *Parámetros de Diseño Aerogeneradores*. Corrientes-Argentina.
- Villarrubia, M. (2004). *Energía eólica*. Barcelona: Ceac.