

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**Diseño e implementación del laboratorio de energías renovables para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.**

PRESENTADO POR:

**JUAN RAMÓN ALBIÑANA ALFARO**

**EDWIN OSWALDO CRUZ DUBÓN**

**JONATHAN ENRIQUE FONG MENJÍVAR**

**DAVID ERNESTO PREZA HERNÁNDEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA.**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE 2015.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**DIRECTOR :**

**MSc. E ING. JOSÉ WILBER CALDERÓN URRUTIA**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA.**

Título :

**Diseño e implementación del laboratorio de energías renovables para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.**

Presentado por :

**JUAN RAMÓN ALBIÑANA ALFARO**

**EDWIN OSWALDO CRUZ DUBÓN**

**JONATHAN ENRIQUE FONG MENJÍVAR**

**DAVID ERNESTO PREZA HERNÁNDEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. E ING. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ**

San Salvador, Septiembre 2015.

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. E ING.CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, Jueves 20 de agosto de 2015, en la Sala de Reuniones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 4:00 horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. MSc. e Ing. José Wilber Calderón Urrutia  
Director

Firma: Wilber Calderón  
Firma: [Signature]



2. MSc. e Ing. Salvador de Jesús Germán  
Secretario

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- MSc. Carlos Osmin Pocasangre Jiménez

2- Ing. Armando Martínez Calderón

3- Ing. Werner David Meléndez Valle

Firma: [Signature]  
Firma: [Signature]  
Firma: [Signature]

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Diseño e implementación del laboratorio de energías renovables para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

A cargo de los Bachilleres:

- Albiñana Alfaro Juan Ramón
- Cruz Dubón Edwin Oswaldo
- Fong Menjivar Jonathan Enrique
- Preza Hernández David Ernesto

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 8.5

(Ocho punto cinco)

## AGRADECIMIENTOS.

Primero que nada quiero agradecer a Dios y a la Virgen María por permitirme terminar mi carrera universitaria, nadie dijo que estudiar Ingeniería sería fácil, y menos Ingeniería Eléctrica, pero ellos guiaron mis pasos desde el principio y me supieron llevar por el camino correcto, gracias por llenarme de Bendiciones a lo largo de mi carrera.

Posteriormente quiero agradecer a mis madres, Ana Isabel Alfaro de Albiñana (Mamá Ana) y Emilia Alfaro Coto (Mamá Mila), quienes estuvieron siempre conmigo en cada uno de los momentos desde que inicié esta batalla, quiero agradecerles por todo el sacrificio que han hecho por mí, por todo el apoyo, por todos los consejos, por todos los regaños, por todas sus enseñanzas, en fin, por todas las cosas que hicieron por mi durante todo este proceso, ahora es cuando tengo que devolverles un poco de lo mucho que han dado por mí.

Además quiero agradecer al MSc. e Ing. Carlos Osmín Pocasangre Jiménez, asesor de este trabajo de graduación, gracias por sus consejos y su ayuda en todo el proceso de este proyecto, ya que sin su conocimiento no hubiera podido ser posible llevarse a cabo todo lo que se realizó.

Quiero agradecer a cada uno de los docentes que me impartieran clases desde los catedráticos de Ciencias Básicas, hasta los de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, cada uno de ellos me enseñó que todo el esfuerzo tendría su recompensa al final del camino.

Finalmente, pero no menos importante, quiero agradecer todo el apoyo que me han brindado mis amigos y compañeros de mil batallas en la Universidad, Luis Miguel Escobar Hernández y Edwin Oswaldo Cruz Dubón, quienes estuvieron conmigo desde el inicio de la carrera hasta el final, gracias por sus consejos, por su sabiduría, por su paciencia y por todas esas maratones de estudios que realizamos durante todos y cada uno de los ciclos que hemos dejado atrás.

Gracias a todos los que no mencioné, pero que de una manera u otra estuvieron dándome aliento a seguir adelante, a hacer realidad este sueño, el sueño de ser Ingeniero, a todos ustedes, infinitas gracias...

Yo quiero, yo puedo, yo lo voy a hacer uh, ha

Juan Ramón Albiñana Alfaro.

Le doy gracias a Dios por permitirme haber dado inicio y culminado la carrera de Ingeniería Eléctrica, por darme esa fortaleza, paciencia y sabiduría para afrontar todas las pruebas que se dieron a lo largo de la carrera y las que surgieron para culminar este trabajo de graduación. Para ti señor sea la honra y la gloria. Gracias Virgen de Guadalupe por cuidarme con tu manto protector y escuchar mis oraciones.

También quiero agradecer a mi familia por todo su apoyo y comprensión, sabía que no estaba solo, ya que contaba con sus oraciones y sus buenos deseos para que culminara el estudio que con gran entusiasmo y dedicación inicié y finalicé; cada día, cada mañana, tenía la mentalidad de dar lo mejor de mí, para que todo su esfuerzo valiera la pena por darme la oportunidad de estudiar, por eso este trabajo lo dedico especialmente a mi madre y a mi padre, pues gracias a ellos ha sido posible culminar este libro. A mis hermanas también quiero agradecer su apoyo al motivarme a seguir firme con el objetivo de terminar la carrera de ingeniería. Agradezco a Josselyn Leiva por sus oraciones, su comprensión y apoyo.

Todo esfuerzo tiene su recompensa por eso también, agradezco a mis compañeros de trabajo de graduación por todo el empeño y dedicación que mostraron desde el inicio, gracias Juan Albiñana, Jonathan Fong y David Preza, al final se logró terminar este primer libro, que espero que no sea el último, sino el primero de más ejemplares que se puedan editar para el bien de la sociedad, en búsqueda de recursos renovables sostenibles.

Edwin Oswaldo Cruz Dubón.

Antes que nada, agradecerle a Dios por bendecirme de muchas maneras a lo largo de mi vida pero hoy quiero hacer mención especial al de haber podido llegar al final de mi carrera universitaria, desde mis comienzos como estudiante Él siempre ha sido mi fortaleza, y aunque no ha sido fácil, Él ha podido guiarme a lo largo de ella para poder tomar buenas decisiones. También agradecerle por darme la dicha de realizar mi trabajo de graduación al lado de un gran amigo Ernesto Hernández y al lado de mi primo Edwin Cruz.

Agradezco infinitamente a mis padres Roberto Fong y Maricarmen de Fong porque ellos han sido la base fundamental en la construcción de mi vida, tanto en lo moral como en lo académico. Les agradezco todos aquellos consejos, valores inculcados y afecto que a lo largo de estos años me han ayudado a concluir mi carrera universitaria.

Agradezco a mi Hermana, a mi Abuelita y a toda la familia en general por su apoyo y comprensión que en estos años me han podido brindar de una u otra forma.

También agradecerles a mis amigos David Preza, Teddy Calderón y David Serrano por estar a mi lado en los momentos más importantes de mi formación académica tanto en educación media como en la educación superior. Y hacer un especial agradecimiento a la Familia Calderón, Doña Mari y Don Miguel gracias infinitas por todas esas atenciones que tuvieron con nosotros a lo largo de la carrera.

Agradezco a todos mis profesores y docentes que hicieron posible toda mi formación académica, por sus enseñanzas y consejos que me brindaron, en especial al MSc. e Ing. Carlos Osmín Pocasangre Jiménez por el apoyo que brindó como asesor del presente trabajo de graduación.

Finalmente agradecerle a la Susy por permitirme concluir la carrera, gracias a sus constantes motivaciones se pudo lograr el objetivo que desde el primer día me tracé.

Jonathan Enrique Fong Menjívar.

Primero deseo agradecerle a Dios por permitirme llegar aquí y cumplir con esta meta, luego a mi familia por estar siempre a mi lado y confiar en mi gracias a mi padre Marco Antonio Preza y a mi madre Rosa Mélida Hernández por todo su apoyo y esfuerzo, porque sin el no sería posible este momento. A mi madre a quien dedico este momento, en mi lista de cosas por hacer, escribí que la abrazaré cuando tenga el diploma entre mis manos espero que pueda cumplir esa promesa.

Quiero agradecer al MSc. e Ing. Carlos Osmín Pocasangre Jiménez por todo el apoyo y ayuda que nos brindó como asesor de trabajo de graduación ya que sin él, este proyecto no sería posible, gracias por ser un buen mentor y ayudar en cada una de las etapas del presente trabajo.

Agradecer a Cristina Sánchez, una chelita hermosa, por el apoyo que me brindó y toda su ayuda, porque cuando pensé que no lo lograría sus palabras me hicieron luchar más. Ella me apoyó cuando nadie más creía y sinceramente este esfuerzo se lo dedico a ella para que esté muy orgullosa de mí.

Agradezco a mis Amigos Jonathan Fong, Teddy Miguel Calderón, Javier Recinos, José David Serrano, entre muchos otros que me ayudaron a formar mi camino y me siguen ayudando.

A la familia de Teddy, una señora la cual a lo largo de mi carrera nos brindó un lugar donde estudiar, comer y consejos, jamás se le podrá pagar todo el apoyo que nos dieron Doña Mari y Don Miguel muchas gracias por todo.

Y sin olvidarme, quisiera agradecer a la Susy por permitirnos terminar la carrera, de muchas maneras ella nos hizo luchar más fuerte para completar nuestra meta, y a toda esa gente que pensó que no se lograría, pues aquí estamos.

Esto También Pasará...

David Ernesto Preza Hernández.

## RESUMEN EJECUTIVO.

El siguiente documento, el cual lleva por título “Diseño e implementación del laboratorio de energías renovables para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura” está estructurado de la siguiente manera: En el capítulo I se habla sobre los Fundamentos Teóricos que corresponden a las Energías Renovables, además, se muestra como se encuentra actualmente la situación energética de El Salvador y se hace una comparación con los datos obtenidos en el año 2013 y 2014 mostrando gráficos y tablas, (teniendo como fuente la SIGET), las cuales determinan cual fue el consumo final de energía eléctrica generado en esos años. Una vez mostrados los datos anteriores, el documento hace referencia al aprovechamiento de la energía solar en El Salvador y habla sobre la energía solar fotovoltaica, donde se explica cual es todo el equipo que se utiliza en una conexión para un sistema solar fotovoltaico, se hablará de las características que estos equipos poseen, así como también algunas marcas de los equipos a utilizar, aparte de todo lo mencionado, se presentarán ecuaciones que se utilizan en el principio de conversión fotovoltaica así como de los efectos de la temperatura que pueden llegar a tener los módulos fotovoltaicos.

Luego de mencionar las características de la energía solar fotovoltaica, se entra de lleno a lo que es la teoría de la energía solar térmica, se hablará sobre su clasificación y el aprovechamiento que se le da a ésta en El Salvador, y se explicará cómo es el funcionamiento de una instalación solar térmica a baja, media y alta temperatura y luego se describirán los diferentes sistemas de captadores que más se utilizan, posteriormente se mencionarán algunas de las aplicaciones de los captadores de energía solar térmica según su clasificación. Para finalizar los fundamentos teóricos de las energías renovables se mencionarán los aspectos teóricos de la energía eólica y sus ventajas y desventajas, también se hablará de cómo se encuentra el recurso eólico en El Salvador, además se mencionan cuáles deben de ser los pasos a seguir para realizar un estudio que conlleve la planificación para generación eólica, cómo se cuantifica el recurso con el que se cuenta en

El Salvador, la clasificación del viento y se explica un poco sobre la teoría para obtener las gráficas de potencia del viento; luego de todo lo anteriormente mencionado, se hablará un poco de los aerogeneradores y cómo deben de ser instalados para su máximo aprovechamiento y los diferentes tipos que existen, luego se mostrará la teoría sobre los anemómetros, que tipos hay, y cómo es la instalación adecuada de éstos, y para finalizar con el capítulo I se hablará de lo que es la exergía, es decir, se muestran mapas de radiación solar, irradiación solar y brillo solar de El Salvador para analizar con cuanta potencia se cuenta en los diferentes puntos del país, así como también se muestran mapas de la potencia del viento que hay en El Salvador a diferentes alturas sobre el nivel del suelo, para realizar los análisis correspondientes sobre el estudio de la energía eólica en El Salvador.

El capítulo II hablará sobre lo que es el Diseño del Recurso Solar Fotovoltaico con el que se trabajará en el laboratorio de energías renovables, se mostrarán cuáles han sido los datos de medición obtenidos de irradiancia solar a diferentes horas del día, y poder así obtener gráficas que muestren el comportamiento del sol en la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, cabe resaltar que también se estarán mostrando los valores de tensión que presentan los módulos fotovoltaicos instalados y el comportamiento que éstos tienen según el movimiento que el sol vaya efectuando durante el día, y se compararán los valores obtenidos durante el día y la noche para obtener gráficas que serán analizadas en su momento y que nos darán la pauta para opinar si es rentable realizar una instalación solar fotovoltaica en la terraza de la biblioteca, además de ello, se mostrarán gráficas de la carga y descarga que lleguen a presentar el banco de baterías instalado en el laboratorio y así poder analizar su comportamiento.

Mismo análisis se hará en el capítulo III, que habla sobre el Diseño del Recurso Solar Térmico, cabe mencionar que se estará trabajando con un equipo que ya se encuentra instalado en el lugar, y que se apegará a las condiciones que éste presente, se medirá el

caudal de fluido que pasa a través del colector solar, su temperatura a diferentes horas del día y la presión con la que éste trabaja; básicamente con este sistema, se hará únicamente como una introducción al tema de energía solar térmica, sin embargo, se presentarán las gráficas de caracterización del equipo para tener una idea de cómo es el funcionamiento y el comportamiento del mismo.

En el capítulo IV se hablará sobre el Diseño del Recurso Eólico en la terraza de la biblioteca, se presentarán diferentes tablas de datos, en las cuales se mostrarán las diferentes velocidades de viento, así como la dirección de éste, que será marcada por la veleta para poder determinar con la rosa de los vientos la dirección más constante del viento, además se mostrarán gráficos como lo es la Distribución de Weibull, que es una distribución probabilística cuyo valor del área que se encuentra bajo la curva debe de ser siempre exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquier valor de velocidades mostradas ahí, incluyendo el 0, debe de ser del 100%, con esto se podrá determinar si es conveniente o no, invertir en un proyecto que tenga que ver con el recurso eólico.

Cabe mencionar que todo este estudio que se realizará, es con fines didácticos, es decir, no se busca una generación masiva en el área del laboratorio, sino que, cada persona que haga uso del laboratorio, tenga conocimiento del equipo que ahí se instalará y que interactúe con el mismo, y sean ellos quienes realicen diversas pruebas y puedan sacar sus propias conclusiones sobre el recurso solar fotovoltaico, recurso solar térmico y recurso eólico con el que se cuenta actualmente en El Salvador y poder realizar comparaciones con los datos que lleguen a obtener.

Finalmente, en los anexos del documento se mostrarán imágenes de los trabajos que se realizaron en el área del laboratorio, desde cómo se encontró cuando se comenzó con el proyecto, hasta la finalización del mismo, mostrando las instalaciones del equipo con el cual contará el Laboratorio de energías renovables de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.

## ÍNDICE GENERAL.

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
OBJETIVOS.....	4
ALCANCES.....	5
ANTECEDENTES.....	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	7
JUSTIFICACIÓN .....	8
CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEORICOS.....	9
1.1.    SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL. ....	9
1.1.1.    Consumo Energético de El Salvador. ....	9
1.1.2.    Estadísticas. ....	9
1.2.    ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA. ....	13
1.2.1.    Principios Físicos de la Conversión Fotovoltaica. ....	13
1.2.2.    Semiconductores. ....	13
1.2.3.    Dopado de semiconductores. ....	16
1.2.4.    Célula fotovoltaica. ....	20
1.2.5.    Característica I-V de la celda fotovoltaica-Parámetros característicos. ....	22
1.2.6.    Efecto de la temperatura. ....	24
1.2.7.    Parámetros fundamentales de las celdas fotovoltaicas. ....	25
1.2.8.    Modelo de la célula fotovoltaica. ....	27
1.2.9.    Módulos Fotovoltaicos. ....	29
1.2.10.    Controlador de carga. ....	35
1.2.11.    Esquema de conexión estándar de un controlador de carga. ....	39
1.2.12.    Proceso de carga de baterías. ....	40
1.2.13.    Inversor. ....	44
1.2.14.    Clasificación de los inversores. ....	45
1.2.15.    Parámetros de operación de los inversores. ....	47
1.2.16.    Partes fundamentales de los inversores. ....	48
1.2.17.    Baterías. ....	49
1.2.18.    Tipos de Baterías para aplicaciones Fotovoltaicas. ....	51
1.3    ENERGÍA SOLAR TÉRMICA. ....	54

1.3.1	Clasificación de la energía solar térmica.....	54
1.3.2	Aprovechamiento de la energía solar térmica.....	55
1.3.3	Funcionamiento de una instalación solar de baja temperatura. ....	56
1.3.4	Elementos principales de una instalación solar térmica. ....	57
1.3.5	Sistemas de captación en plantas.....	59
1.3.6	Sistema de captación lineal y puntual. ....	59
1.3.7	Sistema de distribución. ....	60
1.3.8	Almacenamiento. ....	63
1.3.9	Aplicaciones con baja temperatura. ....	64
1.3.10	Aplicaciones de agua caliente sanitaria. ....	65
1.3.11	Aplicaciones con Medianas temperaturas.....	68
1.3.12	Aplicaciones con Altas Temperaturas. ....	69
1.3.13	Ecuación básica del balance energético en colectores de placa plana. ....	70
1.4	ENERGÍA EÓLICA.....	72
1.4.1	Ventajas de la energía eólica. ....	72
1.4.2	Datos del sitio de largo plazo.....	73
1.4.3	Cuantificación el recurso. ....	73
1.4.4	Aerogeneradores.....	75
1.4.5	Clasificación del viento. ....	78
1.4.6	Variabilidad de la velocidad del viento. ....	80
1.4.7	Descripción de las variaciones del viento. ....	81
1.4.8	Coeficiente de potencia de un aerogenerador. ....	83
1.4.9	Curva de potencia de un aerogenerador. ....	83
1.4.10	Incertidumbres en mediciones de curvas de potencia. ....	85
1.4.11	Tipos de Aerogeneradores.....	85
1.4.12	Partes que componen un aerogenerador.....	86
	Generador eléctrico .....	88
1.4.13	Anemómetro. ....	93
1.5	Caracterización del recurso Solar en El Salvador. ....	99
1.5.1	Irradiación solar.....	101
1.6	Caracterización Recurso eólico en El Salvador.....	106
1.6.1	Pasos para determinar si el potencial eólico de un sitio es adecuado. ....	107

CAPÍTULO II: DISEÑO DE RECURSO SOLAR FOTOVOLTAICO. ....	112
2.1.  CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPOS FOTOVOLTAICO. ....	112
2.1.1.  Caracterización de paneles fotovoltaicos bajo normas ASTM/IEC. ....	112
2.1.2.  Prueba de inspección visual. ....	113
2.1.3.  Ensayo de aislamiento eléctrico. ....	114
2.1.4.  Ensayo de características eléctricas en condiciones normalizadas. ....	114
2.1.5.  Curva característica corriente-tensión. ....	115
2.2.  EQUIPO UTILIZADO EN EL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO. ....	119
2.2.1.  Panel fotovoltaico. ....	119
2.2.2.  Controlador de Carga Xantrex C60. ....	120
2.2.3.  Inversor DC/AC ....	131
2.2.4.  Contactor. ....	135
2.2.5.  Fusibles. ....	136
2.2.6.  Portafusibles. ....	138
2.2.7.  Cable instalado para banco de baterías. ....	139
2.2.8.  Cables utilizados para interconexión de equipos. ....	140
2.3.  DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO. ....	140
2.3.1.  Diagrama Unifilar del sistema. ....	140
2.4.  EQUIPO DE MEDICIÓN Y SENSORES EMPELADOS EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO. ....	144
2.4.1.  Multímetro KEITHLEY 2700. ....	144
2.5.  ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES. ....	147
2.5.1  Irradiación solar: ....	147
2.5.2  Análisis de datos del generador fotovoltaico. ....	152
2.5.3  Análisis de datos de baterías. ....	156
2.5.4  Análisis de datos del Controlador de carga. ....	158
CAPÍTULO III: DISEÑO DE RECURSO SOLAR TÉRMICO. ....	160
3.1.  EQUIPO UTILIZADO EN EL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO. ....	160
3.1.1.  Termotanque. ....	160
3.1.2.  Colector solar. ....	163
3.1.3.  Sistema de distribución. ....	164
3.1.4.  Termopar tipo J ....	164
3.1.5.  Medidor volumétrico de agua. ....	166

3.2.	CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO SOLAR TÉRMICO Y MEDICIONES OBTENIDAS.....	166
3.2.1.	Irradiancia.....	166
3.2.2.	Temperatura.....	170
3.2.3.	Caudal en sistema de distribución.....	173
3.3.	ESTUDIOS DE DATOS DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO. ....	174
3.3.1.	Estudio económico. ....	174
CAPITULO IV: DISEÑO DEL RECURSO EÓLICO. ....		176
4.1	EQUIPO UTILIZADO EN EL SISTEMA EÓLICO. ....	178
4.1.1	Aerogenerador .....	178
4.1.2	Controlador de Carga DC del Sistema Eólico .....	183
4.1.3	Fusibles.....	183
4.1.4	Portafusibles.....	183
4.1.5	Interruptor termomagnético .....	184
4.1.6	Anemómetro y veleta .....	188
4.2	TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE VIENTO .....	190
4.2.1	Distribuciones temporales.....	190
4.2.2	Distribuciones de frecuencia .....	190
4.2.3	Cuantificación de la energía existente en el viento .....	194
4.3	DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA EOLICO .....	195
4.3.1	Diagrama Unifilar.....	195
4.3.2	Diagrama de conexión .....	196
4.3.3	Diagrama de conexión de sensores .....	199
4.4	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	200
4.4.1	Grafico de la variación del viento en función del tiempo. ....	200
4.4.2	Medición de la orientación del viento. ....	200
4.4.3	Medición de la velocidad del viento .....	202
4.4.4	Estimación de la energía por unidad de área.....	205
CONCLUSIONES.....		209
RECOMENDACIONES.....		214
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		215

## ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN ÁTOMO DE SILICIO CON SUS ELECTRONES DE VALENCIA (IZQUIERDA) Y DEL CRISTAL GENERADO POR ENLACES COVALENTES (DERECHA).[2] .....	14
FIGURA 2: MODELO DE ENLACES: A) A BAJA TEMPERATURA, B) A ALTA TEMPERATURA.[2] .....	15
FIGURA 3: MODELO DE BANDAS.[2].....	15
FIGURA 4: A) LIBERACIÓN DE UN ELECTRÓN Y PASAR A LA BANDA DE CONDUCCIÓN, SE GENERA UN HUECO, B) DESPLAZAMIENTO DE HUECOS ENTRE ÁTOMOS.[2].....	16
FIGURA 5: A) DOPADO DE CRISTALES SEMICONDUCTORES DEL TIPO N CON IMPUREZAS, DE 5 ELECTRONES EN SU NIVEL DE VALENCIA. B) CRISTALES TIPO P CON IMPUREZAS CON TRES ELECTRONES EN SU ÚLTIMO NIVEL.[2] .....	17
FIGURA 6: UNIÓN PN.[2].....	18
FIGURA 7: APLICACIÓN DE VOLTAJE EN UNIÓN PN.[2] .....	18
FIGURA 8: PRINCIPIO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA.[3].....	20
FIGURA 9: REPRESENTACIÓN DE LAS CORRIENTES.[4].....	21
FIGURA 10 : ESTRUCTURA DE LA CORRIENTE DE LA CÉLULA.[4] .....	22
FIGURA 11: CIRCUITO PARA MEDICIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.[2] ....	23
FIGURA 12: MODELO DEL CIRCUITO DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.[4] .....	28
FIGURA 13: ELEMENTOS QUE CONFORMAN UN MÓDULO FOTOVOLTAICO.[2] .....	30
FIGURA 14: MÓDULO FOTOVOLTAICO DEL TIPO MONOCRISTALINO. [5] .....	31
FIGURA 15: MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO.[5] .....	32
FIGURA 16: MÓDULO FOTOVOLTAICO DEL TIPO AMORFO. [6] .....	32
FIGURA 17: MÓDULO FOTOVOLTAICO DE TELURO DE CADMIO. [7].....	33
FIGURA 18: IMAGEN ILUSTRATIVA DE UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN SOLAR. [5] .....	34
FIGURA 19: MÓDULO FOTOVOLTAICO EN FORMA DE TEJA.[6] .....	34
FIGURA 20: PANEL BIFACIAL.[5].....	35
FIGURA 21: IMAGEN QUE DEMUESTRA LA MODULACIÓN DE PULSOS PARA UN CONTROLADOR DE CARGA CON PWM DONDE SE PUEDEN APRECIAR LOS PERIODOS DE CARGA. [8] .....	37
FIGURA 22: DIAGRAMA GENERAL DE CONEXIÓN DE UN CONTROLADOR DE CARGA. [9].....	40
FIGURA 23: BATERÍA CON UN PROCESO DE SULFATACIÓN GRAVE, DONDE SE PUEDEN APRECIAR SUS CELDAS DAÑADAS. [11].....	43
FIGURA 24: ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE UN INVERSOR.[12].....	44
FIGURA 25: ESQUEMA DE CONEXIÓN DE UN INVERSOR CENTRAL. [13] .....	46
FIGURA 26: ESQUEMA DE UN SISTEMA DE INVERSORES EN CADENA[13] .....	46
FIGURA 27: ESQUEMA DE UN SISTEMA DE MÓDULOS AC CONECTADOS A LA RED. [13] .....	47
FIGURA 28: BATERÍA PARA USO FOTOVOLTAICO.[14] .....	50
FIGURA 29: PARTES QUE CONFORMAN UNA BATERÍA. [14] .....	50
FIGURA 30: DIFERENTES TIPOS DE TECNOLOGÍAS USADAS EN BATERÍAS. [41] .....	51
FIGURA 31: ESQUEMA BÁSICO DE UNA INSTALACIÓN SOLAR DE BAJA TEMPERATURA COMO APLICACIÓN DE AGUA CALIENTE SANITARIA.[15] .....	57
FIGURA 32: A) CAPTADOR PLANO DE TUBOS PARALELOS, B) CAPTADOR PLANO TIPO SERPENTINA.[16] .....	58
FIGURA 33: SISTEMA DE CAPTACIÓN LINEAL.[17] .....	60
FIGURA 34: SISTEMA DE CIRCUITO ABIERTO.[18].....	61
FIGURA 35: SISTEMA DE CIRCUITO CERRADO.[18] .....	62
FIGURA 36: ESQUEMA DE CIRCUITO DE CIRCULACIÓN FORZADA.[18].....	62
FIGURA 37: ESQUEMA DE INSTALACIÓN DE CIRCULACIÓN NATURAL.[18] .....	63
FIGURA 38: TIPOS DE ALMACENAMIENTO.[16].....	64
FIGURA 39: ESQUEMA DE UN SISTEMA DE ACONDICIONAMIENTO DE AIRE POR ABSORCIÓN.[15] .....	68
FIGURA 40: TIPOS DE CONCENTRADORES EMPLEADOS PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA.[17] .....	69
FIGURA 41: ESTRUCTURA DE UN COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA.[17] .....	70

FIGURA 42: ÍNDICE DE DEFORMIDAD “FLAGGING”. [19] .....	74
FIGURA 43: A) CLASE II CORRESPONDIENTE A VELOCIDADES DE 4 A 5 M/S. B) CLASE VI CORRESPONDIENTE A VELOCIDADES DE 8 A 9 M/S. [19] .....	75
FIGURA 44: A) TURBINA EÓLICA (CHARLES BRUSH). B) AEROGENERADOR (PAUL LA COUR). [20].....	76
FIGURA 45: RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA NOMINAL Y EL DIÁMETRO DE ROTOR DE UNA TURBINA EÓLICA MODERNA. [20] .....	78
FIGURA 46: EFECTO DE LA FUERZA DE CORIOLIS EN LA CIRCULACIÓN ATMOSFÉRICA GENERAL. [21] .....	80
FIGURA 47: PARTES QUE COMPONEN UN AEROGENERADOR. [22] .....	87
FIGURA 48: (A) TORRES AUTOPORTANTES, ATIRANTADAS O CON TENSORES. (B) TORRES DE CELOSÍA. (C) TORRES TUBULARES. [23].....	92
FIGURA 49: CARACTERÍSTICAS DE UN CORRECTO DISEÑO PARA UN ANEMÓMETRO DE ROTACIÓN. [23] .....	95
FIGURA 50: CARACTERÍSTICAS DE UN MAL DISEÑO PARA UN ANEMÓMETRO DE ROTACIÓN. [23] .....	95
FIGURA 51: INSTALACIÓN DE ANEMÓMETRO Y VELETA. [23] .....	97
FIGURA 52: A) EJEMPLO DE ANEMÓMETROS CORRECTAMENTE INSTALADOS. B) EJEMPLO DE ANEMÓMETROS INCORRECTAMENTE INSTALADOS. [23] .....	98
FIGURA 53: UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA BIBLIOTECA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, FUENTE DE IMAGEN: APLICACIÓN GOOGLE MAPS. [24] .....	99
FIGURA 54: PLANO ARQUITECTÓNICO DEL ÁREA DEL LABORATORIO DE ER. DE LA BIBLIOTECA DE LA FIA-UES. [24] .....	101
FIGURA 55: MAPA DE IRRADIACIÓN SOLAR PROMEDIO DURANTE UN AÑO (2004). [19] .....	102
FIGURA 56: MAPA DE HORAS DE LUZ SOLAR EN EL SALVADOR (2004). [19].....	103
FIGURA 57: MAPA DE RADIACIÓN SOLAR DE EL SALVADOR (2013). [19] .....	104
FIGURA 58: MAPA DEL POTENCIAL EÓLICO DE EL SALVADOR. (30M SOBRE EL NIVEL DEL SUELO). [26] .....	109
FIGURA 59: MAPA DEL POTENCIAL EÓLICO DE EL SALVADOR. (50M SOBRE EL NIVEL DEL SUELO). [26].....	110
FIGURA 60: MAPA DEL POTENCIAL EÓLICO DE EL SALVADOR. (80M SOBRE EL NIVEL DEL SUELO). [26].....	111
FIGURA 61: CURVA CARACTERÍSTICA DETALLANDO LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO. [27] .....	115
FIGURA 62: OBTENCIÓN DE CURVA DE RESPUESTA CON ILUMINACIÓN ARTIFICIAL. [14].....	118
FIGURA 63: PANEL FOTOVOLTAICO MONOCRISTALINO DE 4X9 CELDAS EMPLEADO EN EL LABORATORIO [28] .....	119
FIGURA 64: CONTROLADOR DE CARGA, MARCA XANTREX C60. [29].....	121
FIGURA 65: DIAGRAMA DE BLOQUES DE OPERACIÓN EN EL MODO REGULADOR DE CARGA FV. [29] .....	121
FIGURA 66: DIAGRAMA DE BLOQUES DE OPERACIÓN EN EL MODO REGULACIÓN DE DERIVACIÓN. [29] .....	122
FIGURA 67: DIAGRAMA DE BLOQUES DE OPERACIÓN EN EL MODO DE REGULACIÓN DE CARGAS DE CC. [29] .....	122
FIGURA 68: PERILLAS DE AJUSTE DE LVR Y LVD PARA EL MODO DE REGULACIÓN DE CARGAS DE CC. [29] ...	123
FIGURA 69: ESTADOS DEL LED MULTICOLOR DEL EQUIPO. [29] .....	125
FIGURA 70: JUMPER SELECTOR DE NIVEL DE TENSIÓN DE SALIDA <b>V<sub>out</sub></b> DEL EQUIPO. [29].....	126
FIGURA 71: BORNERAS DE CONEXIÓN DEL EQUIPO, DONDE SE PUEDEN APRECIAR QUE LOS NEGATIVOS SON COMUNES TANTO PARA BATERÍAS COMO PARA EL SISTEMA FV. [29] .....	126
FIGURA 72: DIAGRAMA DE CONEXIÓN TÍPICA DEL MODELO XANTREX C60. [29] .....	127
FIGURA 73: TARJETA ELECTRÓNICA QUE CONFORMA EL XANTREX C60 DONDE SE PUEDEN APRECIAR LOS SELECTORES DE LAS CARACTERÍSTICAS DE CARGA QUE POSEE EL EQUIPO. [29] .....	129
FIGURA 74: INVERSOR DE POTENCIA ENTRADA DE TENSIÓN DC SALIDA DE TENSIÓN AC. [30].....	131
FIGURA 75: VISTA DE CONECTORES E INTERRUPTOR DEL INVERSOR, NOTA: EL EQUIPO UTILIZADO EN EL PROYECTO NO POSEE EL MEDIDOR DE WATTS Y EL PUERTO PARA CONTROL REMOTO. [31] .....	132
FIGURA 76: BORNERAS PARA LA CONEXIÓN DE BATERÍAS O PARA GENERADORES CC. [31].....	132
FIGURA 77: DIAGRAMA DE BLOQUES DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS ESTADOS DEL INVERSOR POWER EXPRESS. [31].....	133
FIGURA 78: FORMA DE ONDA DE LA SEÑAL DE SALIDA DEL INVERSOR, DONDE SE PUEDE APRECIAR LA FORMA DE ONDA MODIFICADA. [31] .....	134
FIGURA 79: CONTACTOR CON TRES CONTACTOS PRINCIPALES Y UN CONTACTO AUXILIAR. [33] .....	135
FIGURA 80: FUSIBLE DE CARTUCHO. [35].....	136

FIGURA 81: FUSIBLE DE CARTUCHO. TIEMPO LÍMITE PARA GENERACIÓN DE PRE-ARCO. [35].....	137
FIGURA 82: PORTAFUSIBLE ADECUADO PARA LA INSTALACIÓN DE FUSIBLE DE CARTUCHO.[35] .....	138
FIGURA 83: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.[36].....	142
FIGURA 84: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE CONEXIÓN.[36] .....	143
FIGURA 85: PANEL FRONTAL DE MULTÍMETRO KEITHLEY 2700.[37] .....	145
FIGURA 86: PARTE TRASERA DEL MULTÍMETRO KEITHLEY 2700.[37] .....	146
FIGURA 87: DIAGRAMA DE CONEXIÓN PARA LA MEDICIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE DEL SFV.[37] .....	147
FIGURA 88: CURVA OBTENIDA DEL SITIO WEB HTTP://CLIMA.FIA.UES.EDU.SV/ DONDE SE PUEDE APRECIAR LA IRRADIACIÓN SOLAR EN EL DÍA 18-08-2015.[38].....	148
FIGURA 89: DATO DE SALIDA Y PUESTA DEL SOL EL DÍA 18-08-2015, EN EL SALVADOR, PROPORCIONADO POR EL MARN.[39].....	149
FIGURA 90: PROCESO DE CARGA DE UNA BATERÍA POR MEDIO DE UN CONTROLADOR DE CARGA.[5] .....	158
FIGURA 91: TERMOTANQUE EMPLEADO EN EL LABORATORIO.[40] .....	161
FIGURA 92: CONEXIÓN DE TUBERÍAS CPVC AL TERMOTANQUE[40].....	161
FIGURA 93: VÁLVULA ELIMINADORA DE AIRE. [40].....	162
FIGURA 94: VÁLVULA DE ALIVIO.[40] .....	162
FIGURA 95: COLECTOR SOLAR PLANO EMPLEADO EN EL LABORATORIO.[40].....	163
FIGURA 96: TERMOPAR EMPLEADO.[42] .....	164
FIGURA 97: COLOCACIÓN DE TERMOPAR EN LAS TUBERÍAS DEL SISTEMA.[36].....	165
FIGURA 98: MEDIDOR VOLUMÉTRICO DE AGUA.[43].....	166
FIGURA 99: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE TERMOPAR EN LAS TUBERÍAS DEL TERMOTANQUE.[36].....	171
FIGURA 100: DIAGRAMA EN BLOQUES DE UN SISTEMA EÓLICO [21] .....	176
FIGURA 101: ILUSTRACIÓN DEL AEROGENERADOR [45].....	178
FIGURA 102: VISTA DE PERFIL DEL AEROGENERADOR [45].....	179
FIGURA 103: VISTA AÉREA DEL AEROGENERADOR [45].....	179
FIGURA 104: INSTALACIÓN RECOMENDADA DE LA TORRE DEL AEROGENERADOR. [45] .....	181
FIGURA 105: INSTALACIÓN DEL AEROGENERADOR SOBRE MÁSTIL, CON UNA ALTURA EFECTIVA DESDE EL NIVEL SUELO DE 11.5 M. [46] .....	182
FIGURA 106: INTERRUPTOR TERMOMAGNÉTICO MARCA SIEMENS, (A) IMAGEN REAL DEL DISPOSITIVO, (B) SIMBOLOGÍA DEL DISPOSITIVO SEGÚN NORMATIVA IEC. [47] .....	185
FIGURA 107: CURVA DE DISPARO TIPO C DEL MODELO 5SX1, SEGÚN LAS NORMAS EN 60 898, DIN VDE0641. [47] .....	186
FIGURA 108: INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO MARCA SCHNEIDER, (A) IMAGEN REAL DEL DISPOSITIVO, (B) SIMBOLOGÍA DEL DISPOSITIVO SEGÚN NORMATIVA IEC. [48] .....	187
FIGURA 109: ANEMÓMETRO Y VELETA MARCA DAVIS. [49].....	188
FIGURA 110: INSTALACIÓN DE ANEMÓMETRO Y VELETA, SUJETADA AL MÁSTIL QUE SUJETA AL GENERADOR. [46] .....	189
FIGURA 111: DIAGRAMA UNIFILAR DEL SISTEMA EÓLICO. [36] .....	197
FIGURA 112: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL SISTEMA EÓLICO. [36].....	198
FIGURA 113: DIAGRAMA DE CONEXIÓN DE SENSORES. [36] .....	199
FIGURA 114: VELOCIDAD DEL VIENTO EN LA REGIÓN DE EL SALVADOR. [52] .....	208

## ÍNDICE DE GRÁFICOS.

GRÁFICA 1: DEMANDA DE ENERGÍA EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE EL SALVADOR.[1] .....	10
GRÁFICA 2: DEMANDA DE ENERGÍA TRIENAL EN GWH EN EL SALVADOR.[1] .....	11
GRÁFICA 3: DEMANDA DE POTENCIA TRIENAL EN MW EN EL SALVADOR.[1] .....	12
GRÁFICA 4:A) CARACTERÍSTICA I-V DE UNA CELDA CON TEMPERATURA E IRRADIANCIA CONSTANTE. B) CARACTERÍSTICAS I-V DE UNA CELDA CON TEMPERATURA CONSTANTE Y DISTINTOS NIVELES DE IRRADIANCIA.[3] .....	23
GRÁFICA 5: VARIACIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA I-V CON LA TEMPERATURA.[3] .....	25
GRÁFICA 6: REPRESENTACIÓN DEL MODELO DE LA CELDA FOTOVOLTAICA.[4] .....	29
GRÁFICA 7: CURVA V VRS I DE UN PANEL FOTOVOLTAICO MOSTRANDO SU MPPT.[3].....	38
GRÁFICA 8: PROCESO DE CARGA DE UNA BATERÍA.[10] .....	41
GRÁFICA 9: PROCESO DE CARGA DE UNA BATERÍA DURANTE EL PROCESO DE ABSORCIÓN, DONDE SE PUEDE APRECIAR LOS PORCENTAJES DE CARGA DE CADA ETAPA. [10]. .....	42
GRÁFICA 10: DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL.[20].....	82
GRÁFICA 11: CURVA DE POTENCIA DE UN AEROGENERADOR.[20].....	84
GRÁFICA 12: TOMA DE MEDICIONES DE IRRADIACIÓN EL DÍA 18-08-2015.[32].....	148
GRÁFICA 13: TOMA DE DATOS DE UN DÍA SE PUEDE APRECIAR COMO EL PROMEDIO DE MEDICIONES DEL PLANO INCLINADO ES SUPERIOR AL VALOR DE IRRADIANCIA DEL PLANO HORIZONTAL.[32] .....	151
GRÁFICA 14: DATOS DE TENSIÓN ENTREGADA POR EL SFV EN UN DÍA PROMEDIO.[32].....	152
GRÁFICA 15: CORRIENTE SUMINISTRADA POR EL SISTEMA FV EN UN DÍA PROMEDIO.[32].....	153
GRÁFICA 16: CORRIENTE Y TENSIÓN DE UN DÍA PROMEDIO.[32].....	154
GRÁFICA 17: GRÁFICA DE POTENCIA DE UN DÍA POTENCIA, DONDE ADEMÁS SE PUEDE APRECIAR LOS VALORES MÁXIMOS DE MEDICIÓN.[32] .....	155
GRÁFICA 18: VALOR DE LA TENSIÓN DE LAS BATERÍAS Y LA CORRIENTE DE LAS MISMAS, EN UN DÍA PROMEDIO.[32] .....	156
GRÁFICA 19: POTENCIA DE LAS BATERÍAS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.[32].....	157
GRÁFICA 20: PROCESO DE CARGA DE UNA BATERÍA, DONDE SE PUEDE APRECIAR LAS 3 ETAPAS DEL PROCESO DE CARGA GENERADO POR EL CONTROLADOR DE CARGA.[32] .....	159
GRÁFICA 21: IRRADIANCIA DE UNA TARDE PROMEDIO CON NUBES.[44] .....	169
GRÁFICA 22: IRRADIANCIA DIARIA PROMEDIO.[44] .....	170
GRÁFICA 23: CURVAS PROMEDIOS DE TEMPERATURA.[44] .....	171
GRÁFICA 24: CURVAS PROMEDIOS DE TEMPERATURA VS IRRADIANCIA.[44].....	172
GRÁFICA 25: DENSIDAD DE PROBABILIDAD EXPERIMENTAL Y TEÓRICA.[21] .....	191
GRÁFICA 26: VARIACIÓN DEL VIENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO. [50] .....	200
GRÁFICA 27: ROSA DE LOS VIENTOS. ....	202
GRÁFICA 28: MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO. [50] .....	203
GRÁFICA 29: DENSIDAD DE PROBABILIDAD EXPERIMENTAL Y TEÓRICA. [50] .....	204
GRÁFICA 30: DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL. [50].....	205
GRÁFICA 31: CUANTIFICACIÓN DE LA ENERGÍA EN UN AÑO. [50] .....	206

## ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 1: RESUMEN DE LA DEMANDA DE ENERGÍA TRIENAL EN GWH EN EL SALVADOR.[1].....	11
TABLA 2: RESUMEN DE LA DEMANDA DE POTENCIA TRIENAL EN MW EN EL SALVADOR.[1] .....	13
TABLA 3: ESCALA DE CLASIFICACIÓN DEL VIENTO EN FUNCIÓN DE SU VELOCIDAD.[19].....	79
TABLA 4: IRRADIACIÓN SOLAR DIARIA EN EL SALVADOR EN CADA UNO DE LOS MESES DEL AÑO [25] .....	105
TABLA 5: RÉGIMEN DE VIENTOS EN EL SALVADOR.[19].....	106
TABLA 6: DEFINICIONES ESTÁNDAR DE CLASES DE VIENTO.[19].....	107
TABLA 7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO SEGÚN EL FABRICANTE.[28] .....	120
TABLA 8: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CONTROLADOR DE CARGA SEGÚN EL FABRICANTE.[29] .....	130
TABLA 9.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL AJUSTE DE CONTROL DE CARGA, SEGÚN EL FABRICANTE.[29] .	130
TABLA 10.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL INVERSOR DE POTENCIA SEGÚN EL FABRICANTE.[32] .....	134
TABLA 11. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL CONTACTORSEGÚN EL FABRICANTE.[34] .....	135
TABLA 12. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FUSIBLE SEGÚN EL FABRICANTE.[35].....	136
TABLA 13.ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PORTAFUSIBLESEGÚN EL FABRICANTE.[35].....	138
TABLA 14:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE. ....	139
TABLA 15:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE. ....	140
TABLA 16: DE ANÁLISIS DE LA CURVA DE IRRADIANCIA SOLAR EN UN DÍA PROMEDIO, SE PUEDEN OBSERVAR LOS DATOS DEL PROMEDIO DE LAS MEDICIONES DE IRRADIANCIA PARA CADA UNO DE LOS DÍAS.[32] .....	150
TABLA 17: RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DEL TERMOTANQUE.[41] .....	162
TABLA 18: RESUMEN DE CARACTERÍSTICAS DEL COLECTOR SOLAR PLANO.[41] .....	163
TABLA 19: TIPOS DE TERMOPARES Y RANGO DE TEMPERATURA SOPORTADA. [42].....	165
TABLA 20:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE. ....	180
TABLA 21:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE. ....	183
TABLA 22:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE.[47].....	185
TABLA 23:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE. ....	187
TABLA 24:DETALLE DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, SEGÚN FABRICANTE.[49].....	188
TABLA 25:FRECUENCIA DE ORIENTACIONES DEL VIENTO.[51].....	201
TABLA 26:FRECUENCIA DE MEDICIONES DE VELOCIDAD DEL VIENTO.[51] .....	203
TABLA 27:CALCULO DE LA DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL EN BASE A FRECUENCIA DE MEDICIONES DE VELOCIDAD.[51] .....	204

## ÍNDICE DE ECUACIONES.

ECUACIÓN 1: MODELO SHOCKLEY. [3] .....	19
ECUACIÓN 2: CORRIENTE DE ILUMINACIÓN. [3].....	22
ECUACIÓN 3: CORRIENTE DE OSCURIDAD. [3].....	22
ECUACIÓN 4: CARACTERÍSTICA I-V DE LA CELDA FOTOVOLTAICA. [3].....	22
ECUACIÓN 5: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DE CORTOCIRCUITO CON LA TEMPERATURA. [3] .....	24
ECUACIÓN 6: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO CON LA TEMPERATURA. [3] .....	24
ECUACIÓN 7: COEFICIENTE DE VARIACIÓN DE LA POTENCIA MÁXIMA CON LA TEMPERATURA. [3] .....	25
ECUACIÓN 8: FACTOR DE FORMA. [3] .....	27
ECUACIÓN 9: EFICIENCIA DE CONVERSIÓN ENERGÉTICA. [3] .....	27
ECUACIÓN 10: MODELO DE LA CÉLULA FOTOVOLTAICA. [3] .....	28
ECUACIÓN 11: BALANCE ENERGÉTICO. [18].....	70
ECUACIÓN 12: CALOR ÚTIL QUE SE TRANSFIERE AL FLUIDO. [16].....	71
ECUACIÓN 13: ENERGÍA SOLAR INCIDENTE. [18].....	71
ECUACIÓN 14: PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE CORRIENTE EN PRUEBAS. [4] .....	116
ECUACIÓN 15: PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE TENSIÓN EN PRUEBAS. [4] .....	116
ECUACIÓN 16: RESISTENCIA SERIE INTERNA DEL MÓDULO FOTOVOLTAICO. [4] .....	117
ECUACIÓN 17: CORRIENTE DE CONVERSIÓN MEDIANTE EFECTO SHUNT PARA MEDICIÓN. [2] .....	146
ECUACIÓN 18: DECLINACIÓN SOLAR. [3].....	167
ECUACIÓN 19: ALTURA SOLAR. [3] .....	167
ECUACIÓN 20: ÁNGULO ACIMUTAL. [3] .....	167
ECUACIÓN 21: IRRADIANCIA GLOBAL. [3] .....	168
ECUACIÓN 22: ÁNGULO DE INCIDENCIA SOLAR. [3] .....	168
ECUACIÓN 23: CONSTANTE DE CALIBRACIÓN. [3].....	168
ECUACIÓN 24: IRRADIANCIA DIRECTA. [3] .....	169
ECUACIÓN 25: CAUDAL. [46] .....	173
ECUACIÓN 26: CANTIDAD DE CALOR. [3] .....	174
ECUACIÓN 27: POTENCIA CALORÍFICA. [3] .....	175
ECUACIÓN 28: FUNCIÓN DE DENSIDAD DE WEIBULL DE DOS PARÁMETROS. [22].....	192
ECUACIÓN 29: PROBABILIDAD DE QUE LA VELOCIDAD SEA SUPERIOR A CIERTO VALOR. [22] .....	193
ECUACIÓN 30: PROBABILIDAD DE QUE LA VELOCIDAD SEA SUPERIOR A CIERTO VALOR. [22] .....	193
ECUACIÓN 31: PROBABILIDAD DE QUE LA VELOCIDAD ESTE COMPRENDIDA ENTRE DOS VALORES. [22] ....	193
ECUACIÓN 32: FACTOR DE FORMA, PARÁMETRO DE LA FUNCIÓN DE WEIBULL. [22] .....	193
ECUACIÓN 33: FACTOR DE ESCALA, PARÁMETRO DE LA FUNCIÓN DE WEIBULL. [22].....	194
ECUACIÓN 34: VELOCIDAD PROMEDIO. [22].....	194
ECUACIÓN 35: ECUACIÓN DE DESVIACIÓN TÍPICA MUESTRAL. [22] .....	194
ECUACIÓN 36: POTENCIA EÓLICA. [22] .....	194
ECUACIÓN 37: DENSIDAD DE POTENCIA EÓLICA. [22].....	195
ECUACIÓN 38: VELOCIDAD PROMEDIO ELEVADA AL CUBO. [22].....	195
ECUACIÓN 39: DENSIDAD DE ENERGÍA EÓLICA. [22].....	205

## GLOSARIO.

Agua caliente sanitaria: Aplicación focalizada principalmente para el ámbito doméstico mediante su almacenamiento en un termotanque.

Captadores planos: Nombre común para captador solar empleado en aplicaciones de calentar agua sanitaria, y su función es la de capturar la mayor cantidad de energía en forma de radiación solar y disminuir las pérdidas térmicas.

Coefficiente de potencia: Mide la eficiencia con la que el aerogenerador convierte la energía eólica en electricidad. Se obtiene dividiendo la potencia eléctrica disponible entre la potencia eólica de entrada.

Curva de potencia: La curva de potencia de un aerogenerador se lee mediante un gráfico que indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el aerogenerador a diferentes velocidades del viento. Las curvas de potencia se obtienen a partir de medidas de campo.

Densidad de potencia: Calcula la distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento. Se obtiene multiplicando la potencia de cada velocidad del viento por la probabilidad del viento de la gráfica de Weibull.

Densidad del aire: La energía cinética del viento depende de la densidad del aire, es decir, de su masa por unidad de volumen, esto es, cuanto "más pesado" sea el aire más energía recibirá la turbina.

Factor de carga: Para conocer la producción anual de energía de un aerogenerador se divide la producción anual de energía entre la producción teórica máxima, si la máquina estuviera funcionando a su potencia nominal (máxima) durante las 8766 horas del año. Este factor suele rondar el 20 o 30%.

Factor de forma: también llamado factor de llenado, es un concepto teórico que ayuda a definir la curva característica I-V.

Generación Termosolar: Generación de Energía Eléctrica en base a Energía Solar Térmica.

Horas Sol Pico: Representa el tiempo en horas diarias con una radiación equivalente de 1,000 Watts/m<sup>2</sup>.

Irradiancia: Es la magnitud usada para describir la potencia incidente por una unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Sus unidades en el sistema internacional son W/m<sup>2</sup>.

Jumper: Es un elemento que permite interconectar dos terminales de manera temporal sin tener que efectuar una operación que requiera una herramienta adicional.

Modulo fotovoltaico Monocristalino: Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza.

Modulo fotovoltaico Policristalino: Basados en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales.

MOSFET: Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor, es un transistor utilizado para amplificar o conmutar señales electrónicas. Es el transistor más utilizado en la industria microelectrónica.

Pala: Elemento del aerogenerador que por aprovechamiento aerodinámico transforma la energía cinética del viento en energía mecánica en el eje del generador.

Rosa de vientos: Gráfico que representa la frecuencia con la que se produce la velocidad de viento en las distintas direcciones.

Semiconductor: Material que se comportan como aislante a bajas temperaturas y como conductor cuando se les proporciona energía o calor. La mayoría de estas células son de silicio.

Termotanque: Almacenador de fluido principalmente agua para mantener una temperatura constante la mayor cantidad del tiempo y evitando así cualquier pérdida térmica.

Torre: Soporta la góndola y el rotor. Es mejor cuanto más alta ya que a mayor altura mayores velocidades de viento. Las torres pueden ser tubulares (más seguras) o, de celosía (más baratas).

Veleta: Es utilizada para medir la dirección del viento, envía sus señales al controlador electrónico de forma que éste pueda girar el aerogenerador en contra del viento utilizando el mecanismo de orientación.

## ACRÓNIMOS.

CNE: Consejo Nacional de Energía.

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

FIA: Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

MARN: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

MPPT: Maximum power point tracking o seguimiento de punto de máxima potencia.

PBI: Producto Interno Bruto.

SIGET: Súper Intendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones.

RMS: En electricidad y electrónica, es el valor cuadrático medio (en inglés root mean square, abreviado RMS o rms) o valor eficaz.

SWERA: Solar and Wind Energy Resource Assessment, programa con el fin de proporcionar datos sobre recursos renovables de fácil acceso.

UES: Universidad de El Salvador.

VRLA: Valve Regulated Lead Acid battery o batería de ácido-plomo regulada por válvula.

ASTM: American Society for Testing Materials, Normativas.

IEC: International Electrotechnical Commission, Normativas.

## INTRODUCCIÓN GENERAL.

El siguiente documento que lleva por nombre “Diseño e Implementación del laboratorio de energías renovables para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura” ha sido diseñado con el fin de dar a conocer sobre el tema y la importancia de las energías renovables, y es que hoy en día son muchos países que cuentan con este tipo de generación eléctrica a gran escala y El Salvador no debe quedarse atrás, pero, ¿Qué son las energías renovables?, es una pregunta que muchas personas se están haciendo, la respuesta a esta pregunta es la siguiente: Las energías renovables son las energías que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales, entre las energías renovables se cuentan la eólica, geotérmica, hidroeléctrica, mareomotriz, solar, entre otras.

En este caso, se implementará un laboratorio de energías renovables en la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, y se estará trabajando con tres de las energías renovables anteriormente mencionadas, estas son: Energía Solar Fotovoltaica, Energía Solar Térmica y Energía Eólica.

Los sistemas solares fotovoltaicos tienen la capacidad de convertir directamente la energía que provee el sol en forma de radiación, en energía eléctrica, el elemento esencial de los generadores fotovoltaicos son las células solares construidas en base a semiconductores.

Mientras que el principio básico o elemental de la energía solar térmica es la de aprovechar la radiación del sol para transformarla en calor, o dicho de otra forma, será el de tomar la incidencia de los rayos solares para calentar un fluido que, por lo general, suele ser agua o aire

Finalmente, en la energía eólica se está hablando de la generación a través de la energía producida a partir del viento, un recurso que es gratis y sobre todo inagotable, y que proviene principalmente de las diferencias de presión y temperatura que influyen en la formación de las corrientes de aire.

El diseño del laboratorio de energías renovables está constituido por mesas de trabajo para la realización de prácticas de laboratorios, para los futuros profesionales que se formarán en las carreras de Ingeniería Eléctrica, Mecánica, Industrial y ramas afines, además, contará con diagramas de conexión de controladores de carga, inversores, sensores y equipo de medición y almacenamiento de datos para las áreas solar fotovoltaica, solar térmica y eólica.

Para llevar a cabo su implementación se instalará un anemómetro de copas y veleta, para la medición de velocidad y dirección de viento, el cual se colocará a la misma altura que el aerogenerador de 400W que ya se encuentra instalado en dicho lugar, y se sujetará al mástil de éste.

Además del anemómetro, se instalarán dos paneles fotovoltaicos de 100W cada uno, en una estructura metálica de montaje ubicado en dicho lugar, que contará con la instalación de su respectivo banco de baterías. Otro punto importante es que se contará con la instalación de dos piranómetros en la estructura de montaje de paneles fotovoltaicos para realizar la medición de irradiación solar en el plano horizontal y en el plano inclinado de los paneles fotovoltaicos.

Se realizará la instalación de circuitos eléctricos para los diversos equipos a implementar en el laboratorio, instalación de controladores de carga e inversores para los sistemas fotovoltaico y eólico, instalación de un Data Logger modelo 2700, marca KEITHLEY para la obtención de datos para el Sistema Solar Fotovoltaico, Solar Térmico y Sistema Eólico a utilizar.

Además, se contará con la Instalación de válvulas para el Agua Caliente Sanitaria (ACS) y la instalación de sensores de temperatura para registrar la temperatura de chasis de los calentadores solares térmicos.

En lo que respecta a la caracterización del equipo a instalar, se harán diferentes mediciones para obtener curvas de caracterización de paneles solares fotovoltaicos, aerogenerador, controladores de carga e inversores de ambos equipos.

Se espera que el documento sea del agrado del lector y que lo incentive a sumergirse de lleno en el mundo de las energías renovables, ya que es un tema que en la actualidad se está desarrollando en El Salvador, y se espera que en un futuro se logre obtener una generación de electricidad sostenible en el país, en cuanto a estos recursos se refiere.

## OBJETIVOS

### GENERAL:

- Implementar un laboratorio de Energías Renovables en la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, para desarrollos de prácticas de laboratorio en el uso de energía solar fotovoltaica, solar térmica y eólica.

### ESPECÍFICOS

- Acondicionar el espacio previsto como local del laboratorio de Energías Renovables para un óptimo funcionamiento de las prácticas.
- Instalar el equipo necesario para implementar el laboratorio de Energías Renovables y que se desarrollen las prácticas de forma óptima.
- Obtener un registro de datos por medio de un Data Logger 2700, marca KEITHLEY, con los cuales se realizarán curvas de operación de los diferentes sistemas de energías renovables.

## ALCANCES

El proyecto de trabajo de graduación como ya se mencionó tiene como objetivo principal el de Implementar un laboratorio de Energía Renovables en la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, y que quede completamente funcional para desarrollos de prácticas en dicho ámbito; además se obtendrán manuales de caracterización del equipo a utilizar en las prácticas de laboratorio.

## ANTECEDENTES

Las energías renovables han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde tiempos remotos, especialmente la solar, la eólica y la hidráulica. Los molinos de viento o de agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar la del sol, etc.

Hacia la década de los años 70 las energías renovables se consideraron una alternativa a las energías tradicionales, tanto por su disponibilidad presente y futura garantizada como por su menor impacto ambiental en el caso de las energías limpias.

Actualmente en El Salvador se realizan estudios, investigaciones y desarrollos de estos tipos de energía, en comparación con otros países desarrollados donde ya muchas de estas energías dejaron de ser una alternativa y pasaron a ser una realidad.

En la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador se han desarrollado investigaciones y estudios de cómo aprovechar los recursos naturales existentes en el país con algunas de estas energías.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador está formando futuros profesionales con conocimientos y aptitudes en el área de Energías Renovables, pero no se cuenta con instalaciones adecuadas para el desarrollo de prácticas de laboratorio. Además no se posee manuales de caracterización de los diversos equipos a implementar.

## JUSTIFICACIÓN

En El Salvador las energías renovables están tomando un papel importante ya que se están desarrollando diferentes estudios y proyectos en dichas áreas, de ello radica la necesidad de contar con profesionales capacitados en la manipulación de instrumentos y equipos de Energías Renovables. Es por ello que en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador en su labor de formar futuros profesionales altamente capacitados, se debe de contar con un laboratorio en condiciones óptimas para el desarrollo formativo de dichos profesionales en el área de Energías Renovables.

## CAPÍTULO I: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1. SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL.

#### 1.1.1. Consumo Energético de El Salvador.

El aspecto más relevante que se ve influenciado en el incremento del consumo energético de un país, es el crecimiento poblacional, lo cual debería verse en la producción nacional, es decir, que un aumento en la población supone un incremento en el consumo energético debido a que son más el número de personas que requieren de servicios energéticos que les permitan satisfacer sus necesidades, además que, con un aumento en el producto nacional, hay un incremento en el número de empresas y de la producción de las empresas ya existentes, de manera que todos los sectores productivos en el país requieren de mayores niveles de consumo de energía para dinamizar la actividad económica.

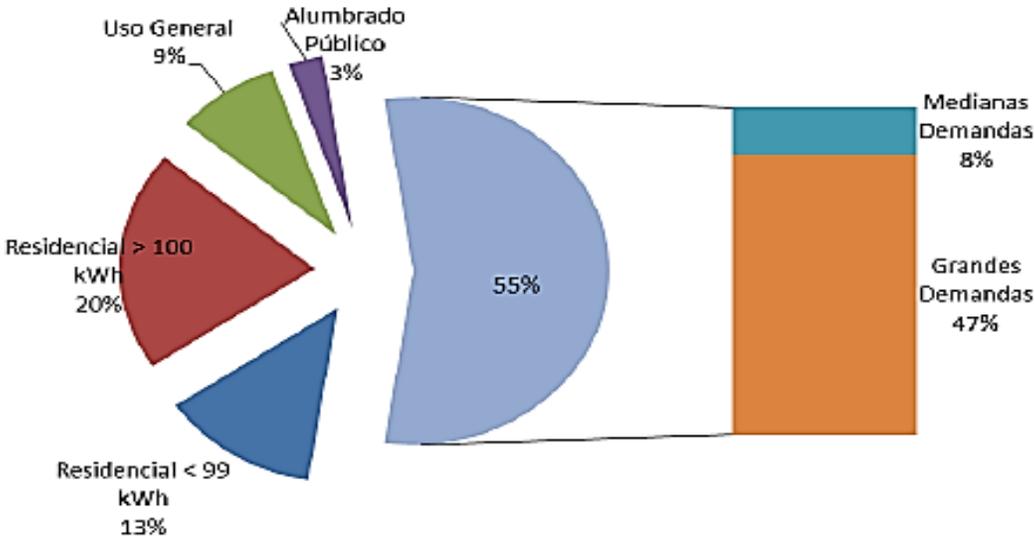
#### 1.1.2. Estadísticas.

Una vista al periodo comprendido entre 1990-2007 según datos de IEA en el 2009, se puede verificar una tendencia creciente en el consumo total de energía, con una tasa de crecimiento promedio anual de 3.28%, la tasa de crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB), es igual a 3.9%, y la tasa de crecimiento poblacional a 0.8%. En base a los indicadores anteriores se puede señalar que durante ese periodo, la producción nacional está creciendo a un mayor ritmo que el consumo total de energía y que la tasa de crecimiento poblacional, esto se puede confirmar con las estadísticas de la CEPAL, donde se pudo tomar que en 1990, por cada millón de dólares de Producto Interno Bruto nacional, se requirió el equivalente a 1,670 barriles de petróleo para producirlos, y que para el año 2007, dichos requerimientos se habían reducido a 1,500 barriles de petróleo. De estas estadísticas se puede concluir que en la producción nacional ha disminuido los requerimientos de energía en 170 barriles en 17 años.

Según datos de la CEPAL, el consumo de energía eléctrica per cápita en el país pasó de 495.08 kW/h en 1996, a 613.22 kW/h en el año 2006, experimentando un incremento de 24% en un lapso de diez años.

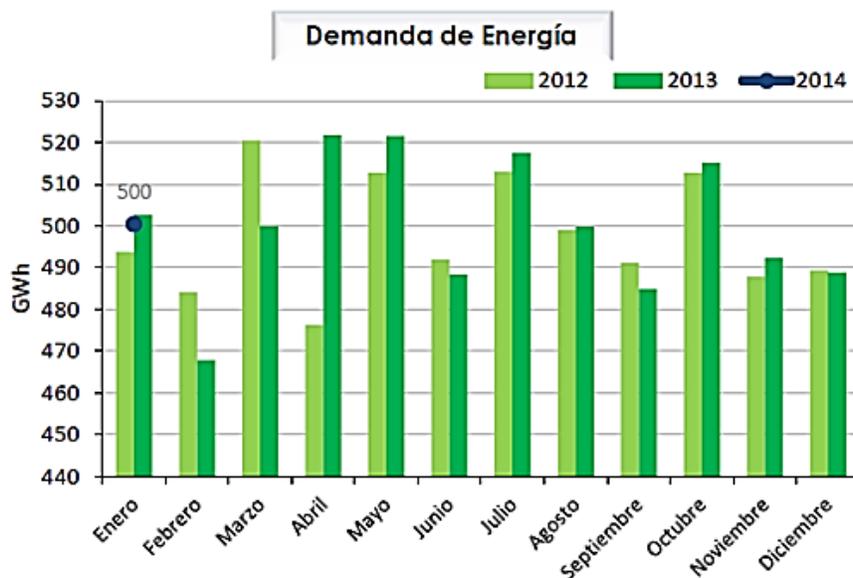
Ahora bien, según datos de la Súper Intendencia General de Electricidad y Telecomunicaciones (SIGET), en su informe anual de 2014, informa que el consumo final de energía eléctrica registrado en ese año de acuerdo a los datos de las empresas distribuidoras fue de 6,173.7GWh, volumen que refleja un crecimiento de 1.3 % respecto a la demanda final registrada en el año 2013, que ascendió a 6,095.3GWh.

De los datos anteriores, se ha dividido la demanda a partir de las categorías tarifarias como se puede ver en la Gráfica 1, tomado de Informe anual 2014 de la SIGET, donde se destaca que la mayor proporción es consumida por las grandes demandas con un valor del 47.0%, el segundo lugar lo ocupa la demanda residencial con el 33.0%. Por su parte, la demanda para uso general representa el 9.0%, las medianas demandas el 8.0% y alumbrado público el 3.0%.



Gráfica 1: Demanda de Energía en el Sistema de Distribución de El Salvador. [1]

En la Gráfica 2, se muestran las variaciones de la demanda de energía de los datos del Consejo Nacional de Energía (CNE) en su reporte hasta enero 2014 en donde se ve un incremento de 38GWh de los años de 2012 a 2013 y se sintetiza en la Tabla 1.

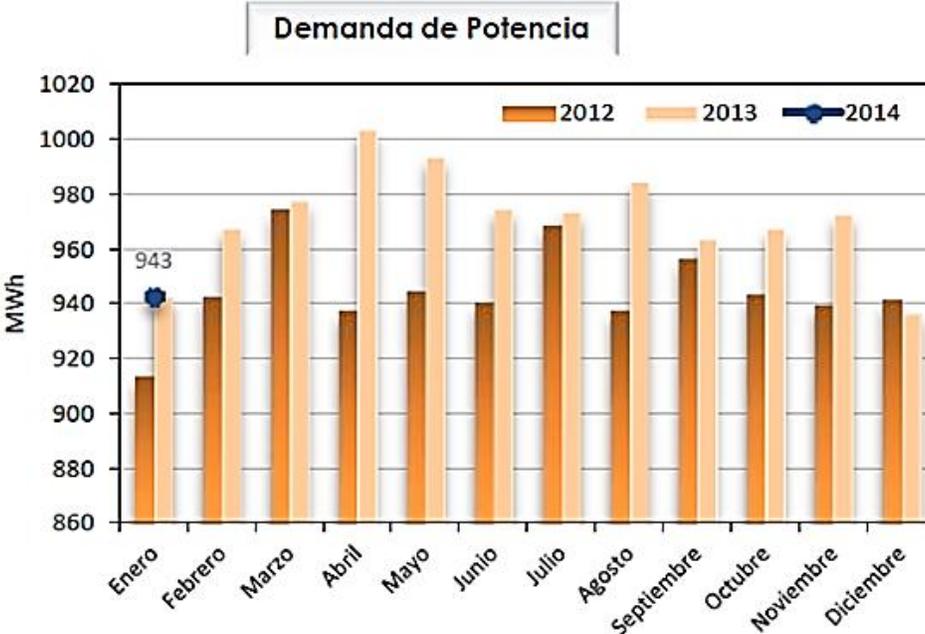


Gráfica 2: Demanda de energía trienal en GWh en El Salvador.[1]

[GWh]	Mes	2012	2013	2014	Variación
	Enero	494	503	500	-0.5%
	Febrero	484	468		-
	Marzo	520	500		-
	Abril	476	522		-
	Mayo	513	522		-
	Junio	492	488		-
	Julio	513	517		-
	Agosto	499	500		-
	Septiembre	491	485		-
	Octubre	513	515		-
	Noviembre	488	492		-
	Diciembre	489	489		-
	Total	5,972	6,000	500	-

Tabla 1: Resumen de la demanda de energía trienal en GWh en El Salvador.[1]

Además, tomando el mismo trienio de referencia, se muestra como ha variado el consumo de potencia hasta enero de 2014. En la Gráfica 3, tomada de los datos del Consejo Nacional de Energía (CNE) en su reporte hasta enero 2014, se muestra dicha variación y se muestra más detalladamente en la Tabla 2 donde se aprecia un incremento de 29MWh, en 2013 sobre 2012, y para enero 2014 se puede apreciar que no existe ningún cambio en respecto a enero 2013.



Gráfica 3: Demanda de potencia trienal en MW en El Salvador.[1]

[MW]

Mes	2012	2013	2014	Variación
Enero	914	943	943	0.0%
Febrero	943	968		-
Marzo	975	978		-
Abril	938	1,004		-
Mayo	945	994		-
Junio	941	975		-
Julio	969	974		-
Agosto	938	985		-
Septiembre	957	964		-
Octubre	944	968		-
Noviembre	940	973		-
Diciembre	942	937		-
Total	975	1004	943	-

Tabla 2: Resumen de la demanda de potencia trienal en MW en El Salvador.[1]

## 1.2. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.

### 1.2.1. Principios Físicos de la Conversión Fotovoltaica.

Los sistemas fotovoltaicos tienen la capacidad de convertir directamente la energía que provee el sol en forma de radiación en energía eléctrica. El elemento esencial de los generadores fotovoltaicos son las células solares construidas en base a semiconductores. Para comprender el funcionamiento de las células resulta conveniente conocer conceptos básicos sobre los semiconductores, a continuación se realiza una revisión de estos conceptos.

### 1.2.2. Semiconductores.

Algunos investigadores como Becquerel en 1839 observaron que ciertos materiales, al ser expuestos a la luz, producían una corriente eléctrica, este principio es conocido hoy en día como efecto fotovoltaico y es la base del funcionamiento de las células solares. Tales

células están fabricadas con materiales semiconductores, es decir, materiales que se comportan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se les proporciona energía o calor. La mayoría de estas células son de silicio.

Modelo de enlaces.

El modelo de enlaces utiliza los enlaces covalentes que unen los átomos de silicio para describir el comportamiento de los semiconductores, los átomos de silicio contienen en su última capa cuatro electrones, que, cuando se combinan entre sí, tienden a formar cristales, de tal forma que un átomo queda unido a otros cuatro compartiendo con cada uno de los mismos un par de electrones en lo que se denomina enlace covalente, de esta manera completa el número de ocho electrones en su último nivel como el mostrado en la Figura 1, así se conforma una red cristalina muy estable.

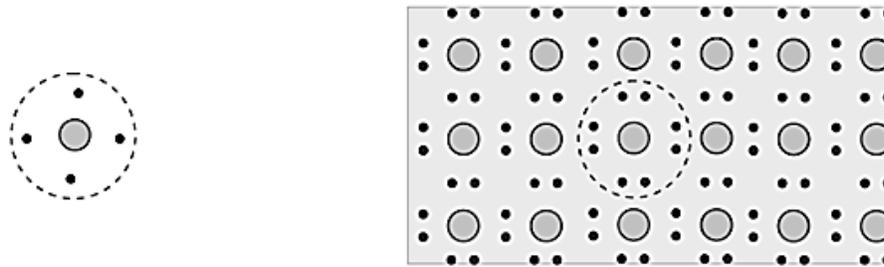


Figura 1: Representación esquemática de un átomo de silicio con sus electrones de valencia (izquierda) y del cristal generado por enlaces covalentes (derecha).[2]

A bajas temperaturas, los enlaces están intactos y el silicio se comporta como un aislante, como se puede ver en la Figura 2 a) a altas temperaturas; se rompen algunos de los enlaces como se observa en la Figura 2 b) y la conducción puede ocurrir debido a dos causas:

- Electrones de los enlaces rotos que se muevan libremente.
- Electrones de los enlaces próximos al enlace roto pueden moverse al hueco creado, permitiendo la propagación de dicho hueco como una carga positiva.

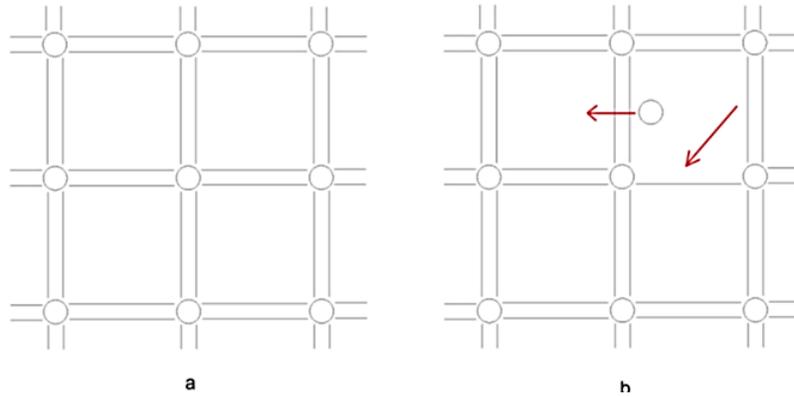


Figura 2: Modelo de enlaces: a) a baja temperatura, b) a alta temperatura.[2]

Modelo de bandas.

Este modelo detalla el comportamiento de un material semiconductor en términos de los niveles de energía entre la banda de valencia y la banda de conducción y se esquematiza en la Figura 3.

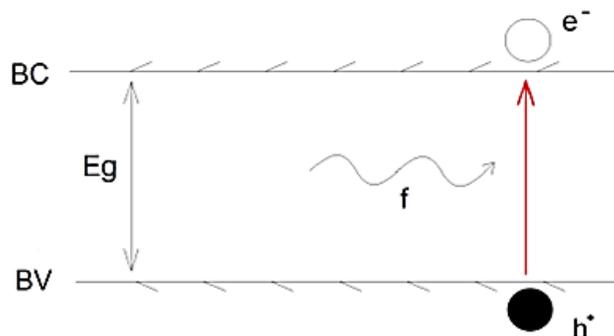


Figura 3: Modelo de bandas.[2]

De la Figura 3, los electrones en los enlaces covalentes tienen la energía correspondiente a la banda de valencia (BV) mientras que en la banda de conducción (BC), los electrones están libres. La banda prohibida corresponde a la energía necesaria ( $E_g$ ) para que un electrón de un enlace covalente pase a la banda de conducción, donde puede conducir una corriente. Los huecos que se crean en la banda de valencia conducen en la dirección contraria, tal y como se describe en el modelo de enlaces.

En la Figura 4 a) se puede observar que al liberarse un electrón y pasar a la banda de conducción como se muestra el punto rojo, se genera un hueco en el átomo denominado "A", el cual queda cargado positivamente. En la Figura 4 b) se puede observar el desplazamiento de huecos entre átomos el cual el átomo "B" cedió un electrón al átomo "A" que poseía un hueco, lo cual genera un hueco en el átomo "B".

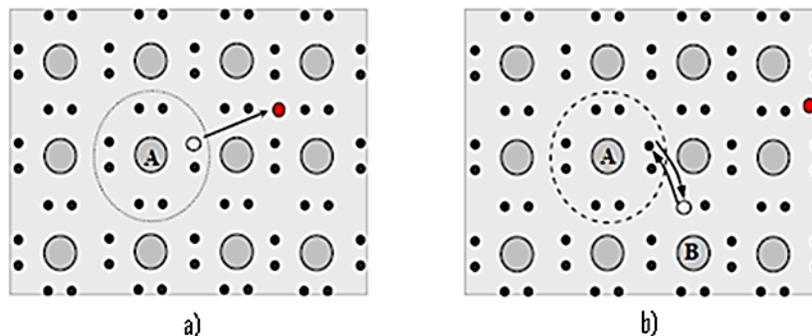


Figura 4: a) Liberación de un electrón y pasar a la banda de conducción, se genera un hueco, b) desplazamiento de huecos entre átomos.[2]

### 1.2.3. Dopado de semiconductores.

Cuando en una red de átomos de silicio, se insertan átomos de otro elemento con cinco electrones en su último nivel, se producen los mismos enlaces covalentes, el quinto electrón de este átomo queda ligado débilmente al mismo y es posible que se libere, pasando al nivel de conducción, con un aporte energético inferior al requerido por los

electrones intrínsecos. A estos átomos se los denominan impurezas y los electrones que liberan se les denominan electrones extrínsecos.

Si como impurezas se insertan átomos con tres electrones en su último nivel, se producen los mismos enlaces covalentes pero para completar ocho electrones el átomo tiende a captar un electrón adicional, comportándose como un semiconductor donde las cargas en movimiento son positivas (huecos) por eso se lo denomina semiconductor del tipo P, ambos casos se muestran en la Figura 5 donde se aprecia el dopado de los semiconductores.

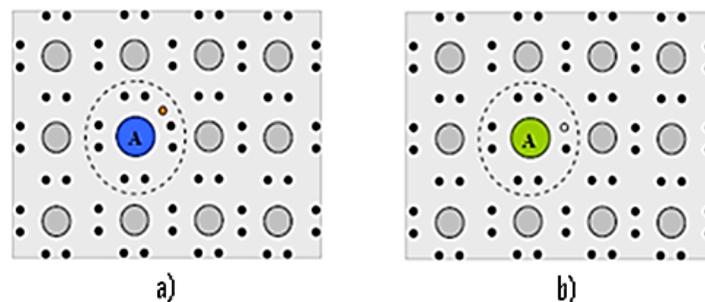


Figura 5: a) Dopado de cristales semiconductores del tipo N con impurezas, de 5 electrones en su nivel de valencia. b) cristales tipo P con impurezas con tres electrones en su último nivel.[2]

La unión PN.

La unión PN o junción PN se crea al juntar materiales semiconductores tipo P (gran cantidad de huecos) y tipo N (gran cantidad de electrones). Como es mostrado en la Figura 6.

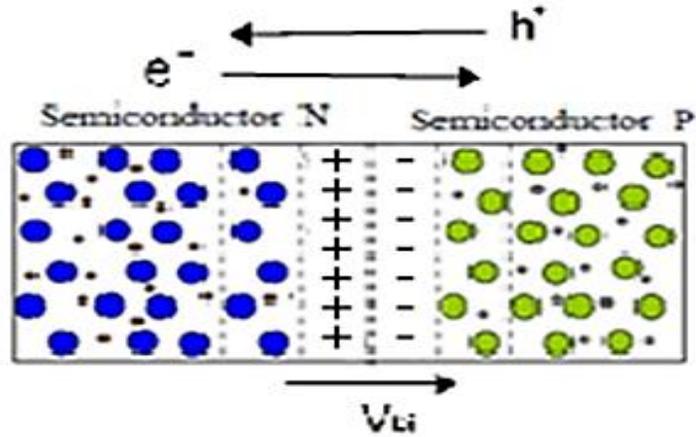


Figura 6: Unión PN.[2]

Al juntar estos materiales tipo P y tipo N, los huecos en exceso del material tipo P fluyen por difusión hacia el material tipo N. Análogamente, los electrones en exceso del material tipo N fluyen hacia el material tipo P.

Esto crea un campo eléctrico y el correspondiente potencial de contacto  $v_{bi}$ , en la zona de carga de espacio, para frenar la corriente, devolviendo los huecos y los electrones en exceso a sus regiones de partida. Si se aplica un voltaje a la unión con la polaridad adecuada como se muestra en la Figura 7, se consigue reducir el efecto del campo eléctrico. En este punto, el campo eléctrico ya no es capaz de parar la fluctuación de electrones y huecos, con lo que se genera una corriente eléctrica.

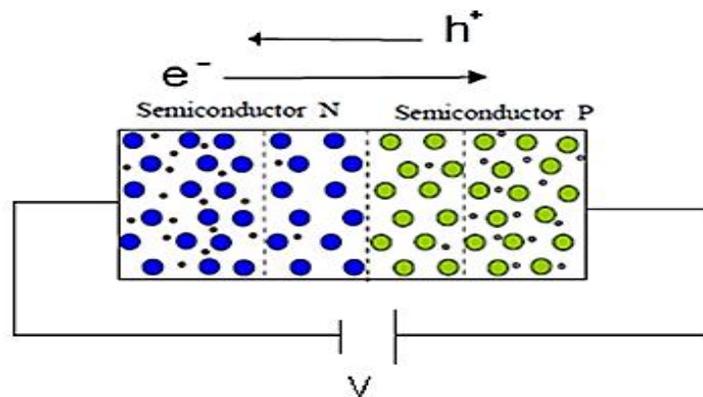


Figura 7: Aplicación de voltaje en unión PN.[2]

El potencial se reduce en  $v - v_{bi}$  y la corriente eléctrica aumenta exponencialmente con el voltaje aplicado, según queda determinado por el modelo matemático de Shockley. (Ecuación 1)

$$I = I_S \left( e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) = I_D$$

Ecuación 1: Modelo Shockley.[3]

La corriente Fotogenerada.

Cuando la luz incide en un material semiconductor, los fotones con energía inferior a la energía de la banda prohibida interactúan débilmente con el semiconductor, pasando a través de éste como si fuera transparente. En cambio, los fotones con energía superior a la energía de la banda prohibida, interactúan con los electrones de los enlaces covalentes, usando dicha energía para romper estos enlaces y crear las parejas electrón-hueco que se moverán libremente, a estos electrones y huecos se les denomina portadores.

No todos los fotones que inciden sobre la celda solar son absorbidos para generar un par electrón hueco, parte de los fotones se reflejan en la superficie de la celda ya sea en el cristal o en la grilla colectora de corriente (pérdidas por reflexión). Existen electrones con menor energía que "Eg" que pueden ser transmitidos o absorbidos por el material pero su absorción se ve reflejada en fenómenos de calentamiento térmico y no en la generación de un par e/h (pérdidas por no absorción).

Recombinación.

En ausencia de luz, el sistema debe retornar al estado de equilibrio y por tanto, las parejas electrón-hueco deben desaparecer. Sin una fuente de energía externa, los electrones y los huecos se mueven hasta encontrarse y recombinarse. Las impurezas o los defectos, tanto dentro como en la superficie del semiconductor, contribuyen a que se dé dicha recombinación.

Algunos de los parámetros importantes relacionados con la recombinación, son el tiempo de vida, que es el tiempo desde que se genera una pareja electrón-hueco hasta que éstos se recombinan de nuevo y la longitud de difusión, que es la distancia media recorrida por el portador desde el punto en que se genera hasta que se recombina. Estos valores determinan la calidad y la conveniencia del material para ser utilizado en células solares.

#### 1.2.4. Célula fotovoltaica.

Las células fotovoltaicas, también conocidas como células solares, su aplicación principal es obtener energía del sol y son los dispositivos que permiten la conversión de la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones), mediante lo que se conoce como efecto fotovoltaico, como se muestra en la Figura 8.

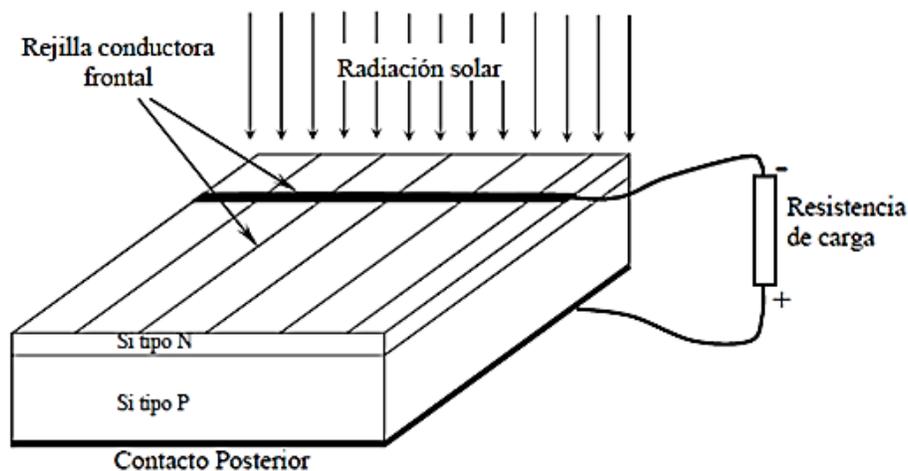


Figura 8: Principio de célula fotovoltaica.[3]

Cuando incide luz sobre una oblea de semiconductor con una unión PN, los fotones que ingresan al material con energía igual o superior a la del gap, se absorben en el espesor del semiconductor generando pares electrón-hueco que se pueden mover como portadores libres y son impulsados por la diferencia de potencial del semiconductor

generada por el campo eléctrico debido a la unión PN, la corriente que se produce de esta manera, es llamada corriente fotogenerada " $I_{ph}$ ". Por otra parte, la corriente produce en la carga una diferencia de potencial, como se muestra en la Figura 9, esta diferencia de potencial favorece la recombinación de los pares electrón-hueco, fenómeno común a todos semiconductores aún en condiciones de oscuridad. Se puede modelar este efecto por una corriente que se produce en el sentido inverso a la corriente fotogenerada, generalmente llamada corriente de oscuridad o corriente del diodo por ser típica de estos dispositivos. De esta manera se puede modelar la celda fotovoltaica como la superposición lineal de dos efectos, por un lado una corriente fotogenerada, proporcional a la radiación incidente sobre la celda ( $I_L$ ), y por otro lado la corriente de oscuridad o corriente del diodo  $I_D(V)$  que es proporcional a la tensión en los extremos de la celda. De esta forma se puede expresar la corriente de una celda fotovoltaica.

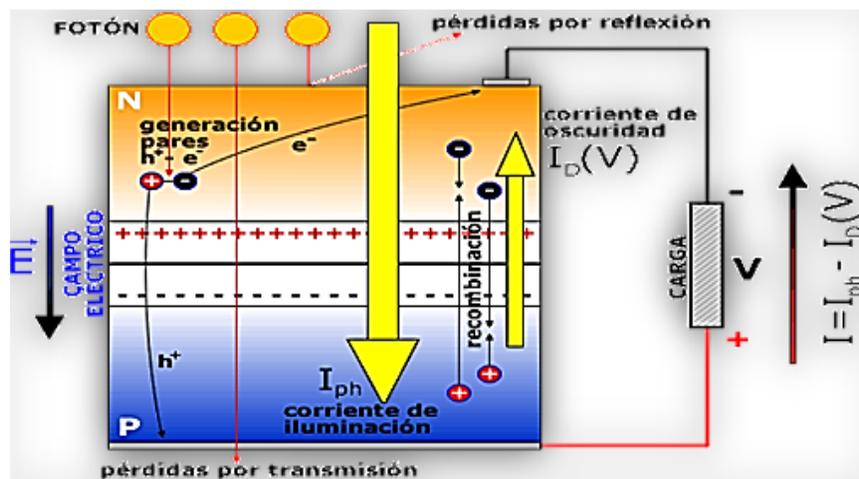


Figura 9: Representación de las corrientes.[4]

La corriente entregada por la celda tiene dos componentes, los cuales son:

Corriente de iluminación,  $I_{ph}$  producida por la luz, y la corriente de oscuridad,  $I_D$  debida a la recombinación de portadores.

Dónde:

$e$ : Carga electrón  $1.6021 \times 10^{-19}$  C.

$K$ : Es la constante de Boltzman.

$T_c$ : Temperatura en K de la celda.

$I_o$ : Corriente inversa de saturación.

$$I_{ph} = I_L$$

Ecuación 2: Corriente de iluminación.[3]

$$I_D(V) = I_o \left[ \exp \frac{e*V}{K*T_c} - 1 \right]$$

Ecuación 3: Corriente de oscuridad.[3]

$$I = I_L - I_o \left[ \exp \frac{e*V}{K*T_c} - 1 \right] = I_L - I_D(V)$$

Ecuación 4: Característica I-V de la celda fotovoltaica.[3]

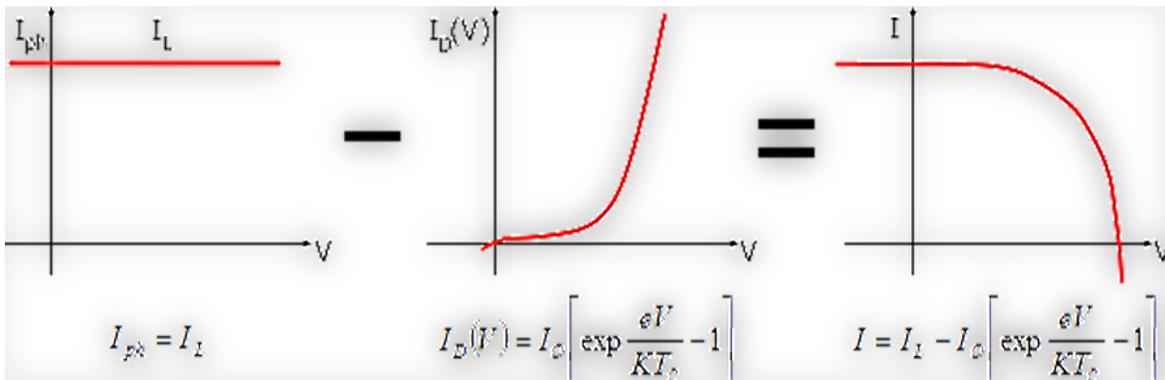


Figura 10 : Estructura de la corriente de la célula.[4]

#### 1.2.5. Característica I-V de la celda fotovoltaica-Parámetros característicos.

Si se armase un circuito sencillo de una celda fotovoltaica a una temperatura estabilizada, es decir, a temperatura constante, y que pueda recibir distintos niveles de irradiancia, dicha celda se encuentra unida a una resistencia variable como el mostrado en la Figura 11, se arma con el fin de obtener la medición de su curva característica.

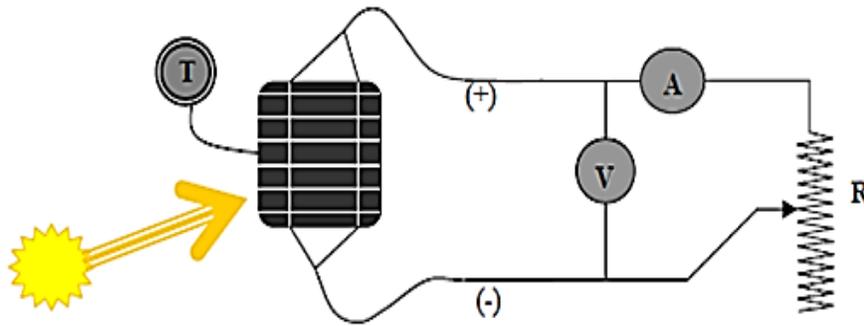
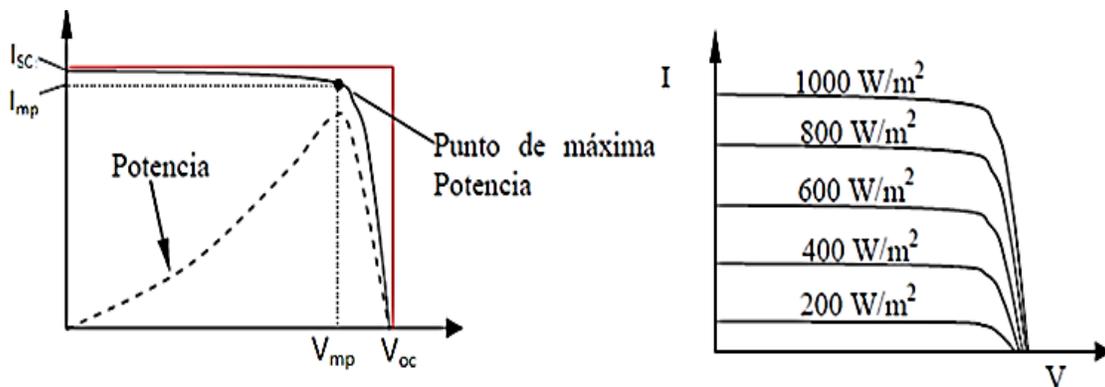


Figura 11: Circuito para medición de la curva característica de la celda fotovoltaica.[2]

Del circuito para la medición de la curva característica de una celda fotovoltaica (Figura 11) el procedimiento se describe a continuación:

Si se realiza un barrido en la resistencia variable desde el punto, donde su valor sea cero, el cual, es la medición de corriente de cortocircuito de la celda, como se ha visto, coincide con la fotogenerada, si se mantiene la irradiancia constante y se comienza a aumentar el valor de la resistencia lentamente, se verá que la tensión aumenta sin notarse una disminución significativa de la corriente, hasta llegar a cierto nivel de tensión donde la corriente cae abruptamente, como se puede observar en la Gráfica 4.



Gráfica 4:a) Característica I-V de una celda con temperatura e irradiancia constante. b) Características I-V de una celda con temperatura constante y distintos niveles de irradiancia.[3]

En la misma figura se puede observar la potencia obtenida para cada tensión de funcionamiento, se muestran también los puntos fundamentales que constituyen parámetros de la celda. Esta curva depende del nivel de irradiancia de la celda como puede verse en la figura adyacente.

#### 1.2.6. Efecto de la temperatura.

La temperatura de operación de las células solares está determinada por la temperatura ambiente, las características del encapsulado, la intensidad de la luz solar que incide en el módulo y de otras variables como la velocidad del viento.

En la Gráfica 4b) se muestra como varía la característica I-V cuando se modifica la temperatura para una irradiancia constante. Se puede observar que a medida que aumenta la temperatura de la celda se incrementa la  $I_{sc}$  y disminuye el  $V_{oc}$  mientras que los valores de V e I asociados al punto de máxima potencia se comportan de tal manera que la potencia máxima decrece. El corrimiento de la característica de la celda debido a la variación de temperatura, se caracteriza por medio de tres parámetros mostrados en las siguientes expresiones: el coeficiente de variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura (Ecuación 5), el coeficiente de variación de la tensión de circuito abierto con la temperatura (Ecuación 6) y el coeficiente de variación de la potencia máxima con la temperatura (Ecuación 7).

$$\alpha = \frac{\partial I_{sc}}{\partial T}$$

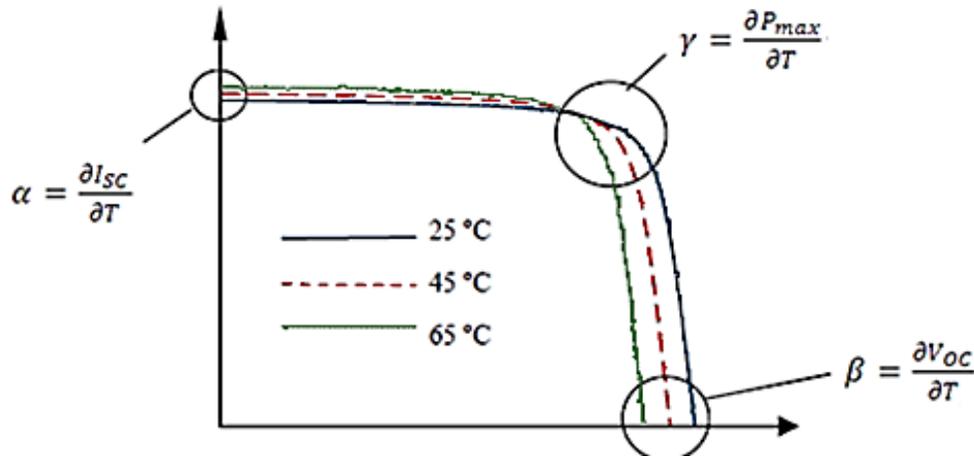
Ecuación 5: Coeficiente de variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura.[3]

$$\beta = \frac{\partial V_{oc}}{\partial T}$$

Ecuación 6: Coeficiente de variación de la tensión de circuito abierto con la temperatura.[3]

$$\gamma = \frac{\partial P_{max}}{\partial T}$$

Ecuación 7: Coeficiente de variación de la potencia máxima con la temperatura.[3]



Gráfica 5: Variación de la curva característica I-V con la temperatura.[3]

### 1.2.7. Parámetros fundamentales de las celdas fotovoltaicas.

A continuación se detallan algunos parámetros fundamentales de las celdas fotovoltaicas las cuales son de importancia en el estudio y comprensión de las celdas:

- Corriente de cortocircuito ( $I_{sc}$ ): Es la corriente que la celda provee cuando los contactos de ésta se encuentran cortocircuitados, es decir, que la resistencia entre sus terminales para contacto es cero, además, es la máxima corriente que puede suministrar la celda. Como se ha dicho anteriormente la corriente de cortocircuito de una celda es en la práctica igual a la corriente fotogenerada. Como se pudo ver en la Gráfica 4 y Gráfica 5, la  $I_{sc}$  para una celda determinada depende de la irradiancia y la temperatura de celda.

- Tensión de circuito abierto ( $V_{oc}$ ): Es la tensión entre los terminales de la celda cuando se encuentran desconectados, es decir, que la resistencia entre sus terminales para contacto tiende a infinito o es muy grande (el aire), además, que este punto coincide con la tensión máxima que puede suministrar la celda fotovoltaica. Como se pudo observar en las Gráfica 4 y Gráfica 5, este parámetro está influenciado levemente por la temperatura de celda y la irradiancia. Los valores de  $V_{ov}$  dependen fundamentalmente del material utilizado en la construcción de la celda, por ejemplo, para el silicio es de aproximadamente 0.6V y de 1V para el arseniuro de galio.
- Potencia máxima ( $P_{m\acute{a}x.}$ ): La potencia es el producto de la corriente por la tensión de la celda, como se pudo ver en la Gráfica 4, si se empieza a correr un punto sobre esa gráfica, se verá que cada punto de la característica I-V deja un área bajo la curva y dicha área representa la potencia entregada por la celda, de esta forma es fácil observar que el punto de máxima potencia es el que forme el área más grande, así mismo, si se mantiene la misma tendencia, se puede observar que tanto para el caso de cortocircuito como circuito abierto la potencia es nula. En el barrido se observa que al tomar un punto determinado se genera una coordenada en el plano I-V, entonces la corriente y tensión del punto de máxima potencia se les denomina  $I_{mp}$  y  $V_{mp}$  respectivamente. Los módulos tienen características I-V de la misma forma que las celdas y solo difieren en un factor de escala, por lo que se definen los mismos parámetros y es común, para el caso de módulos, denominar a la potencia máxima potencia pico.
- Factor de forma (FF): también llamado factor de llenado, es un concepto teórico que ayuda a definir la curva característica I-V, y se define como el cociente entre la potencia máxima y el producto de la corriente de

cortocircuito por la tensión de circuito abierto. Y se expresa en la siguiente ecuación.

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} * V_{OC}} = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{SC} * V_{OC}}$$

Ecuación 8: Factor de forma.[3]

- Eficiencia de conversión energética o rendimiento ( $\eta$ ): Se define como el cociente entre la potencia máxima ( $P_{m\acute{a}x.}$ ) y la irradiancia que incide sobre la célula, es decir, que es el producto de la irradiancia incidente (I) por el área de la célula (A) y se expresa de la siguiente manera:

$$\eta = \frac{P_{max}}{I * A} = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I * A}$$

Ecuación 9: Eficiencia de conversión energética.[3]

Generalmente este parámetro es determinado en condiciones normales y es muy utilizado en la etapa de investigación. Estudios demuestran que las celdas de silicio monocristalino pueden alcanzar eficiencias de 21% y superiores en la etapa de laboratorio, sin embargo, en producción industrial es normal encontrar rendimientos entre 12% y 14%.

#### 1.2.8. Modelo de la célula fotovoltaica.

Si se toma de referencia la Ecuación 4 se puede modelar idealmente como una fuente de corriente que depende de la irradiancia, en paralelo con un diodo. Pero en el modelo real, se deben de agregar 2 resistencias, las cuales actúan como pérdidas en el modelo, dichas resistencias pueden representarse como una resistencia en paralelo  $R_p$ , la fuente de corriente dependiente de irradiancia, la cual representa las fugas de corriente que se producen en pequeñas imperfecciones en la unión PN; mientras que la resistencia en serie  $R_s$  está representando la resistencia del propio semiconductor, la resistencia de contacto

del semiconductor con la malla metálica y la resistencia de la propia malla; el modelo circuital de la celda fotovoltaica se representa en la Figura 12.

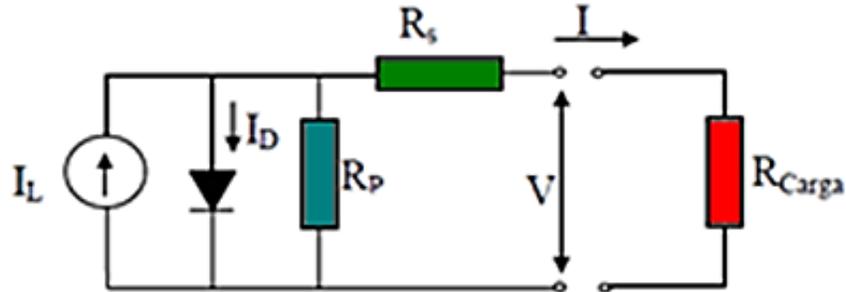


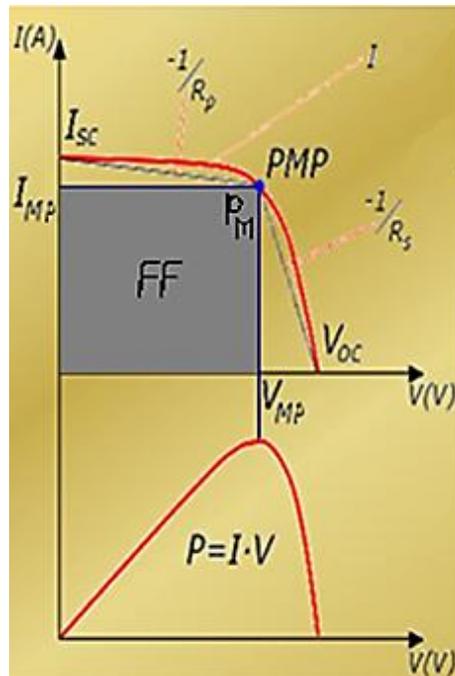
Figura 12: Modelo del circuito de la celda fotovoltaica.[4]

La ecuación que representa el modelo del circuito anteriormente descrito es la siguiente:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp \frac{e(V+I \cdot R_s)}{K \cdot T_c} - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p}$$

Ecuación 10: Modelo de la célula fotovoltaica.[3]

Y en la Gráfica 6 se representa la variación de la Ecuación 10, además de las delimitaciones de la gráfica con  $R_p$  y  $R_s$ .



Gráfica 6: Representación del modelo de la celda Fotovoltaica.[4]

### 1.2.9. Módulos Fotovoltaicos.

Los paneles fotovoltaicos están contruidos por un conjunto de celdas fotovoltaicas interconectadas entre sí, convenientemente (en serie y/o en paralelo); las cuales transforman la luz del sol en energía eléctrica, los módulos fotovoltaicos se pueden conectar en serie o paralelo para formar el llamado “generador fotovoltaico”.

La construcción de un módulo fotovoltaico es un proceso donde se encapsulan las celdas en la cual está formado el módulo, esto con el fin de brindar rigidez mecánica, aislación eléctrica, protección ante factores ambientales, además, de facilitar la manipulación y sujeción del módulo durante el ensamblaje del generador. Aunque existen diferentes técnicas de construcción, lo que la gran mayoría tienen en común, es que están contruidos por una cubierta de vidrio de alta transmitancia (bajo contenido de hierro), poseen un encapsulante transparente, aislante (generalmente etinel-vinil-acetato EVA),

que envuelve por delante y detrás a las celdas solares interconectadas, y la cubierta posterior que generalmente es de Tedlar, además, se suele complementar con un vidrio posterior., normalmente se recubren los bordes de este arreglo laminado con un marco de aluminio acoplado mecánicamente mediante encastres y adhesivo en base a silicona. En la Figura 13 se puede apreciar las partes que forman el módulo fotovoltaico.

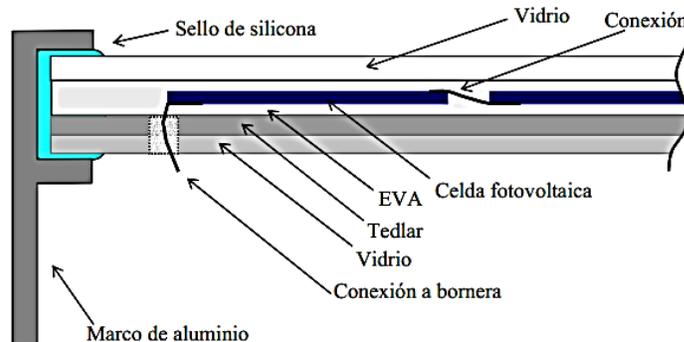


Figura 13: Elementos que conforman un módulo fotovoltaico.[2]

Los módulos más difundidos son los que trabajan en sistemas con 6, 12 o 24 voltios de tensión nominal, algunos de ellos se adaptan a dos tensiones de acuerdo a la conexión que se realice en sus borneras.

Existen varias tecnologías de módulos fotovoltaicos pero entre las más utilizadas están:

- **Monocristalinos:** Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza. En estudios de laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24.7% para éste tipo de paneles siendo en los comercializados de 16%, se pueden distinguir este tipo de tecnología por su color azul uniforme.



Figura 14: Módulo fotovoltaico del tipo monocristalino. [5]

- Policristalino: Los materiales son semejantes a los del tipo anterior aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente muy reconocibles por presentar en su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento inferior que con los monocristalinos (en laboratorio del 19.8% y en los módulos comerciales del 14%) siendo su precio también más bajo. Por las características físicas del silicio cristalizado, los paneles fabricados siguiendo esta tecnología presentan un grosor considerable. Mediante el empleo del silicio con otra estructura o de otros materiales semiconductores es posible conseguir paneles más finos y versátiles que permiten incluso en algún caso su adaptación a superficies irregulares, son los denominados paneles de lámina delgada.



Figura 15: Módulo fotovoltaico Policristalino.[5]

- Amorfo- (TFS): Un tipo de módulo, basado también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue aquí estructura cristalina alguna. Paneles de este tipo son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos (calculadoras, relojes, etc.), y en pequeños paneles portátiles. Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13% siendo el de los módulos comerciales del 8%.



Figura 16: Módulo fotovoltaico del tipo Amorfo. [6]

- Teluro de cadmio: Rendimiento en laboratorio 16% y en módulos comerciales 8%.



Figura 17: Módulo fotovoltaico de Teluro de cadmio. [7]

- Arseniuro de Galio: Uno de los materiales más eficientes, presenta unos rendimientos en laboratorio del 25.7% siendo los comerciales del 20%.
- Diseleniuro de cobre en indio: Con rendimientos en laboratorio próximos al 17% y en módulos comerciales del 9%.

Las tecnologías más utilizadas en el mercado son el monocristalino, policristalino y el amorfo.

Además los módulos se pueden clasificar por su forma, aquí existen 3 tipos de tecnologías.

- Paneles con sistemas de concentración: El cual mediante una superficie reflectante concentra la luz sobre los paneles fotovoltaicos. Aunque el porcentaje de

conversión no varíe, una misma superficie de panel producirá más electricidad ya que recibe una cantidad concentrada de fotones.

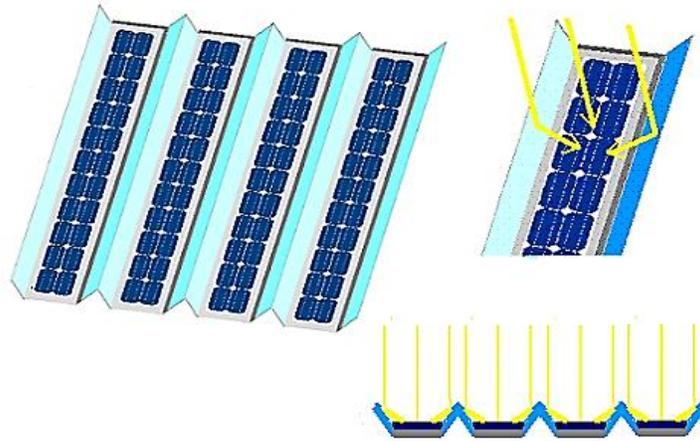


Figura 18: Imagen ilustrativa de un sistema de concentración solar. [5]

- Paneles de formato teja: Estos paneles son de pequeño tamaño y están pensados para combinarse en gran número para así cubrir las grandes superficies que ofrecen los tejados de las viviendas. Aptos para cubrir grandes demandas energéticas en los que se necesita una elevada superficie de captación.



Figura 19: Módulo fotovoltaico en forma de teja.[6]

- Paneles bifaciales: Basados en un tipo de panel capaz de transformar en electricidad la radiación solar que le recibe por cualquiera de sus dos caras. Para aprovechar convenientemente esta cualidad se coloca sobre dos superficies blancas que reflejan la luz solar hacia el reverso del panel.

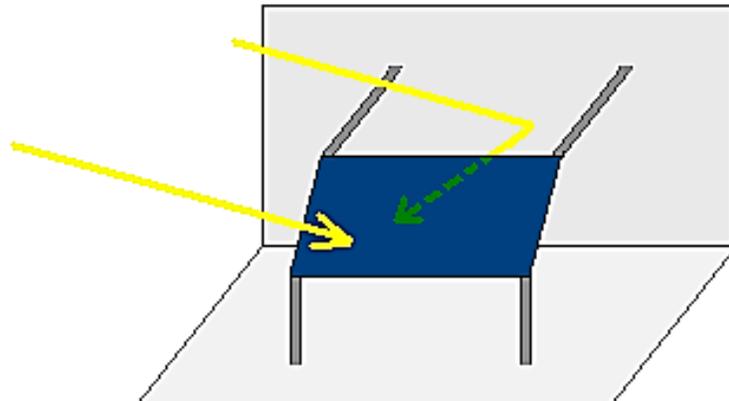


Figura 20: Panel Bifacial.[5]

#### 1.2.10. Controlador de carga.

Es el elemento encargado de asegurar el adecuado funcionamiento de la batería o del banco de baterías, evitando las sobrecargas y las sobre descargas de las mismas.

Los controladores modernos poseen sistemas de alarma que advierten según el estado de la carga de los acumuladores, la temperatura de las mismas, entre otros parámetros que se pueden ajustar de forma automática o manual.

Una explicación muy concisa del por qué se debe utilizar el controlador de carga es porque muchos módulos fotovoltaicos entregan voltajes entre los 16V a 20V, pero la mayoría de baterías comerciales de 12V necesitan unos 14.5V o 15V para lograr una carga adecuada, la función del controlador es limitar el nivel de tensión y corriente a valores seguros para los acumuladores.

Existen varios tipos de controladores de carga, entre los que se pueden mencionar se tienen:

- Controladores con un circuito de relay: son sistemas que al lograr la tensión necesaria para la carga adecuada de la batería se desconectan de la misma por medio de un relay por ejemplo en un sistema 12V cuando la tensión máxima de carga de batería pasa de unos 15V el circuito se abre por medio de un relay.
- Los que operan con un DiodoZener: Introducen en el circuito una carga que consume el exceso de energía aportada mediante un diodo 'Zener' que se hace conductor a partir de una tensión dada.
- Controladores PWM (Pulse Width Modulation): o de "modulación de ancho de pulso", que permiten optimizar la carga de la batería, Los Controladores PWM permiten entregar un nivel de carga variable electrónicamente gracias a un encendido-apagado muy rápido del circuito. El dispositivo comprueba continuamente la tensión de la batería, y si ésta es adecuada, los impulsos estarán muy distanciados (por ejemplo cada 3 segundos) y además serán muy cortos de duración (por ejemplo de una décima de segundo). Si por el contrario, la batería necesita mucha carga, los impulsos serán muy prolongados y continuos. El controlador comprueba la tensión de la batería entre pulso y pulso, en la Figura 21 se puede apreciar el funcionamiento de la modulación de pulso del controlador.

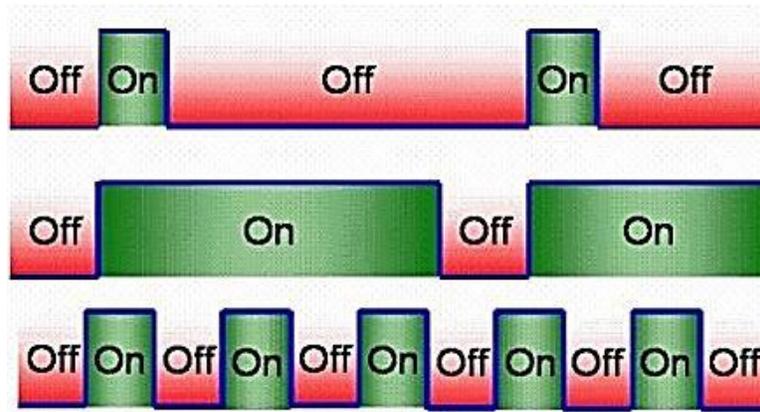


Figura 21: Imagen que demuestra la modulación de pulsos para un controlador de carga con PWM donde se pueden apreciar los periodos de carga. [8]

#### Ventajas de los Controladores PWM.

- ✓ Están contruidos con una tecnología probada desde hace muchos años.
- ✓ Son controladores baratos.
- ✓ Están disponibles en tamaños de hasta 60A.
- ✓ Tienen una vida útil larga, la mayoría tienen un sistema de refrigeración de calor pasiva.
- ✓ Estos controladores de carga están disponibles en muchos tamaños y para una gran variedad de aplicaciones.

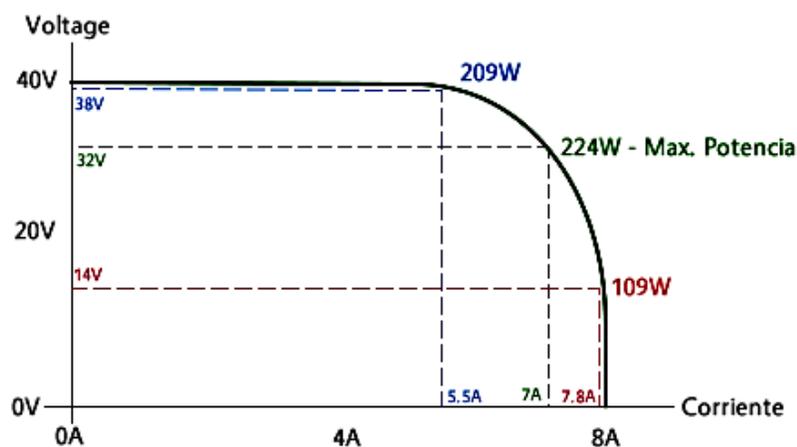
#### Desventajas de los reguladores PWM.

- ✓ El voltaje nominal debe ser el mismo que el del banco de baterías.
- ✓ No hay controladores únicos para tamaños por encima de 60A<sub>DC</sub>.
- ✓ Los más pequeños vienen sin accesorios.
- ✓ Los controladores de carga tienen una capacidad limitada para el crecimiento del sistema.

## Controlador de MPPT.

Los controladores de Seguimiento Punto de Máxima Potencia (MPPT por sus siglas en inglés), pueden encontrar el punto en el que el generador opera de forma más eficiente, y luego cargar las baterías. Los controladores de carga de MPPT se utilizan normalmente en sistemas de mayor tamaño, y permiten el uso de módulos de mayor voltaje nominal. Los controladores de tipo MPPT cuestan más que otros controladores de carga, pero pueden proporcionar hasta 30% más capacidad de carga desde los paneles solares hacia el banco de baterías.

Los controladores de carga con MPPT siempre buscan el balance entre voltaje y corriente en el que los paneles solares operan a su máxima potencia. Si se utiliza la curva voltaje vs corriente de un panel solar, mostrada en la Gráfica 7, el punto de máxima potencia se encuentra en el centro o esquina de la curva. Un controlador de carga con MPPT se va a asegurar que los paneles solares operen lo más cerca posible de este punto, por ejemplo en la Gráfica 7, los puntos de 209 W y 109W representan el rango en que el controlador establecerá.



Gráfica 7: Curva V vrs I de un panel fotovoltaico mostrando su MPPT.[3]

#### Ventajas de los reguladores MPPT.

- ✓ Los controladores de carga ofrecen un potencial de incremento en la eficiencia de carga de hasta un 30% (típicamente se puede considerar al menos el 15%).
- ✓ Estos controladores ofrecen la posibilidad de colocar paneles en serie a voltajes superiores al banco de baterías.
- ✓ Están disponibles de hasta 80A.
- ✓ Las garantías de los controladores de carga MPPT son típicamente mayores que en las unidades PWM.
- ✓ Ofrecen mayor sensibilidad para el crecimiento del sistema.

#### Desventajas de los reguladores MPPT.

- ✓ Los controladores de carga MPPT son más caros, costando a veces el doble que los PWM.
- ✓ Las unidades MPPT son generalmente más grandes en tamaño físico.
- ✓ El dimensionado apropiado puede ser desafiante sin las guías del fabricante.

En conclusión, en instalaciones muy pequeñas, como por ejemplo, solo para la iluminación de una vivienda aislada o similar, un controlador PWM es la mejor elección, pero para instalaciones más potentes, se utilizará un controlador MPPT.

#### 1.2.11. Esquema de conexión estándar de un controlador de carga.

Como se puede apreciar en la Figura 22, un controlador posee 3 puntos de conexión básicos, los cuales son: conexión a generadores fotovoltaicos, conexión a baterías o acumuladores y salidas a cargas DC.

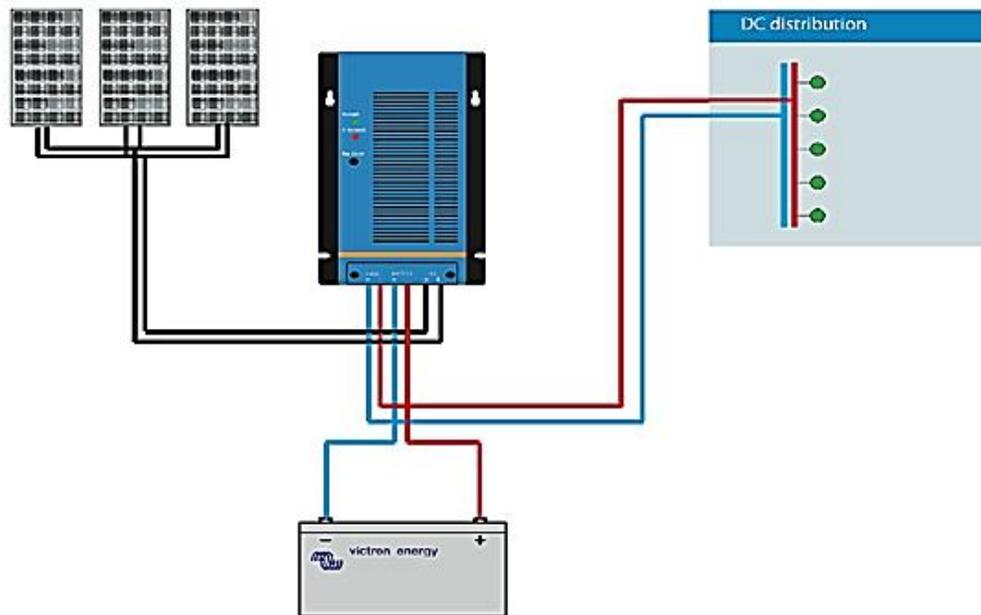


Figura 22: Diagrama general de conexión de un controlador de carga. [9]

### 1.2.12. Proceso de carga de baterías.

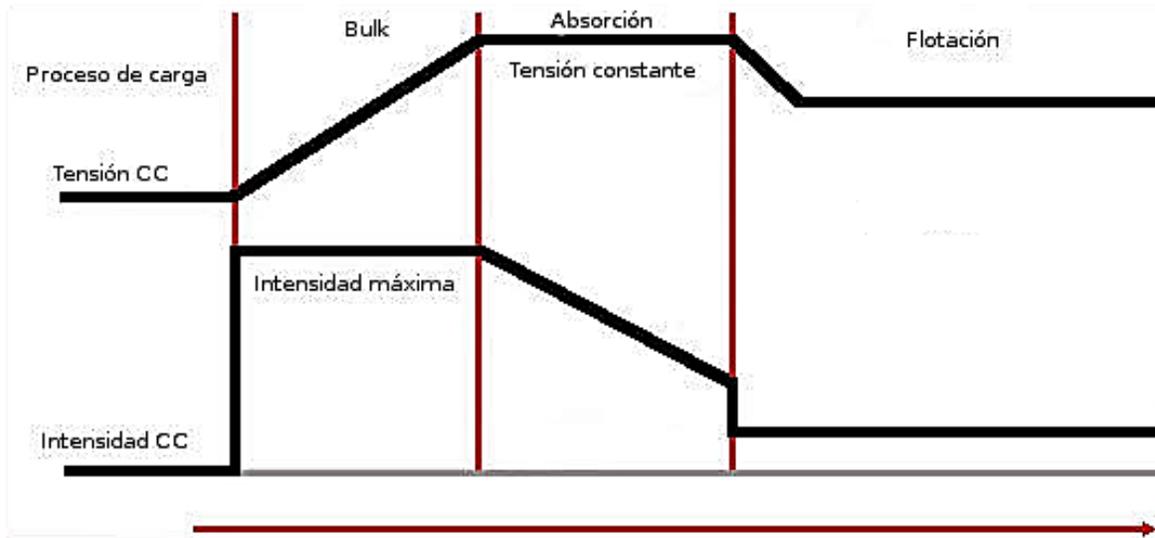
El proceso de carga de un acumulador, consiste en 3 etapas, en las cuales, el controlador de carga actúa como regulador de tensión y corriente, estas etapas son:

- Bulk
- Absorción
- Flotación

Etapa de Bulk (corriente máxima).

En esta etapa, la batería es cargada a una intensidad de corriente máxima, la cual es constante y depende de la capacidad del generador, hasta llegar al primer límite de tensión (por ejemplo en una batería de 12V este primer límite será 12.6V), en esta etapa el acumulador llega hasta el 80% de su carga.

En la Gráfica 8, mostrada a continuación, se puede apreciar la curva de carga de una batería, donde se puede apreciar que en el proceso de Bulk la tensión se incrementa hasta llegar al primer límite de tensión.



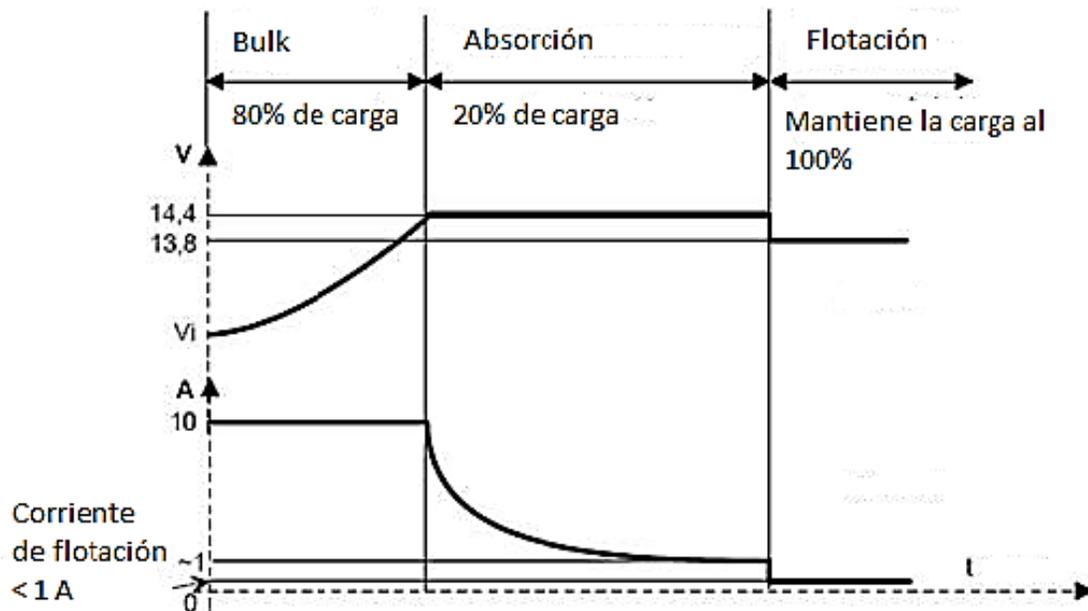
Gráfica 8: Proceso de carga de una batería.[10]

En esta etapa, el controlador de carga actúa estableciendo el límite de tensión, si esto no sucediera, la batería podría dañarse por sobrecarga.

Etapa de Absorción (Tensión constante).

Cuando se alcanza el valor seleccionado de voltaje de absorción (primer límite de tensión), se limita a la cantidad de corriente que fluye hacia la batería, a la corriente que puede absorber la misma a un voltaje determinado.

Cada fabricante especifica una tensión de carga, ya que ésta se debe definir en el controlador de carga. En esta etapa la corriente disminuye paulatinamente hasta que la batería llega a su 100% de carga, tal como se muestra en la Gráfica 9.



Gráfica 9: Proceso de carga de una batería durante el proceso de Absorción, donde se puede apreciar los porcentajes de carga de cada etapa. [10].

También se puede apreciar como la tensión en esta etapa se mantiene constante en todo el proceso hasta llegar al siguiente límite de tensión.

Etapa de Flotación.

Cuando la batería ya está cargada al 100% se pasa a una etapa denominada flotación, la cual es la encargada de mantener el nivel de carga de la batería al 100%, esto se logra por medio de un nivel de tensión bajo apropiado para cada batería que compense la auto descarga.

Por ejemplo en una batería de 12V, su tensión de absorción puede estar entre los 14V y los 15.6V, pero su etapa de flotación se puede encontrar en los 12.9V y los 14V, y la corriente en este punto es muy baja, menor a 1A.

Si se necesita mantener la batería por largos periodos de tiempo (meses), el voltaje de flotación no debe desviarse en más de un 1% del recomendado por el fabricante de la batería. Exceder este margen provoca corrosión de la placa positiva.

Etapa de Ecuación.

Además de las 3 etapas mencionadas, existe una más, la cual es la etapa de Ecuación (o Gaseo) esta etapa es una etapa complementaria la cual se dedica principalmente al mantenimiento de las celdas de la batería, si una batería no se carga completamente o se mantiene en un proceso de carga y descarga donde no se alcance el máximo de carga por demasiado tiempo, se provoca un proceso de sulfatación, estratificación (para baterías de plomo ácido líquido) y desequilibrio de voltaje entre celdas.

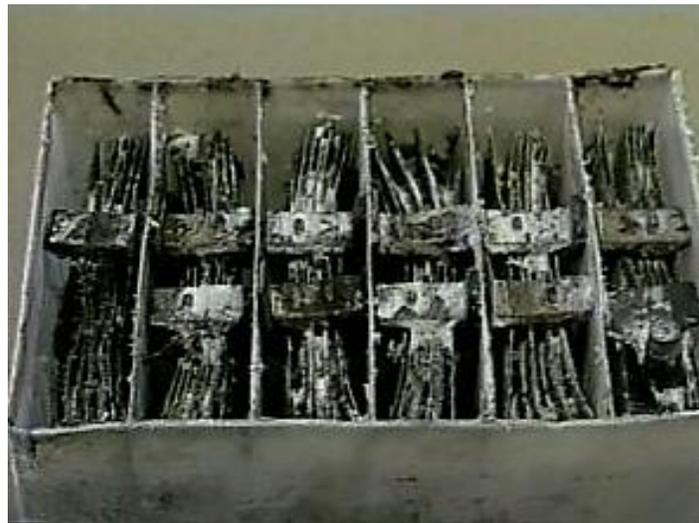


Figura 23: Batería con un proceso de sulfatación grave, donde se pueden apreciar sus celdas dañadas. [11]

El proceso de Ecuación consiste en llegar a un nivel de tensión alto y con una intensidad de corriente reducida, lo cual provoca que el electrolito burbujee, el gas



Un inversor básicamente consta de un oscilador (Etapa de sintetización) que controla un transistor o juego de los mismos para generar una onda rectangular, esta onda alimenta un transformador que se encarga de suavizar la señal que luego pasa a un sistema de filtrado.

#### 1.2.14. Clasificación de los inversores.

Existen varias formas de clasificar a los inversores, entre las que se pueden mencionar, se tienen:

Por su número de fases se pueden clasificar en:

Inversores Monofásicos y Trifásicos.

Por su configuración en inversores centrales, inversores en cadena (string) e inversores modulares (módulos AC).

Inversores centrales.

La instalación fotovoltaica dispone de un único inversor, generalmente trifásico y de alta potencia, utilizado para instalaciones con una potencia superior a 10kW. Se conectan en línea y a través de diodos en forma paralela. Para este caso el generador está conectado en el lado de corriente continua, tienen la ventaja de ofrecer un alto rendimiento. El inconveniente se plantea cuando existe un fallo en el inversor central, pues esto obliga a una detención de toda la instalación.

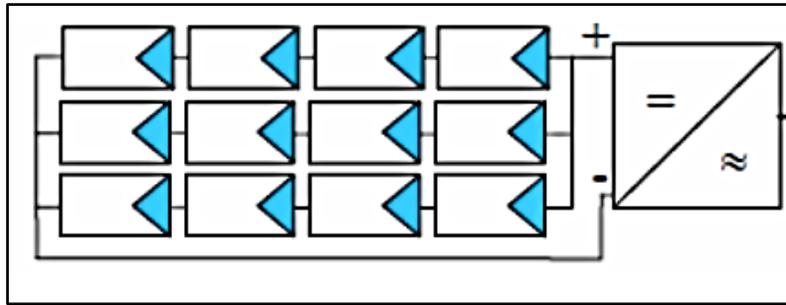


Figura 25: Esquema de conexión de un Inversor Central. [13]

Inversores en cadena (string).

Tienen potencias que oscilan entre 1 - 5kW y generalmente, son monofásicos.

Al igual que en el inversor central, los inversores en cadena se dividen en strings, sin embargo, cada string se une con un inversor string propio, de esta manera cada uno trabaja en su punto de máxima potencia.

Todo esto conlleva una mejora en las instalaciones, puesto que se reducen pérdidas ocasionadas por los strings y un cableado del generador en el lado de la corriente continua, además, se consigue un aumento del rendimiento y una máxima fiabilidad en la instalación.

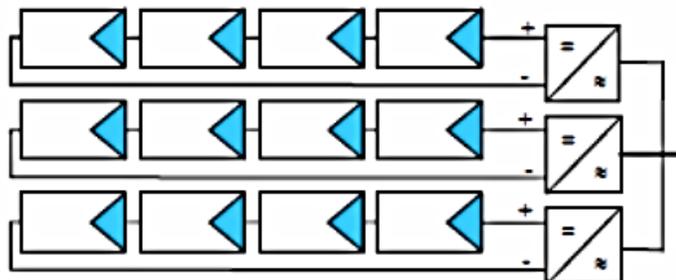


Figura 26: Esquema de un sistema de inversores en cadena[13]

Inversores integrados en módulos fotovoltaicos o módulos AC.

Cada módulo dispone de un inversor propio, con lo cual no se produce ningún tipo de pérdidas por adaptación, el rendimiento es menor que cuando se utilizan strings. Necesitan un cableado de una capacidad mayor en el lado de corriente alterna, ya que cada módulo debe estar conectado a la red que se encuentra usualmente a 110V o 220V.

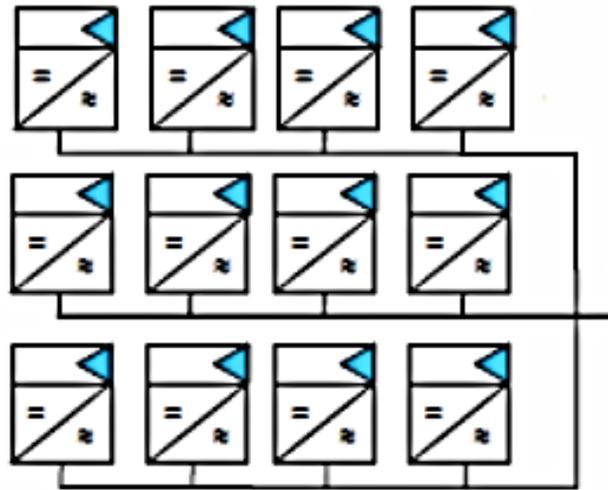


Figura 27: Esquema de un sistema de módulos AC conectados a la red. [13]

Además de estas clasificaciones, existen otras dos, que, por su aplicación, pueden ser: Inversores para Sistemas Aislados e Inversores para Sistemas Conectados a la Red.

#### 1.2.15. Parámetros de operación de los inversores.

Todos los Inversores Fotovoltaicos poseen los siguientes parámetros de operación:

- Tensión nominal: Es la que se debe aplicar a los terminales de entrada del inversor, los inversores disponibles para uso de sistemas fotovoltaicos se diseñan con tensiones nominales características de estos sistemas.

- Potencia nominal: Es aquella que puede suministrar el inversor de forma continua.
- Capacidad de sobre descarga: Se refiere a la capacidad del inversor para suministrar una potencia considerablemente superior a la nominal, así como al tiempo que puede mantener esta condición.
- Forma de onda: En los terminales de salida del inversor aparece una señal alterna caracterizada principalmente por su forma de onda y los valores de tensión, eficaz y frecuencia de la misma.
- Eficiencia o rendimiento: Relación expresada en porcentaje, entre las potencias presentes a la salida y a la entrada del inversor. Su valor depende de las condiciones de carga del mismo, es decir, de la potencia total de la carga alimentada por el inversor en relación con su potencia nominal.

#### 1.2.16. Partes fundamentales de los inversores.

Además los Inversores poseen las siguientes partes fundamentales:

- Control principal: Incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de anchura de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
- Etapa de potencia: Esta etapa puede ser única o modular en función de la potencia deseada. Se opta por la tecnología en baja frecuencia ya que ofrece buenos resultados con una alta fiabilidad y bajo coste. Además, debe incorporar un filtro de salida (LC), para filtrar la onda y evitar el rizado en la tensión procedente de los módulos.

- Control de Red: Es la interface entre la red y el control principal; proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la forma de onda generada a la de la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, etc.

-Seguidor del Punto de Máxima Potencia (MPPT): Es uno de los factores más importantes en un inversor, su función es acoplar la entrada del inversor a los valores de potencia variables que produce el generador, obteniendo en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.

- Protecciones: De manera general, los inversores deben estar protegidos ante tensiones de red fuera de márgenes, frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador, intensidad del generador fotovoltaico insuficiente, fallo de la red eléctrica y transformador de aislamiento, además, de las protecciones pertinentes contra daños a personas y compatibilidad electromagnética.

- Monitorización de datos: Los inversores modernos poseen microprocesadores que les facilitan almacenar una gran cantidad de datos, tanto de los parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia, etc.) como de parámetros externos (radiación, temperatura ambiente, etc.) e internos (temperaturas de trabajo).

#### 1.2.17. Baterías.

Es un sistema de almacenamiento de energía formado por un conjunto de acumuladores recargables, dimensionados de forma que garanticen cierto grado de autonomía al sistema.



Figura 28: Batería para uso fotovoltaico.[14]

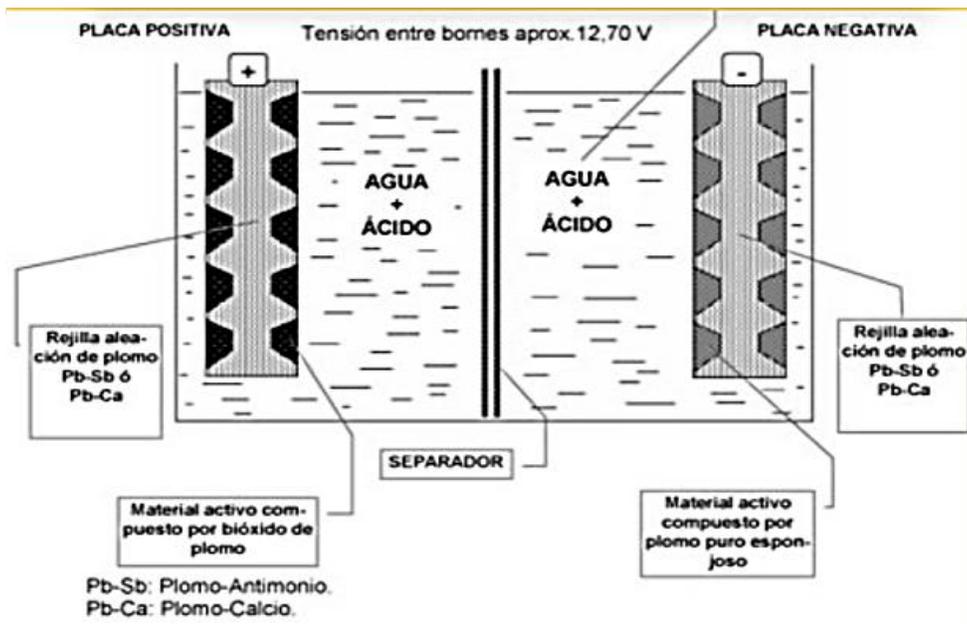


Figura 29: Partes que conforman una batería. [14]

Las baterías para uso fotovoltaico no son iguales a las utilizadas en otras aplicaciones (automóviles, equipo industrial, etc.), estas poseen características que las distinguen, entre estas se pueden mencionar:

- Mayor profundidad de descarga.
- Larga vida.

- Bajo mantenimiento.
- Bajo valor de auto descarga.
- Elevados ciclos de carga-descarga.

A diferencia de una batería de automóvil, una batería de un sistema fotovoltaico debe sostener corrientes moderadas de una decena de amperios durante horas, además de poder permanecer activa sin recibir carga alguna (servicio nocturno). Normalmente los periodos de reposo son nulos, ya que durante estos periodos, la batería está siendo cargada o descargada.

#### 1.2.18. Tipos de Baterías para aplicaciones Fotovoltaicas.

Hay diferentes tipos de baterías, según el material de sus componentes, en la Figura 30 se muestran las diferentes tecnologías de baterías comparando sus capacidades en relación a su peso (eje vertical) y su volumen (eje horizontal). Las baterías de ion de litio como las usadas en celulares y computadoras son superiores pero el precio todavía es muy elevado.

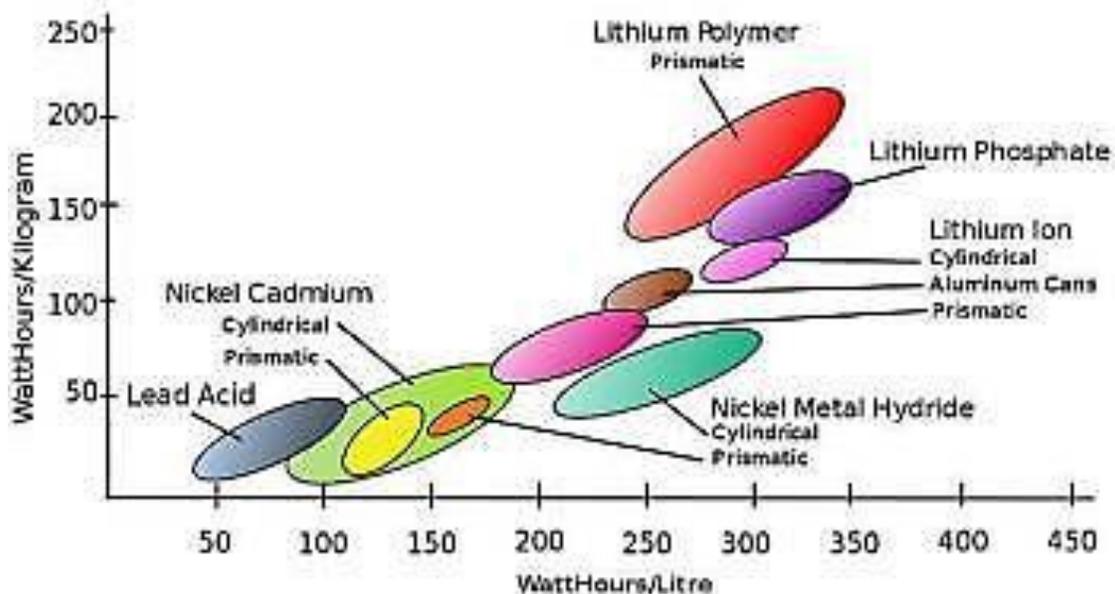


Figura 30: Diferentes tipos de tecnologías usadas en Baterías. [41]

Dependiendo del tipo de instalación, se recomienda el uso de un tipo de baterías u otro, actualmente, el mercado ofrece un amplio abanico de prestaciones en cuanto a baterías se refiere, pero cuando se refiere al uso fotovoltaico, actualmente se utilizan mayormente 2 tipos de baterías, las de Plomo-Ácido y las de Níquel-Cadmio.

Las baterías Plomo- Ácido.

Son más pesadas y requieren mayor espacio pero su costo es mucho menor, además poseen una larga duración con exigencias de mantenimiento casi nulas, son las que se utilizan mayoritariamente por su costo.

Tipos de baterías de Plomo-Ácido.

1. Baterías Líquidas: Son las más antiguas y su simple producción permiten precios favorables. Existen en versión abierta con tapas que dejan sustituir el agua o en versión 'libre de mantenimiento' que son cerradas, pero con válvulas para que posibles gases puedan escapar durante cargas excesivas.

2. Baterías tipo VRLA (Valve Regulated Lead Acid battery): Estas baterías modernas tampoco son completamente selladas, pero contienen una tecnología que recombinan el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua si no son sobrecargadas. Hay dos tipos principales: los de consistencia de Gel y los AGM (Absorbed Glass Mat), donde el ácido es fijado en fibra de vidrio. Ambas se pueden usar en temperaturas bajas.

- Baterías de Gel: En estas baterías 'selladas', el ácido tiene la forma de gel, su gran ventaja es que ya no hay un líquido que se pueda perder, son cerradas y funcionan en cualquier posición. La corrosión es reducida y son más resistentes a bajas temperaturas, su vida es mucho mayor que la vida de las baterías líquidas.

- Baterías tipo AGM: En estas baterías, desarrolladas inicialmente para la aviación, el ácido está fijado en fibras de vidrio (a veces se llaman baterías 'secas' por su reducida cantidad de ácido). Cada vez más se usan en sistemas solares y eólicos. Sus ventajas son: Una alta resistencia en climas fríos, su auto descarga sobre el tiempo es mínimo y tiene la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo (hasta 95%). Tienen una baja resistencia interna que permite corrientes altas. Las desventajas que presentan este tipo de baterías es que, aparte de que su precio es elevado, su vulnerabilidad es más alta a descargas profundas. Su vida útil puede variar considerablemente según calidad.

Las baterías de Ni-Cd.

Se emplean en sistemas de baja potencia, por su elevado costo (comparado con el de Pb-ácido)

Los electrodos de una batería solar tienen una aleación de antimonio que permite adherir una mayor cantidad de material activo y controlar el envejecimiento de la batería, el cual se produce por la pérdida del antimonio cuando la batería esta descargada.

A continuación se explicará la diferencia entre la profundidad del ciclo de una batería para un sistema fotovoltaico y una batería tradicional de automóvil por medio de un ejemplo:

El ciclo de arranque de una batería de un automóvil, está diseñada para soportar una profundidad de descarga leve, suponiendo que, la corriente de arranque de un auto alcanza los 350A, y el arranque dura 3 segundos.

$$I_{entregada} = (350 \text{ A}) * (3 \text{ seg}) * (1/60 \text{ min}) * (1/60 \text{ seg})$$

Quiere decir que durante el arranque la batería habrá entregado 0.29Ah.

Teniendo en cuenta que la capacidad típica de las baterías de auto es de 80Ah, los 0.29Ah representan una PD (profundidad de descarga) del 0.36% del valor total, concluimos entonces que se necesitarían tres arranque consecutivos para que nuestra PD llegase al 1%.

Por el contrario, una batería solar permite una PD máxima de 80% de su nivel, a niveles moderados de corriente, es por ello que se les denomina baterías de ciclo profundo (BCP). Se considera que una BCP ha completado todos sus ciclos de carga y descarga cuando, al ser cargada nuevamente, la máxima energía que puede almacenar se reduce al 80% de su valor inicial.

El número de ciclos de carga/descarga dependen de la PD, cuando ésta disminuye, el número de ciclos aumenta, para una determinada PD, la batería más robusta proporciona el mayor número de ciclos.

### 1.3 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.

El principio básico o elemental de la energía solar térmica es la de aprovechar la radiación del sol para transformarla en calor, o dicho de otra forma, será el de tomar la incidencia de los rayos solares para calentar un fluido que, por lo general, suele ser agua o aire. Esta fuente de energía renovable hasta cierto punto, podría decirse que se desperdicia ya que la conversión de la energía luminosa del sol en energía calorífica se produce directamente de forma cotidiana, sin que sea necesaria la intervención del hombre en este proceso.

#### 1.3.1 Clasificación de la energía solar térmica.

El estudio de la Energía Solar Térmica según su funcionamiento, se divide en 3 clasificaciones, las cuales son:

- Funcionamiento a baja temperatura considerando menos de 100°C.
- Funcionamiento a mediana temperatura considerada a menos de 300°C y mayor de 100°C.
- Funcionamiento a alta temperatura considerada hasta 4,000°C.

Cabe resaltar que la mayor parte del estudio será enfocada al funcionamiento de baja temperatura, pero se detalla una descripción de las restantes para una mayor comprensión.

### 1.3.2 Aprovechamiento de la energía solar térmica.

En el caso de una instalación térmica, los captadores solares pueden valerse del principio de superficies de color oscuro para absorber la mayor cantidad de radiación solar posible. Es por eso que en días soleados bastará con que los rayos solares incidan directamente sobre el sistema de captación, para obtener el aporte energético que se necesiten para su uso en diversas aplicaciones, esto idealmente con la menor cantidad de pérdidas térmicas en este proceso.

Con el fin de evitar pérdidas de Energía Térmica, los sistemas de captación solar están diseñados con el principio del efecto invernadero, el cual consiste en que la radiación solar atraviesa con facilidad la atmósfera hasta llegar a la superficie terrestre, y cuando la tierra y el mar se calientan debido a este motivo, irradian la energía que han absorbido en longitudes de onda más largas, en donde parte de estas longitudes de onda vuelven a la atmósfera, que la absorbe y la re-irradia de nuevo a la superficie terrestre en un efecto rebote.

Es por ello que cualquier sistema de captación solar se basará, en la combinación de los efectos de cuerpo negro y el principio de efecto invernadero, esto para conseguir el

aprovechamiento de gran parte de la radiación que llega hasta una instalación solar, y por otro lado, impedir pérdidas en la energía calorífica ganada.

Este tipo de generación, por lo general debe situarse en regiones con una alta radiación solar directa. Entre estas áreas más prometedoras del mundo están el suroeste de Estados Unidos, América Central y del Sur, África, Oriente próximo, la Europa Mediterránea, Irán, Pakistán, y las regiones desérticas de India, la ex-Unión Soviética, China y Australia.

En muchas regiones del mundo, un kilómetro cuadrado de tierra basta para generar unos 100-200 Giga vatios hora (GWh), de electricidad al año usando la tecnología solar térmica.

Dicho de otra forma, esto equivale a producir anualmente en una central térmica convencional de carbón o de gas de 50MW. A nivel mundial, según estudios, la explotación de menos del 1% del potencial solar térmico total sería suficiente para estabilizar el clima mundial mediante reducciones masivas de CO<sub>2</sub>.

### 1.3.3 Funcionamiento de una instalación solar de baja temperatura.

El principio básico de cualquier instalación solar térmica, es el de aprovechar la energía de radiación solar mediante un conjunto de captadores y transferirla a un sistema de almacenamiento, el cual, abastece el consumo cuando sea necesario.

Y en todo este proceso, la única contribución del hombre para aprovechar esta fuente de energía, es el de canalizar y retrasar el proceso natural que ocurre a cada instante en la superficie terrestre, por el que la radiación solar se convierte en energía térmica. Y el procedimiento con el cual se lleva a cabo en cualquier instalación solar, radica en absorber la energía térmica contenida en los rayos solares y cuando el fluido que circula en el interior del captador se calienta, se tiene que evitar pérdidas, que en este caso, sería el enfriamiento, esto a través de un aislamiento térmico lo más eficaz posible. El esquema

básico de una instalación solar de baja temperatura para aplicación de agua caliente sanitaria se muestra en la Figura 31.

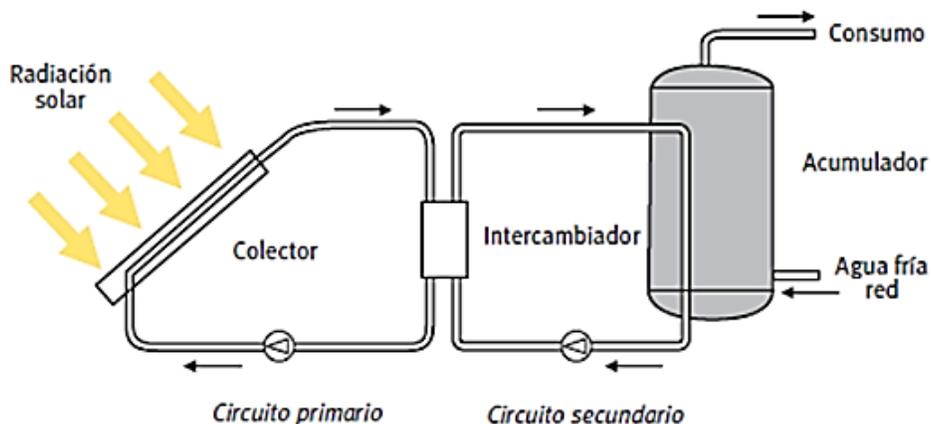


Figura 31: Esquema básico de una instalación solar de baja temperatura como aplicación de agua caliente sanitaria.[15]

#### 1.3.4 Elementos principales de una instalación solar térmica.

Captadores solares.

En base a diversos estudios de captadores solares térmicos, se han diseñado diversas y avanzadas versiones de captadores con el objetivo de incrementar la cantidad de energía absorbida y disminuir las pérdidas. Se podría mencionar que el tipo de captadores más común es el de captadores planos, y este utiliza como fluido el agua.

A continuación, se detallan algunas de las características de los captadores solares más empleados hoy en día, para aprovechar la energía térmica de baja temperatura; o sea, la que se utiliza convencionalmente para uso doméstico y que trabaja con temperaturas que no sobrepasan los 100 °C de temperatura.

Como construcción de los captadores planos, se puede detallar que están recubiertos de una caja herméticamente cerrada. En la cara superior de esta caja se coloca una superficie acristalada que deja atravesar la radiación solar e impide que se pierda la ganancia térmica obtenida. Generalmente la carcasa que envuelve al equipo de captación es metálica, aunque en algunos casos puede ser de plástico especial o de algún otro material esto se puede ver mejor en la Figura 32 b).

Además, en el interior del sistema captador se encuentra una placa absorbedora, vista en la Figura 32 a), que es el lugar donde se realiza la captación de la radiación solar propiamente dicha. Esta es comúnmente fabricada con materiales eficientes en la conducción de calor (aluminio, cobre, planchas metálicas, etc.), dicho de otra forma, esta placa tiene un funcionamiento similar al de un radiador, con una disposición de tubos que cuentan con una toma por donde entra el fluido a calentar y otra de salida. Pese a que existe un gran número de diferentes configuraciones de tubos internos, los tradicionales suelen utilizar los de tipo serpentina o los de tubo paralelo.

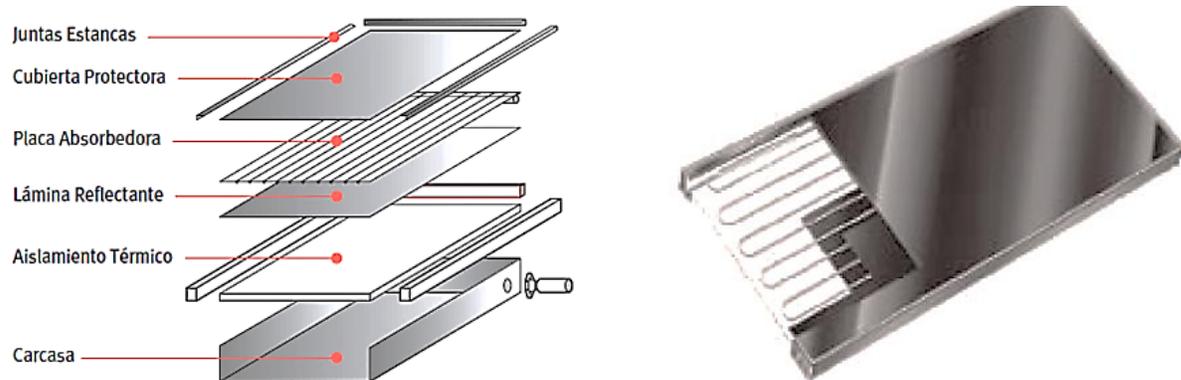


Figura 32: a) Captador plano de tubos paralelos, b) Captador plano tipo serpentina.[16]

En síntesis, en el rendimiento de los captadores solares, resulta difícil precisar qué cantidad de energía se podrá obtener en cada momento, ya que este tipo de captadores de baja temperatura carecen de cualquier forma de seguimiento de la posición del sol a lo largo del día, y captan tanto la radiación directa como la difusa con resultados muy

variables. Los captadores solares de vacío pueden llegar a ser más eficientes en ciertos rangos de temperatura, aunque su desventaja es su alto costo. Estos captadores consiguen sacar el máximo provecho a las instalaciones térmicas, que trabajan a temperaturas por encima de los 60°C. La principal diferencia respecto a los planos, reside en los conductos que absorben la energía del sol, éstos están recubiertos de un tubo al vacío que deja pasar la radiación solar, a la vez que evita las pérdidas de energía con mayor precisión que otros sistemas de captación.

#### 1.3.5 Sistemas de captación en plantas.

En general, la tecnología de generación de Energía Eléctrica en base a Energía Termosolar o Energía Solar Térmica, está basada en el concepto de la captación de la radiación solar para producir vapor o aire caliente, que puede, posteriormente ser usado en plantas eléctricas convencionales. La captación de energía solar, que tiene una densidad relativamente baja, es uno de los mayores retos en el desarrollo de plantas termosolares, para la concentración, la mayoría de los sistemas utilizan espejo debido a su gran reflectividad.

#### 1.3.6 Sistema de captación lineal y puntual.

La concentración puntual y lineal, puede aprovechar solamente la radiación directa, y no la difusa, debido a que esta última no puede ser concentrada. La concentración lineal es más fácil de instalar al tener menos grados de libertad, pero tiene un factor de concentración menor, y por lo tanto puede alcanzar menores temperaturas que la tecnología de concentración puntual. Este tipo de captación se puede ver en la Figura 33.

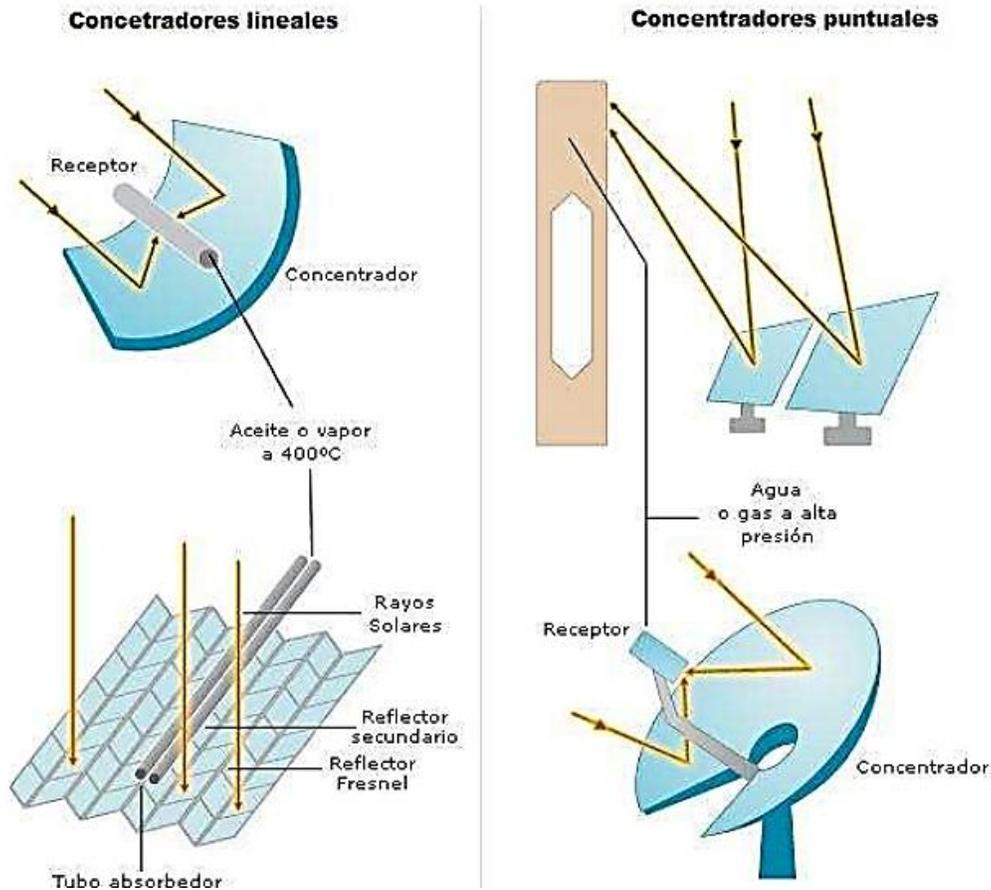


Figura 33: Sistema de captación lineal.[17]

### 1.3.7 Sistema de distribución.

El sistema de distribución es el que se encarga de transportar el fluido caliente contenido en los captadores solares hasta el punto de consumo. Cabe resaltar que existen diferentes circuitos de distribución, dependiendo de las condiciones climáticas que se tengan en el lugar de captación o de las necesidades que se deban de satisfacer.

Los sistemas más utilizados para viviendas son los de distribución de circuito cerrado, ya sean con termosifón o circulación forzada, es decir, aquellos que cuentan con un sistema de doble circuito en el que el fluido que transita por el captador es diferente al que corre a

través del tanque de almacenamiento. Entre los sistemas de distribuciones sobre las instalaciones en Energía Solar Térmica se pueden mencionar las siguientes:

Las Instalaciones de circuito abierto: Estos sistemas son los que transfieren directamente el agua caliente producida en el captador solar hacia el depósito de acumulación, y su funcionamiento es muy simple; cuando el captador es calentado por el sol, el agua aumenta de temperatura, desplazándose hacia arriba. Una vez en el depósito de almacenamiento, éste se vacía con una cantidad equivalente de agua más fría que se dirige al captador, esto se puede observar en la Figura 34.

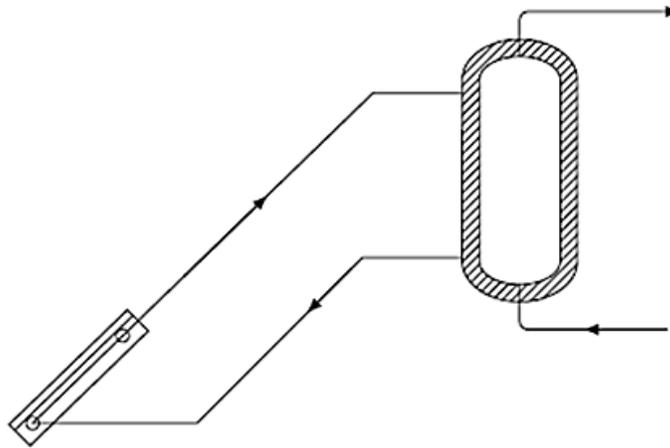


Figura 34: Sistema de circuito abierto.[18]

Instalaciones de circuito cerrado: Este tipo de instalación puede ser de dos tipos de circuitos: el circuito primario del sistema captador y el circuito secundario, donde se encuentra el sistema de almacenamiento. En el circuito primario se introduce un líquido especial que circula por dentro del captador y transmite calor al agua del tanque de almacenamiento por medio de un intercambiador de calor. Lo que se pretende con el sistema de doble circuito es evitar que el agua del depósito se pueda mezclar con el líquido del captador. Así, es posible colocar un componente anticongelante que permita su uso en zonas donde las temperaturas bajen de cero grados. Dicho sistema se muestra en la Figura 35.

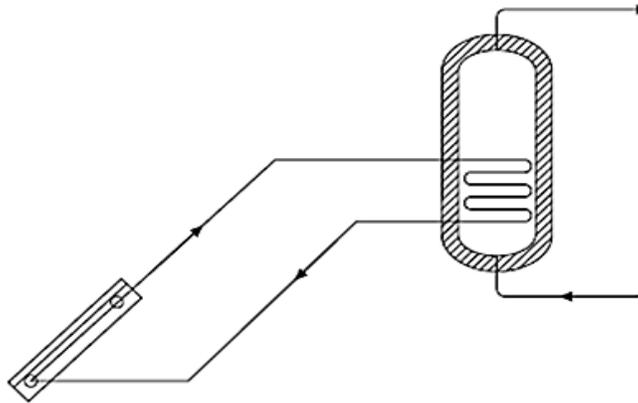


Figura 35: Sistema de circuito cerrado.[18]

Circulación forzada de agua: Los sistemas de circulación forzada están basados en una bomba de impulsión movida por un aporte exterior de energía eléctrica; un gasto que se debe tener en cuenta a la hora de optar por este tipo de mecanismos. La bomba de circulación colocada en el sistema de captación, tiene como principal función transferir el fluido circulante más rápidamente como se puede ver en la Figura 36, impidiendo así que se pueda perder parte de las calorías ganadas en el proceso de distribución. La utilización de esta bomba también permite interrumpir la transferencia de calor cuando el agua de los captadores no circule más caliente que la que se encuentra en el depósito. Este sistema es muy común en climas fríos, donde cualquier pérdida de calorías puede restar eficacia a la instalación solar, este tipo de circulación se utiliza para instalaciones solares de cualquier tamaño.

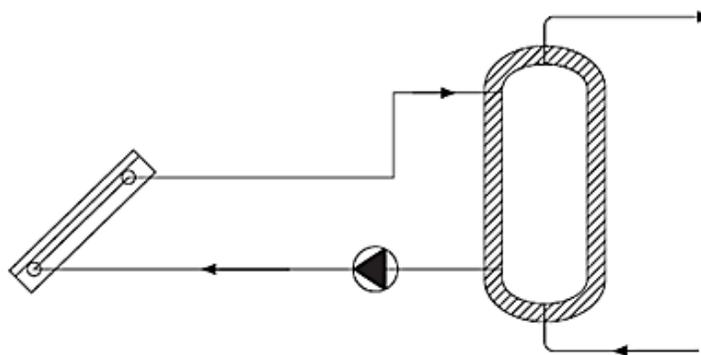


Figura 36: Esquema de circuito de circulación forzada.[18]

Circulación natural o con termosifón: Este tipo de sistema, tiene la característica de no contar con bombas de impulsión, aprovechando así la circulación natural del agua caliente, que por naturaleza tiende a ascender. Los sistemas con termosifón son muy utilizados en áreas geográficas con climas más cálidos, estos sistemas de circulación sólo se utilizan para instalaciones solares pequeñas como se puede ver en la Figura 37.

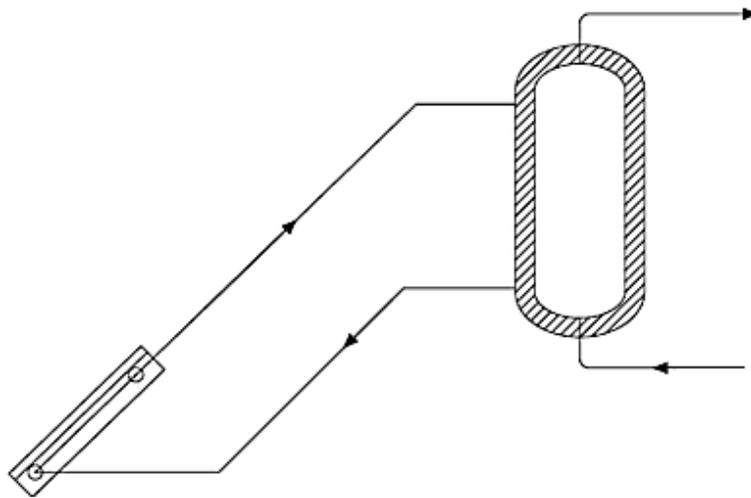


Figura 37: Esquema de instalación de circulación natural.[18]

#### 1.3.8 Almacenamiento.

Ya que la Energía Solar no es continua, se hace necesario sistemas de almacenamiento para ciertas aplicaciones en aprovechamiento activo, es decir, aquellos que se requieran aplicaciones a baja temperatura. Dichos depósitos de almacenamiento, según diversos estudios tienden a dar mejores resultados aquellos que tienen forma cilíndrica. Ya que se considera el fenómeno de estratificación por el que el agua caliente disminuye su densidad y tiende a ascender por encima del agua fría, que pesa más. Cuanto mayor sea la altura del depósito, mayor será también la diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del tanque de almacenamiento.

Como recomendación se puede mencionar que si el depósito fuera demasiado pequeño, se desperdiciaría parte de la energía obtenida, mientras que si fuera demasiado grande, no se conseguirían alcanzar las temperaturas adecuadas de funcionamiento. Por eso existe una proporción adecuada entre los metros cuadrados de la superficie de captación y las dimensiones del tanque de almacenamiento.

Los materiales de construcción de los depósitos de almacenamiento son muy variados, pero a continuación se detallan los más importantes como son el acero, el acero inoxidable, el aluminio y la fibra de vidrio reforzado. La adecuada elección del material de construcción tiene especial importancia porque uno de los problemas más importantes de las instalaciones solares, es la calidad del agua, que puede producir corrosiones en el tanque de almacenamiento. Algunos tipos de almacenadores se muestran en la Figura 38.



Figura 38: Tipos de almacenamiento.[16]

### 1.3.9 Aplicaciones con baja temperatura.

Como se mencionó anteriormente, la Energía Solar Térmica se divide según su funcionamiento en 3 categorías, y dependiendo de esta clasificación se puede detallar su aplicación.

Entre las aplicaciones de baja temperatura, son focalizadas principalmente para el ámbito doméstico, entre ellas se pueden mencionar: el almacenamiento de agua caliente para uso doméstico, el aporte de energía para instalaciones de calefacción (en algunos países), el calentamiento de agua para piscinas, o el precalentamiento de fluidos en distintos procesos industriales.

#### 1.3.10 Aplicaciones de agua caliente sanitaria.

Para este tipo de aplicación, la Energía Solar Térmica es una solución idónea al ser una alternativa viable aprovechando los recursos solares de nuestro país, además los costos se podrían considerar como una inversión muy rentable en el ahorro energético.

En El Salvador esta aplicación es de las más ampliamente usadas en los ámbitos hoteleros, reduciéndoles así sus costos energéticos, por lo cual, se puede asegurar que presentan un tiempo de amortización más corto que los de tipo residencial, dado que se requieren los mismos componentes, y en el caso de almacenamiento de agua caliente grande también es proporcionalmente más económico que el de sistemas para hogares.

Cabe resaltar que una de las razones que hacen que esta tecnología sea muy apropiada para este tipo de uso, es el nivel de temperatura que se precisa alcanzar, el cual está en el rango de 40°C a 45°C, y que coincide con los valores más adecuados para el buen funcionamiento de los sistemas solares estándar con disponibilidad de los distribuidores en el mercado.

#### Calefacción.

Esta es una aplicación no muy empleada en El Salvador debido a las condiciones climáticas del país, pero a nivel mundial es una de las mayores necesidades, en especial para países

en donde las temperaturas son muy bajas, y debido a los ahorros de energía de más del 25% que se pueden llegar a alcanzar con estos sistemas, es muy habitual emplear este tipo de instalaciones, como por ejemplo, en el centro y en el norte de Europa, para cubrir parte de su demanda de calefacción.

Uno de los mayores problemas que se tiene al aplicar esta tecnología, es que para las instalaciones de calefacción convencionales, abastecen los radiadores de agua con temperaturas entre 70°C y 80°C pero los sistemas de colección de placa plana no suelen trabajar a temperaturas superiores a los 60 °C, por lo que sólo se utilizan para precalentar el agua. Es por eso que en esos países es usual utilizarlos combinándolos con un sistema de suelo radiante, el cual opera a rangos de temperatura idóneo para que los captadores solares tengan un buen rendimiento, dicho rango es entre los 30°C a 40°C; finalmente se puede mencionar que los sistemas de mayor aceptación en los países con mayor demanda, a pesar que este sistema es más costoso que el sistema de placa plana, es el sistema de captadores de vacío el cual opera a temperaturas superiores a 70°C.

Calentamiento del agua de las piscinas.

Otra aplicación utilizada en nuestro entorno es el calentamiento del agua de las piscinas, gracias a que resulta una aplicación sencilla y económica frente a otras tecnologías convencionales, como fuese el de uso de gas propano o el caso eléctrico para ese propósito.

Debido a la influencia de la posición geográfica de El Salvador y Centroamérica en general, se aprovecha este tipo de aplicación, ya que resulta bastante económico y así se logra una temperatura estable en las piscinas al aire libre. En primer lugar, porque, al circular el agua de la piscina directamente por los captadores solares, no es necesario utilizar ningún tipo de intercambiador de calor ni de sistema de acumulación, lo cual se ve reflejado en la inversión, y en segundo lugar, porque la temperatura de trabajo suele ser baja ya que es

en torno a los 30°C, lo cual permite prescindir de cubiertas, carcasas o cualquier otro tipo de material aislante.

#### Sistemas de refrigeración.

Esta aplicación se utiliza para aprovechar la energía solar en un sistema para producir frío, (la cual es una aplicación muy importante en cuanto al ahorro energético ya sea en una oficina o un hogar), dicha aplicación es requerida en los instantes de tiempos en las cuales se necesita enfriar el espacio, lo cual coincide con las horas que se disfruta de mayor radiación solar.

Una de las tecnologías que sirve para aprovechar el calor solar para acondicionar térmicamente un ambiente, la más viable en términos de coste de la inversión y ahorro de energía es la constituida por el sistema de refrigeración por absorción, el cual funciona mediante la capacidad de determinadas sustancias para absorber un fluido refrigerante.

Como absorbentes se utilizan principalmente el amoníaco o el bromuro de litio, mientras que como líquido refrigerante es el agua el más recomendado, el esquema básico se muestra en la Figura 39.

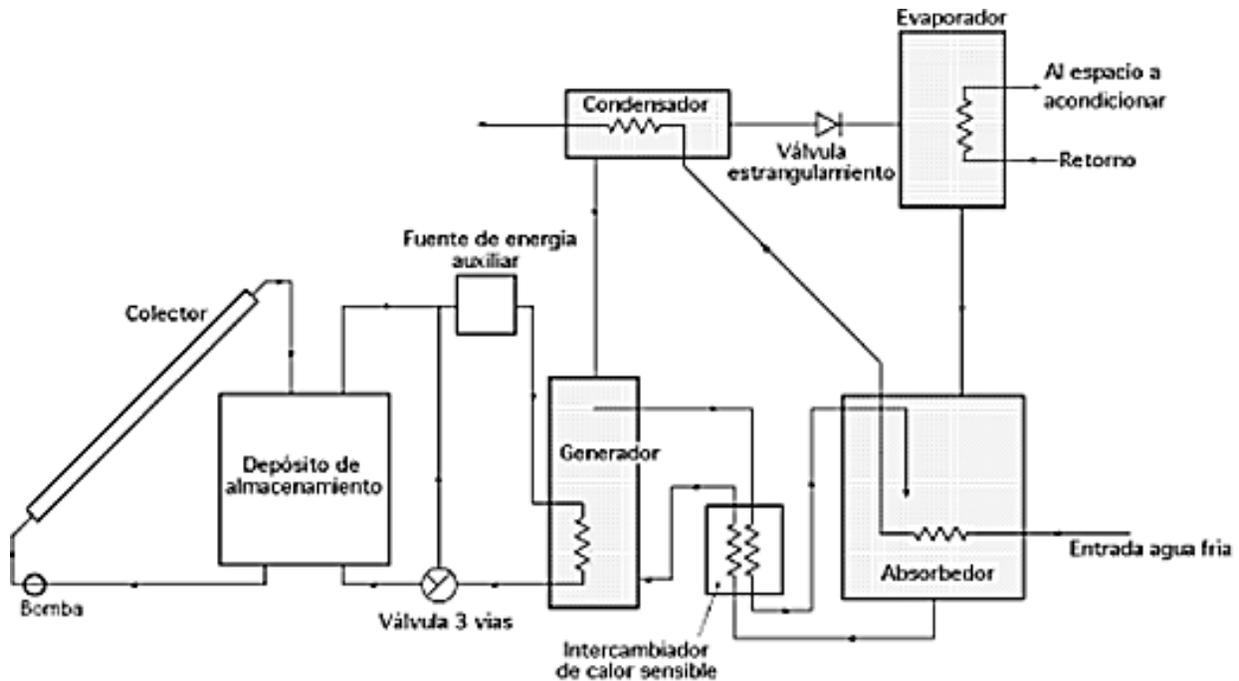


Figura 39: Esquema de un sistema de acondicionamiento de aire por absorción.[15]

### 1.3.11 Aplicaciones con Medianas temperaturas.

Ámbitos industriales.

Como aplicaciones industriales, pueden mencionarse muchas debido a la gran utilidad de la energía térmica en sus procesos industriales, las cuales pueden acoplarse a la tecnología de incorporación de calor mediante Energía Solar Térmica.

Entre los ejemplos se encuentran:

- Secado de granos.
- Pre calentamiento de líquidos para diferentes usos industriales.
- Deshidratadores solares.

### 1.3.12 Aplicaciones con Altas Temperaturas.

#### Generación eléctrica.

La principal aplicación para las tecnologías de alta temperatura, es la generación de electricidad mediante la energía solar térmica, mediante un proceso que convierte el calor en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica, se consiguen altas capacidades en la producción de electricidad.

La necesidad en las centrales, es poder llegar a superar altas temperaturas como los 2,000°C de temperatura por medio de un gran número de espejos enfocados hacia un mismo punto, ya sea con la tecnología de cúpula de una torre o un tubo de vidrio dispuesto a lo largo del tramo central del espejo concentrador como lo muestra la Figura 40, con el fin de calentar un fluido hasta convertirlo en vapor. Gracias a la elevada presión alcanzada es posible accionar una turbina, que a su vez impulsará un generador eléctrico.

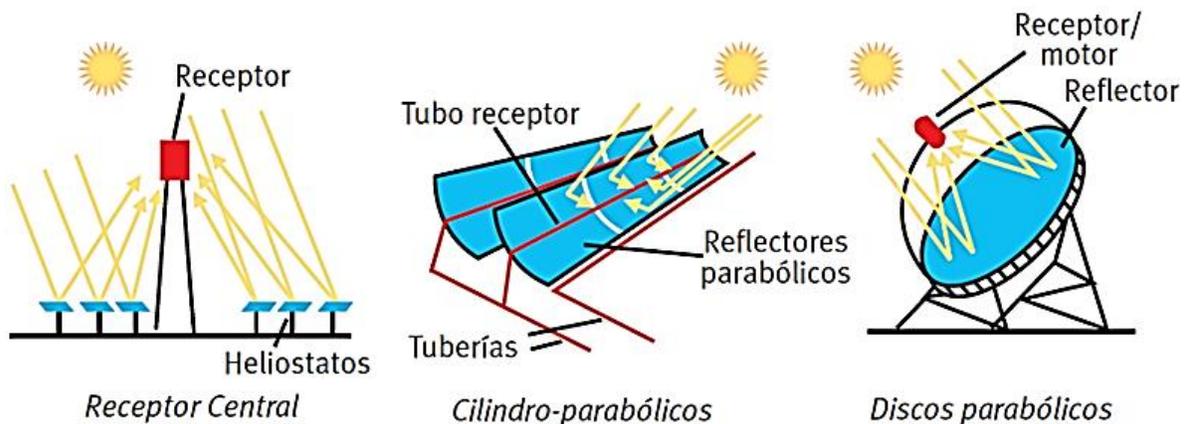


Figura 40: Tipos de concentradores empleados para la generación eléctrica.[17]

### 1.3.13 Ecuación básica del balance energético en colectores de placa plana.

Mediante un balance energético se puede hallar la distribución de la energía solar incidente sobre un colector de placa plana, su transformación en energía útil y las pérdidas térmicas.

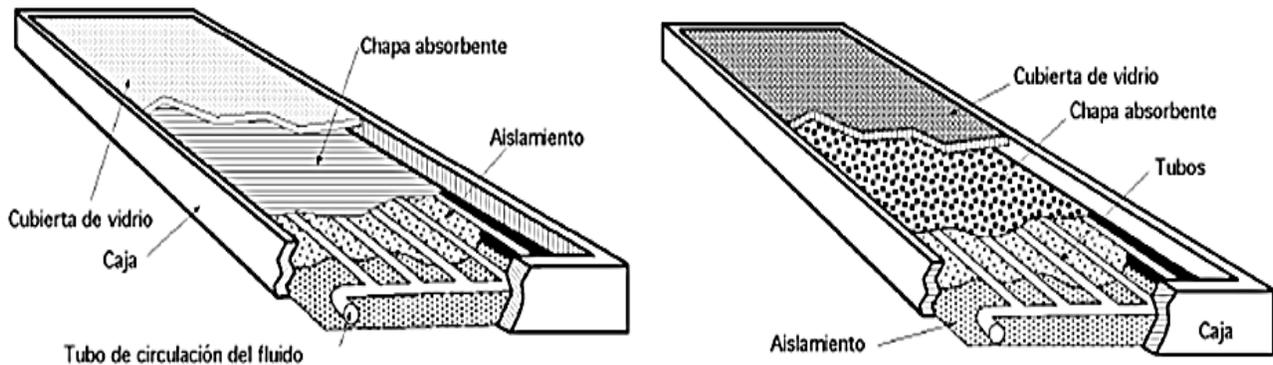


Figura 41: Estructura de un colector solar de placa plana. [17]

Este balance energético se puede poner en la siguiente forma:

$$AI_o k \tau_s \alpha_{sp} = Q_u + q_{p\acute{e}rdidas} + q_{almacenada} = AkI_s \alpha_s \quad \text{Ecuación 11: Balance energético. [18]}$$

Dónde:

$A$ : Es la superficie del colector, igual en la cubierta que en la placa absorbente.

$k$ : Es un factor de conversión de la radiación (difusa y directa), que sirve para evaluar la energía solar incidente en el plano del colector.

$\tau_s$ : Es la transmitancia solar efectiva de la cubierta del colector.

$\alpha_{sp}$ : Es la absortancia solar de la placa absorbente del colector.

$q_{p\acute{e}rdidas}$  : Es la cantidad de calor perdido desde la placa absorbente del colector al medio exterior, tanto por convección, como por conducción y radiación. Esta energía perdida lo es hacia arriba, hacia abajo y hacia los laterales del colector.

$q_{almacenada}$  : Es la energía almacenada en el colector.

$Q_u$ : Es el calor útil que se transfiere al fluido refrigerante que circula por el colector solar, cuyo valor es:

$$Q_u = G_F C_{pF} (T_{sal} - T_{ent}) = C_{cool} (T_{sal} - T_{ent}) \quad \text{Ecuación 12: Calor útil que se transfiere al fluido. [16]}$$

Siendo:

$C_{cool}$  : La capacidad calorífica del fluido del colector.

La energía solar incidente  $I_s$  sobre la placa absorbente viene dada por la siguiente expresión:

$$I_s = I_0 \tau_s; \quad I_s \alpha_s = I_0 \tau_s \alpha_s = I_0 (\tau \alpha)_s \quad \text{Ecuación 13: Energía solar incidente. [18]}$$

En la que  $\tau \alpha$ , se calcula para la radiación directa con el ángulo real de incidencia, mientras que la radiación difusa se considera como si fuese directa, pero con un ángulo de incidencia de 60°.

## 1.4 ENERGÍA EÓLICA.

¿Qué es la Energía Eólica?, es una pregunta que hoy en día se escucha más frecuentemente, y es que, ahora, son muchos países los que cuentan con este tipo de generación eléctrica, ya que cuando se habla de Energía Eólica se está hablando de la generación a través de la energía del viento, un recurso que es gratis y sobre todo inagotable, y que proviene principalmente de las diferencias de presión y temperatura que influyen en la formación de las corrientes de aire.

En realidad, la energía eólica, es un tipo de energía bastante antigua en utilizarse, y es que, en el siglo XIX se dice que se utilizaban aerogeneradores para el movimiento de molinos de viento que tenían la función de bombear agua o simplemente para moler, sin embargo, no fue hasta después, que la generación de electricidad a través de los aerogeneradores ha venido tomando un papel sumamente importante y que viene a competir con los demás tipos de generación eléctrica que existen.

### 1.4.1 Ventajas de la energía eólica.

- ✓ Es un tipo de energía renovable, es decir, que el viento dejará de existir hasta que el sol se extinga o la atmósfera desaparezca.
- ✓ La energía eólica es un tipo de energía limpia, que no tiene emisiones de gases de efecto invernadero.
- ✓ Este tipo de energía posee un impacto ambiental de sus instalaciones, relativamente pequeño, en comparación a los tipos de energías no renovables.
- ✓ Proporciona diversificación rural.

- ✓ Se puede decir, que el coste de producción y el tamaño de los componentes que se utilizan para su generación han disminuido considerablemente en las últimas décadas.

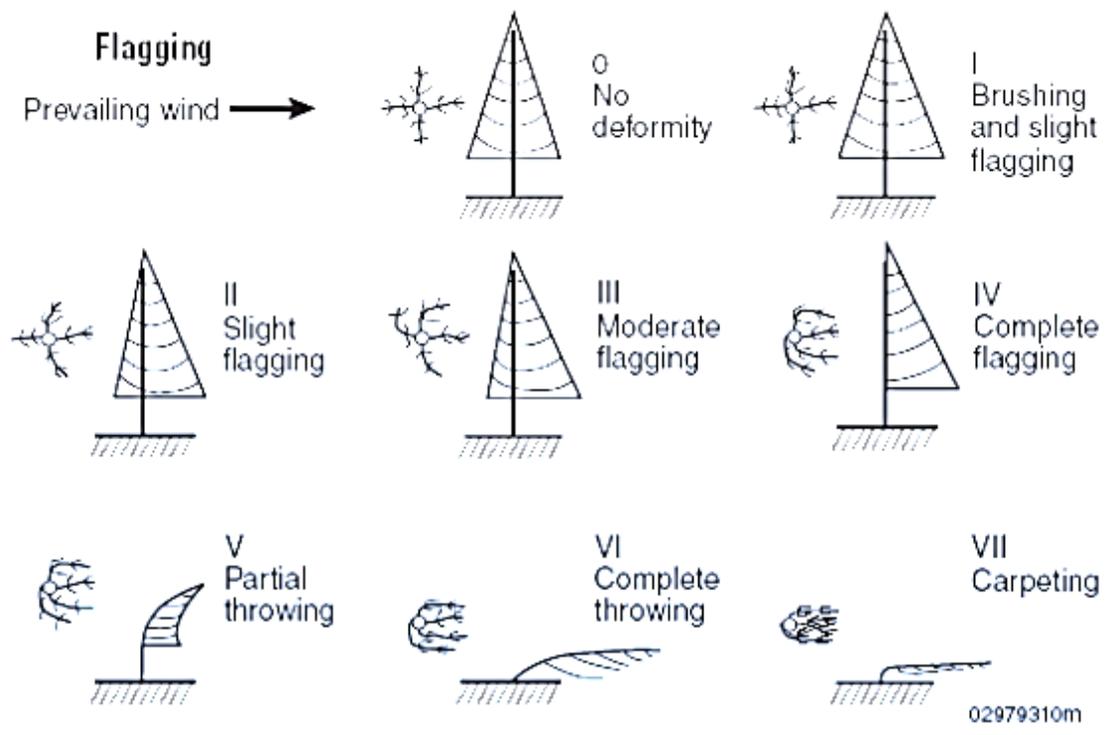
#### 1.4.2 Datos del sitio de largo plazo.

Se recomienda hacer un estudio previo a la realización de cualquier proyecto que trate sobre generación eólica, ya que es ahí donde se extraerán los parámetros más importantes que indicarán si el terreno es adecuado para dicho fin o no, entre las características más importantes del estudio a realizar se tienen:

- Exposición del sitio. (Un sitio bien expuesto es aquel que no tiene influencias de árboles o edificios.)
- Elevación del sitio a estudiar.
- Promedio mensual de la velocidad del viento.
- Alturas sobre el nivel del suelo.
- Obtener datos de la frecuencia de la velocidad y dirección del viento, que muestran direcciones en las que el viento es más fuerte y más débil.
- Recuperación de datos. (Número de horas de datos válidos vs total de horas disponibles).

#### 1.4.3 Cuantificación el recurso.

Este paso es bastante importante, ya que aquí es donde se debe analizar y observar la vegetación que rodea el lugar donde se planea hacer el estudio. Ya que los árboles se deforman permanentemente por los fuertes vientos, esta deformación que sufren lleva el nombre de “flagging” y principalmente se utiliza para estimar la velocidad del viento promedio en un área.



**Griggs-Putnam Index of Deformity**

Index	I	II	III	IV	V	VI	VII
Wind mph	7-9	9-11	11-13	13-16	15-18	16-21	22+
Speed m/s	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	10

Figura 42: Índice de deformidad “flagging”. [19]

Para tener una idea de cómo se interpreta la imagen anterior, donde se presenta el índice de deformidad “flagging”, a continuación se muestran dos imágenes de diferentes niveles de deformidad.



Figura 43: a) Clase II correspondiente a velocidades de 4 a 5 m/s. b) Clase VI correspondiente a velocidades de 8 a 9 m/s.[19]

1. Monitoreo directo por un sistema de medición del recurso de viento.
2. Conocer las direcciones de viento que más prevalecen en el sitio de estudio (mediciones tomadas sobre, abajo y a la altura exacta “sobre la superficie de la tierra” donde se desea colocar la torre de la turbina de viento).

#### 1.4.4 Aerogeneradores.

##### Reseña histórica.

Se comenzará con una pequeña definición acerca de lo que son los aerogeneradores, y es que, estos aparatos electrónicos son capaces de producir electricidad a precios competitivos con las fuentes energéticas convencionales, partiendo de una fuente natural, renovable y no contaminante de energía, como lo es el viento.

Hablando un poco de historia, el desarrollo tecnológico del aprovechamiento de la energía del viento para la producción de electricidad, viene desde finales del siglo XIX, gracias a

investigaciones realizadas en Estados Unidos por el Ing. Charles Brush (1888), y en Dinamarca por Paul Cour, quienes fueron los que diseñaron y construyeron los primeros aerogeneradores de la historia.

Charles F. Brush (1849-1929): Se considera como uno de los pioneros en la fabricación de aerogeneradores, y es que, se cree que fue él en 1888, quien construyó la primera turbina eólica para la generación de electricidad, es decir, el primer aerogenerador, cuyo diámetro era de 17m y 144 palas, utilizando como material madera de cedro, y turbinas de giro lento Aunque este aerogenerador era demasiado grande, solamente era capaz de generar 12kW de potencia.

Poul la Cour (1846-1908): Fue él, el encargado de mejorar el diseño de aerogenerador del Ing. Brush, ya que descubrió que las turbinas eólicas de giro rápido y con pocas palas de rotor, eran mucho más eficientes para generar electricidad que las de giro lento, además, construyó su propio túnel de viento para realizar pruebas y experimentos con su nuevo descubrimiento.

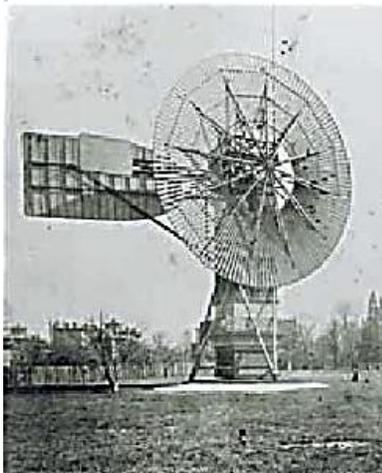


Figura 44: a) Turbina eólica (Charles Brush). b) Aerogenerador (Paul la Cour). [20]

Al principio, debido a la dificultad del recurso eólico (variabilidad, poco predecible y baja densidad energética) y al bajo costo de la generación de centrales térmicas e hidráulicas,

es que no había competitividad para la utilización de los sistemas eólicos para generar electricidad, pero, no fue hasta el año de 1973, luego de una crisis energética que se vivió, fue cuando aparecieron los primeros aerogeneradores comerciales, desde ese momento, hasta hoy en día, ha existido un notable desarrollo que permite afirmar que la tecnología de aerogeneradores, es una tecnología confiable, donde se ha llegado al punto de que se pueden adquirir en el mercado mundial en este momento, aerogeneradores de más de veinte fabricantes diferentes, con garantías de varios años.

Se entiende la pequeña potencia aquella que está por debajo de los 100kW, mientras que como media potencia se entiende que son aquellas de algunos cientos de kW, o dicho de otra forma, son aquellas máquinas cuya superficie de captación, tenga una dimensión característica entre 25m y 50m (diámetro del rotor), para este caso, se estará trabajando con una máquina que entrega pequeña potencia, ya que es para efectos ilustrativos y académicos.

En la actualidad, existen fabricantes españoles en el rango de la pequeña potencia, o como comúnmente se le llama, micropotencia, estos son: BORNEY y SOLENER, aunque también existen fabricantes de aerogeneradores que se encuentran en el rango de 100kW a 1500kW, que es donde queda incluida más del 90% de la fabricación mundial, entre ellas tenemos: GAMESA Eólica, ECOTÉCNIA S. Coop, entre otras.

Con el paso del tiempo, la evolución en la construcción de los aerogeneradores ha venido mejorando, ya que se han construido aerogeneradores con un diámetro de rotor mayor que los primeros que se crearon, esto es una gran ventaja, porque entre más grande es el diámetro del rotor, mayor será el área de barrido de las palas, en la siguiente figurase muestra la relación mencionada.

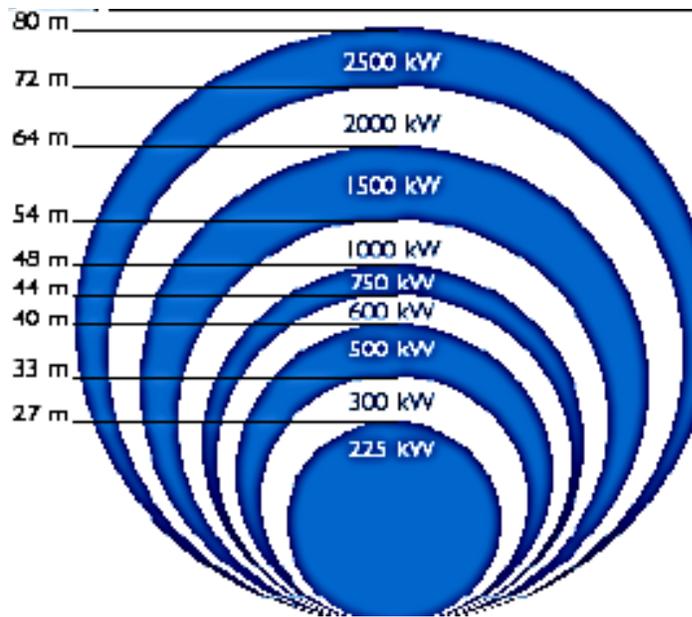


Figura 45: Relación entre la potencia nominal y el diámetro de rotor de una turbina eólica moderna.[20]

#### 1.4.5 Clasificación del viento.

El viento es el elemento principal para la generación de energía Eólica, la potencia disponible es proporcional al cubo de la velocidad del viento, es decir, cuando hay un incremento de velocidad en el viento, existe un incremento sustancial de potencia.

La dirección de la velocidad del viento viene dada por la dirección de donde éste proviene y no para donde se dirige, como ejemplo, se puede decir, que un viento del Oeste, es un viento que se dirige hacia el Este, pero que proviene del Oeste.

A continuación se presentará una tabla, que muestra la escala de la velocidad del viento a una distancia de 10m de altura, cabe mencionar que las escalas presentadas son en m/s y nudos, además se muestra la escala de Beaufort, que es una escala empírica, pero que clasifica al viento en 12 niveles diferentes.

Velocidades del viento en m/s	Tipo	Descripción
0.0 - 0.4	0	Calma
0.4 - 1.8	1	Ligero
1.8 - 3.6	2	
3.6 - 5.8	3	
5.8 - 8.5	4	Moderado
8.5 - 11.0	5	Fresco
11.0 - 14.0	6	
14.0 - 17.0	7	
17.0 - 21.0	8	Temporal
21.0 - 25.0	9	
25.0 - 29.0	10	Fuerte temporal
29.0 - 34.0	11	
> 34.0	12	Huracán

Tabla 3: Escala de clasificación del viento en función de su velocidad. [19]

Algunas de las conversiones que no se pueden dejar a un lado son las siguientes:

$$1 \text{ m/s} = 3.6 \text{ Km/h} = 2.237 \text{ millas/h} = 1.944 \text{ nudos}$$

$$1 \text{ nudo} = 1 \text{ milla náutica/h} = 1.125 \text{ millas/h} = 0.5144 \text{ m/s}$$

Cabe mencionar que en el hemisferio norte el viento tiende a girar en el sentido contrario al de las agujas del reloj (visto desde arriba) cuando se acerca a un área de bajas presiones. En el hemisferio sur el viento gira en el sentido de las agujas del reloj alrededor de áreas de bajas presiones.

A nivel de superficie terrestre, los vientos se devuelven hacia el Ecuador como vientos alisios. Debido a la rotación de la tierra su dirección se desvía hacia el Oeste en los dos Hemisferios Norte y Sur. Es por esto que la dirección de los vientos alisios es Nor-Este y Sur-Este.

A continuación se muestra en la Figura 46, el patrón global de la circulación atmosférica en la superficie de la Tierra, en donde se puede observar lo anteriormente descrito.

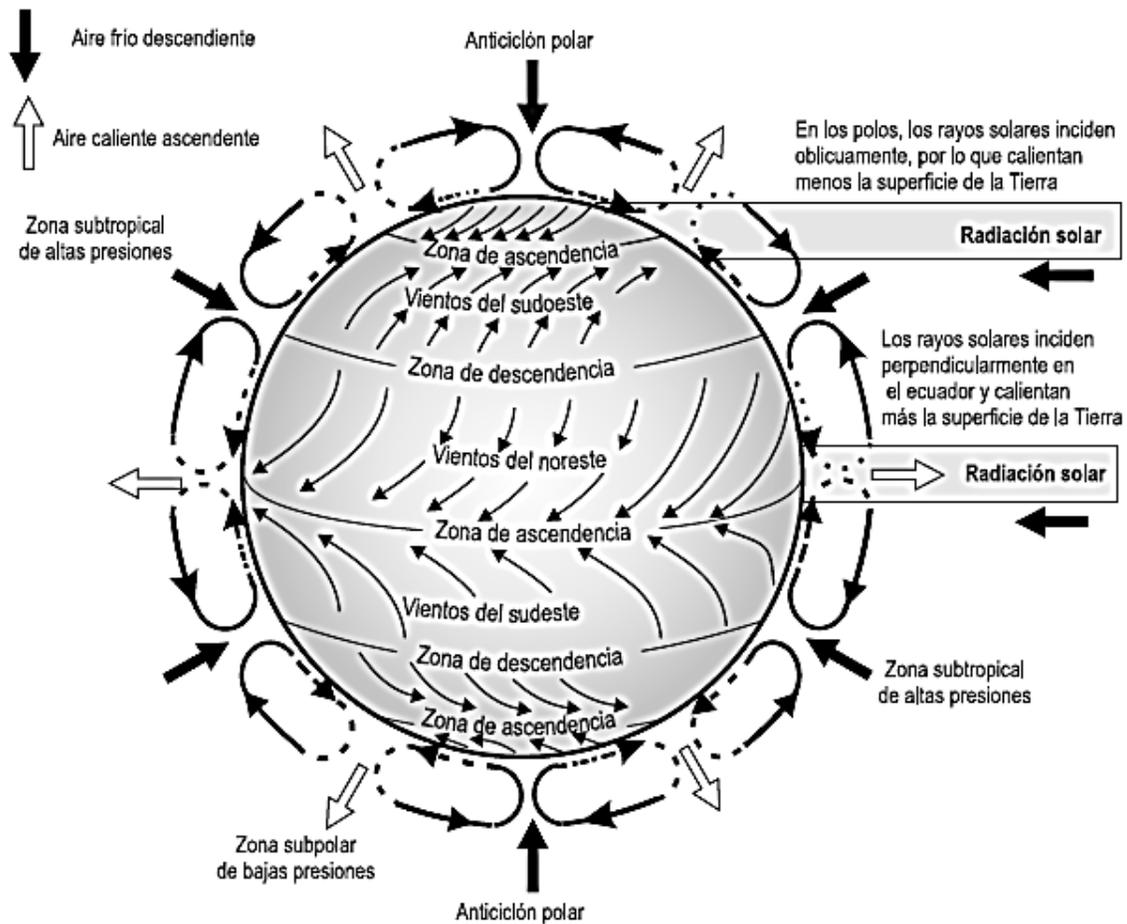


Figura 46: Efecto de la fuerza de Coriolis en la circulación atmosférica general.[21]

#### 1.4.6 Variabilidad de la velocidad del viento.

La variabilidad en la dirección del viento está dada por un diagrama que se conoce con el nombre de La Rosa de los Vientos, ya que es un diagrama polar que puede ser construido mostrando el porcentaje del tiempo en el cual el viento ha estado soplando en una

dirección específica, la finalidad de este diagrama es identificar cuáles son las direcciones prevalecientes en las cuales, el viento sopla con mayor duración.

Variabilidad del viento a corto plazo.

El contenido energético del viento varía continuamente, esto se da por que el viento siempre está fluctuando, pero esta fluctuación, depende de las condiciones climáticas así como de las condiciones de superficie local y de los obstáculos que se encuentran en el medio, con esta característica se puede definir que la producción de energía de un aerogenerador puede variar según varíe el viento, es decir, cuando la velocidad del viento sea débil, la generación del aerogenerador será mínima, aunque se puede compensar con la inercia del rotor.

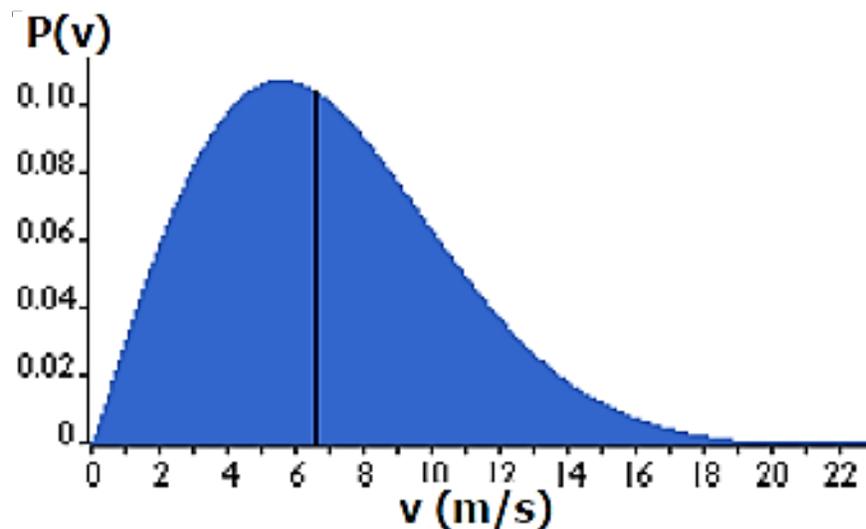
Variaciones diurnas y nocturnas del viento.

Según estudios que se han realizado en diferentes países del mundo, se ha encontrado que en varias regiones, el viento sopla más fuerte durante el día que en la noche, se cree que esta diferencia de velocidades se debe a las diferencias de temperaturas, ya que en el día la temperatura que hay entre la superficie del mar y la superficie de la tierra es mayor que en la noche. Esto podría ser una ventaja, ya que la mayor cantidad de energía consumida, se da en el día, y como el viento sopla más fuerte de día, entonces la generación es un poco mayor que en la noche.

#### 1.4.7 Descripción de las variaciones del viento.

El tema de las variaciones del viento es muy importante para el diseño de los aerogeneradores, ya que cuando los fabricantes cuentan con esta información, la construcción del aerogenerador se vuelve más óptima y se logran minimizar los costes de generación.

Generalmente, como se ha mencionado, los vientos clasificados como fuertes son raros que se den continuamente en cualquier región del mundo, si bien, los vientos más comunes que suelen darse son los vientos frescos o moderados. La variación del viento se describe con un método llamado Distribución de Weibull, a continuación se muestra una gráfica con una curva típica que describe la variación del viento, es una curva para fines ilustrativos.



Gráfica 10: Distribución de Weibull.[20]

Este tipo de gráfica muestra una distribución de probabilidad, cuyo valor del área que se encuentra bajo la curva debe de ser siempre exactamente 1, ya que la probabilidad de que el viento sople a cualquier valor de velocidades mostradas ahí, incluyendo el 0, debe de ser del 100%.

Analizando la Gráfica 10, se puede observar que en el valor de 6.6 m/s se encuentra una línea vertical, que marca la mediana de distribución, esto quiere decir, que la mitad del tiempo, el viento sopla a una velocidad menor que 6.6 m/s y la otra mitad sopla a valores mayores de 6.6 m/s. Además de ello, el valor de 5.5 m/s es el llamado valor modal de la distribución, y esto es así, porque a esa velocidad se dan los vientos más comunes.

Finalmente, si se multiplica cada intervalo de la velocidad del viento por la probabilidad de tener esa velocidad particular, y luego se suman todos los datos obtenidos, se encuentra el valor de la velocidad media del viento, esto se puede realizar con un software matemático para facilitar el análisis.

La forma de la gráfica, no será similar en todas las mediciones realizadas, ya que las velocidades del viento varían en las diferentes regiones del mundo, aunque la gráfica anterior, muestra un bosquejo de la forma que la gráfica tomará con los datos que se vayan obteniendo según las mediciones que se vayan realizando.

Otro dato importante que se puede obtener, es que, si se multiplica la potencia de cada velocidad del viento, con la probabilidad correspondiente en la gráfica de Weibull, se obtiene el valor de distribución de energía eólica a diferentes velocidades del viento, que es lo mismo a lo que se le llama densidad de potencia.

#### 1.4.8 Coeficiente de potencia de un aerogenerador.

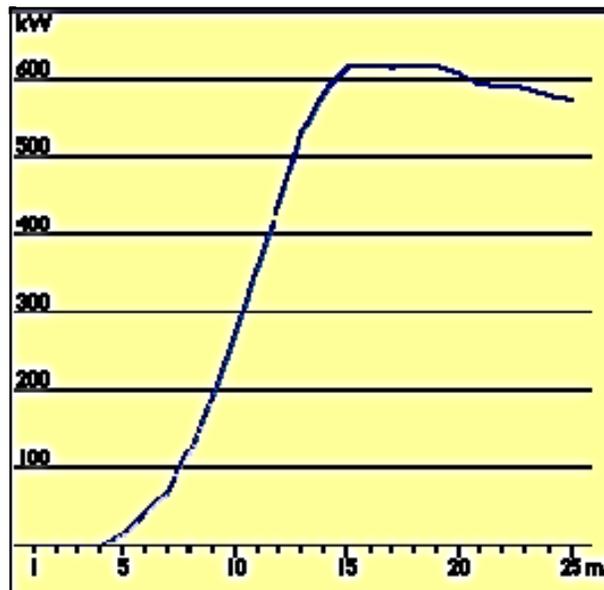
El coeficiente de potencia indica con qué potencia el aerogenerador convierte la energía del viento en electricidad, para poder calcular este valor, lo que se hace es dividir la potencia eléctrica disponible, por la potencia eólica de entrada, en otras palabras, se divide la curva de potencia entre el área del rotor y así se obtiene la potencia disponible por metro cuadrado del área del rotor, finalmente, para cada velocidad del viento, se divide el resultado entre la cantidad de potencia en el viento por metro cuadrado.

#### 1.4.9 Curva de potencia de un aerogenerador.

La curva de potencia de un aerogenerador, es una gráfica que indica cual será la potencia eléctrica disponible en un aerogenerador a diferentes velocidades del viento, cabe mencionar, que este tipo de gráficas se obtienen a través de mediciones realizadas en el campo, en donde se coloca un anemómetro, preferiblemente sobre un mástil

relativamente cerca del aerogenerador, no se coloca sobre el mismo aerogenerador ni tan cerca, ya que el rotor de éste puede crear turbulencia, entonces, la medida de la velocidad del viento puede ser de poca credibilidad o engañosa. Si la velocidad del viento no varía tan rápido, se pueden usar las medidas de la velocidad del viento realizadas con el anemómetro, y así leer la potencia eléctrica disponible, directamente del aerogenerador.

A continuación, se mostrará una gráfica típica de potencia (Gráfica 11), como en la gráfica de la distribución de Weibull (Gráfica 10), los datos aquí mostrados, son con fines ilustrativos, y no se trata de alguna medición que se haya realizado aún, en nuestra investigación.



Gráfica 11: Curva de potencia de un aerogenerador.[20]

Este tipo de gráfica, generalmente lo que debe mostrar son velocidades características, entre ellas se tiene:

- Velocidad de conexión: Es aquella velocidad para la que están diseñados los aerogeneradores para comenzar a girar, generalmente son velocidades entre los 3

a 5 m/s, en esta gráfica se puede observar una pequeña cantidad de potencia perdida, debido al hecho que el rotor comienza a girar a partir de 4 m/s.

- Velocidad de corte: Los aerogeneradores poseen un dispositivo que permite regular el giro de éstos con altas velocidades del viento, para evitar posibles daños al rotor, entonces, a la velocidad del viento de regulación se le denomina velocidad de corte.

#### 1.4.10 Incertidumbres en mediciones de curvas de potencia.

En la vida real, la velocidad del viento siempre está fluctuando y no se puede medir exactamente la columna de viento que pasa a través del rotor del aerogenerador, una opción sería colocar un anemómetro justo enfrente del aerogenerador, pero esto no se debe hacer, ya que no es una solución fiable, porque el aerogenerador también proyectará un abrigo que frenará el viento enfrente de él, entonces, lo que se hace es tomar un promedio de las diferentes medidas para cada velocidad del viento, posteriormente, se dibuja el gráfico con esos promedios. Ya que es difícil realizar medidas exactas de la propia velocidad del viento, pueden existir errores de hasta un  $\pm 10\%$  hasta en las curvas certificadas, es por tal motivo, que las curvas de potencia están basadas en medidas realizadas en zonas de baja intensidad de turbulencias, y con el viento viniendo directamente hacia la parte delantera del rotor.

#### 1.4.11 Tipos de Aerogeneradores.

Los aerogeneradores que existen en el mercado y que se utilizan para pequeña potencia son aerogeneradores de eje horizontal, tripala o barlovento, con un generador síncrono de imanes permanentes, orientados por timón de cola y con regulación de la velocidad mediante cabeceo o cambio de paso pasivo, este tipo de aerogeneradores dispone de un sistema redundante de frenado, siendo uno de los sistemas, un frenado mecánico.

A medida se vaya avanzando en la investigación, se irán introduciendo nuevos términos, entre ellos se tiene el término barlovento y sotavento, con los cuales hay que ir familiarizando desde un principio.

Y es que, barlovento es la parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado, mientras que sotavento, es la parte hacia donde se dirige el viento.

Se dice que en un aerogenerador, su rotor o hélice están en configuración de barlovento cuando éstas se enfrentan al viento. La mayor ventaja de este tipo de aerogenerador es que en esta configuración se evita la influencia de la sombra aerodinámica de la torre.

Mientras que su rotor o hélice se encuentran en sotavento, cuando éstas se mueven con el viento que sale tras la góndola, la ventaja de esta configuración, es que el anemómetro no necesita un dispositivo de orientación, además que permite emplear materiales más flexibles para las palas de éste.

Como desventaja con un rotor situado a barlovento es que necesita un rotor más rígido, con excelentes propiedades mecánicas y que se sitúe a una distancia razonable de la torre, para que no exista interferencia entre ambos, ya que debido a los esfuerzos a los que estará expuesto, las palas del aerogenerador pueden flexionarse en dirección a la torre.

En cuanto a un rotor situado a sotavento, como desventaja se puede encontrar es que la fluctuación de la potencia del viento, pase por el rotor por la sombra que produce la torre, con esto se tienen cargas de fatigas mayores sobre las palas.

#### 1.4.12 Partes que componen un aerogenerador.

Como se mencionó antes, el sistema a utilizar durante este trabajo es uno diseñado para pequeña potencia, entonces, a continuación se describirá algunos de los parámetros que se necesitan para la construcción de éste, así como algunos métodos para que el desempeño de estos sea el más óptimo.

Existen diversos tipos de aerogeneradores en el mercado, aunque la mayor parte de ellos son aerogeneradores de eje horizontal en barlovento (reciben el viento de frente), y poseen los siguientes subsistemas: rotor, generador eléctrico, sistema de frenado, sistema de orientación, sistema de regulación de velocidad de giro y torre soportante, algunos de estos componentes se pueden apreciar en la Figura 47 También se pueden encontrar aerogeneradores de eje horizontal en sotavento e igual manera, se encuentran aerogeneradores de eje vertical, pero estos dos últimos tienen una menor demanda en el mercado, de los pequeños aerogeneradores, el aerogenerador de mayor potencia es de 40kW y 12m de diámetro, mientras que el más pequeño es de 5W y 0.53m de diámetro.

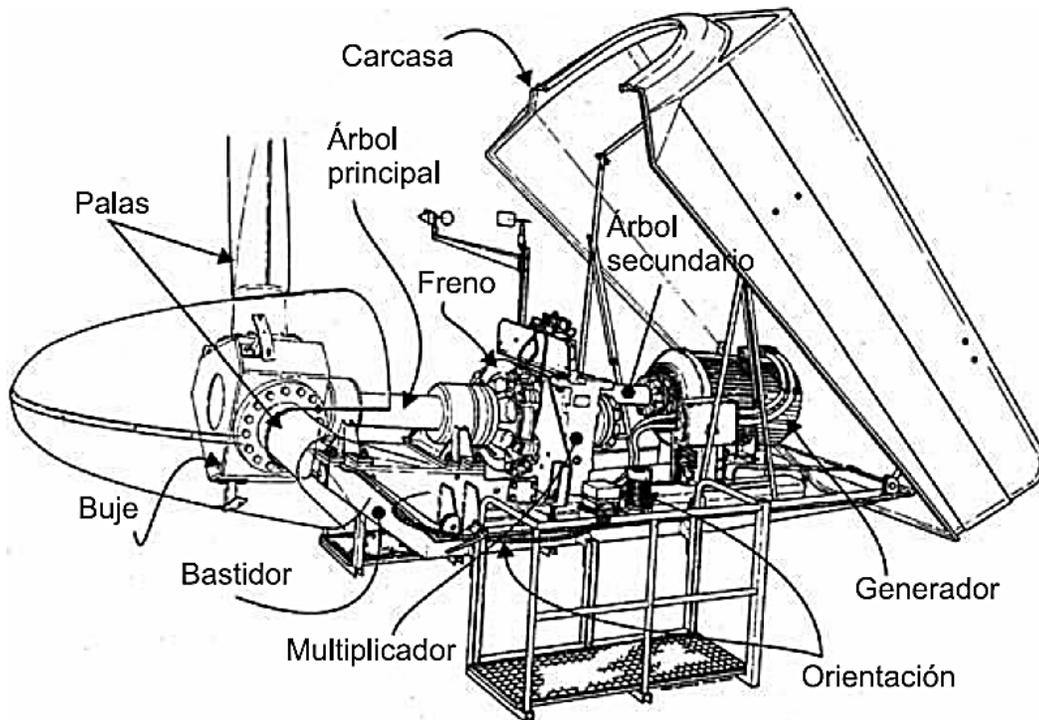


Figura 47: Partes que componen un aerogenerador.[22]

Rotor.

Pero, a qué se refiere exactamente cuándo se dice eje horizontal o vertical, pues se refiere al rotor del aerogenerador, la tecnología utilizada en los aerogeneradores de eje horizontal varía desde rotores de 2 palas, hasta rotores de 6 palas, aunque los modelos

que más demandas tienen, son aquellos que tienen dos palas, llamados bipalas, y los que tienen 3 palas, llamados tripalas.

Aunque cabe destacar, que los aerogeneradores que poseen dos palas, presentan niveles más altos de ruido aerodinámico, entonces, esto es una barrera que muchas veces impide su uso en diferentes aplicaciones. La mayoría de los pequeños aerogeneradores emplean materiales compuestos para la fabricación de las palas, el material más usado es la fibra de vidrio reforzada con poliéster, y con el avance de las tecnologías, hoy en día se emplea la fabricación de palas con fibra de carbón.

#### Generador eléctrico

Otra parte importante que forma parte de la composición de los aerogeneradores, es el generador eléctrico, y es que, casi todos los diseños, de aerogeneradores de pequeña potencia, usan conexión directa entre el rotor del aerogenerador y el generador eléctrico, sin ninguna existencia de caja de multiplicación, como lo poseen los aerogeneradores a gran potencia.

Se dice que en los aerogeneradores de baja potencia, el tipo de generador utilizado es un alternador de imanes permanentes de 4, 6, 8 o 10 polos, este diseño es para aerogeneradores cuya potencia sea menor que los 3kW.

#### Sistema de regulación de velocidad.

Como es sabido, los aerogeneradores deben poseer lo que es un sistema de regulación de velocidad, para evitar daños al sistema completo de conexión, para ello, existe la norma UNE-EN 61400-2[22] que en su apartado 5 sobre protección de los aerogeneradores dice textualmente: “Deben utilizarse uno o más sistemas de protección si es necesario, para

mantener el aerogenerador dentro de los límites de diseño. En particular, deben existir medios disponibles para prevenir que se supere la velocidad límite de rotación de cálculo”

Para regular la velocidad y la potencia de giro en los pequeños aerogeneradores, existen algunas soluciones que pueden ser de mucha utilidad a la hora de implementar este sistema de generación eléctrica en este proyecto, algunas de ellas son: Sin regulación, Regulación por desorientación, Regulación por cabeceo y Regulación por cambio de paso.

Según estudios realizados, no resulta económico instalar un gran generador eléctrico que sea capaz de convertir en electricidad toda la potencia contenida en las altas velocidades del viento, entonces, esta potencia que no puede ser absorbida provoca sobre velocidades de giro que traen como resultado excesivas altas fuerzas centrífugas e indeseables ruidos y vibraciones.

A continuación se dará una pequeña descripción de en qué consiste cada una de las soluciones mencionadas anteriormente.

1. Sin Regulación: Es cuando un aerogenerador está diseñado para poder soportar las cargas que se produzcan en todas las condiciones de operación, incluidas las velocidades de giro que puedan presentarse en funcionamiento en vacío.
2. Regulación por Desorientación: Esto se da cuando el eje del rotor está desalineado con el plano horizontal respecto a la dirección del viento incidente, es decir, esta desorientación del rotor se da mediante un diseño en el que el centro de empuje del rotor no queda alineado con el centro de rodamiento de orientación.
3. Regulación por Cabeceo: Es justamente igual a la regulación por desorientación, con la única diferencia que en este caso la desalineación se produce en el plano

vertical y no en el horizontal, cabe destacar que este es el sistema más utilizado, debido al empuje, y por cambio de paso centrífugo y eléctrico.

4. Regulación por Cambio de Paso: Se da cuando se eliminan los rodamientos en el encastre de las palas, diseñando el cuello de la pala con baja resistencia a torsión, lo que permite que las cargas que actúan sobre la pala, sean capaces de producir giro de la misma sobre su eje.

Para aprovechar el mayor rendimiento de los pequeños aerogeneradores, lo que hay que hacer es conseguir una regulación adecuada mediante sistemas pasivos, ya que las soluciones con mecanismos activos de paso variable, nos permiten realizar diseños más complejos, y por tanto, más caros y con mayor labor de mantenimiento.

Sistema de frenado.

Ahora se hablará un poco acerca del sistema de frenado en los aerogeneradores de pequeña potencia, y es que, la norma UNE-EN 61400-2[22] en el apartado 5 que habla sobre protección de los aerogeneradores dice textualmente: “El fabricante deberá precisar un procedimiento seguro para detener el aerogenerador”, además de ello define la palabra “freno” como “mecanismo capaz de reducir la velocidad del rotor o detener la rotación”.

Se dice que en la mayoría de ocasiones, en la descripción técnica de los aerogeneradores, el o los fabricantes indican cual es el sistema de control de velocidad como sistema de frenado, pero eso no es suficiente para detener al aerogenerador en todas sus condiciones de funcionamiento.

Existen aerogeneradores que poseen un solo sistema de frenado, siendo este sistema el de cortocircuito del generador eléctrico, pero hay otros modelos, que poseen dos

sistemas de frenado, siendo el principal el freno mecánico o aerodinámico, mediante posicionamiento de las palas en la posición de bandera, es decir, las posiciones de las palas se igualan antes de llevarlas hasta la posición segura de paro. Como sistema secundario se utiliza el freno mecánico, aerodinámico o por cortocircuito del generador eléctrico, esto dependerá de la solución que se utilice para el sistema de frenado principal.

En cuanto se refiere a los aerogeneradores de gran potencia, éstos deben estar diseñados para que trabajen todo el tiempo mientras el viento sea capaz de moverlo, es decir, no pueden ser diseñados pensando en que estarán parados sin generar energía, pero también deben de ser diseñados con un sistema de parada de emergencia por si se presentan problemas de pérdidas de balance del rotor o fallo eléctrico, o simplemente si se necesita desmontar la turbina de la torre. Este sistema de parada de emergencia consiste en un mecanismo capaz de reducir la velocidad del rotor hasta detenerlo totalmente a una velocidad del viento máxima, cuyo dato, generalmente es proporcionado por el fabricante.

Sistema de orientación.

Con respecto al sistema de orientación del aerogenerador que se utilizará en este proyecto es el de orientación por veleta de cola ya que es un aerogenerador de pequeña potencia. Si bien es sabido, todos los aerogeneradores de eje horizontal tienen un cojinete alrededor del cual gira y se coloca de frente al viento, a la línea vertical que pasa por este cojinete se le conoce como eje de orientación, pero este sistema de orientación es para aerogeneradores de gran potencia, ya que los pequeños aerogeneradores no tienen espacio para instalar los mecanismos de transmisión y los motores eléctricos que orientan al rotor de frente al viento, presentes en los grandes aerogeneradores. Por esto, el sistema de orientación de estos pequeños aerogeneradores es por veleta de cola, excepto en los modelos a sotavento (o de espalda al viento), que no la necesitan porque aparecen

las veletas tanto de forma recta horizontal, como elevada con respecto al eje de rotación del rotor.

Pero, ¿A qué se refiere cuando se dice orientación por veleta de cola?, la respuesta es simple, y es que, la veleta se coloca al final de un brazo, ésta captura el viento y aparece una fuerza lateral resultante sobre la veleta, que actúa sobre el brazo que hace girar la máquina sobre el eje de orientación para colocarla de frente al viento. El momento producido por la veleta es simplemente la fuerza lateral multiplicada por la longitud del brazo. La fuerza lateral depende del área de la veleta y de la velocidad del viento al cuadrado. Como regla simple se puede asumir que la longitud del brazo debe ser igual a la longitud de la pala del rotor, el área de la veleta no debe ser menor que 3% del área de barrido del rotor.

Torres.

Con respecto a las torres de los aerogeneradores, las más encontradas son las autoportantes y las atirantadas o con tensores, las tubulares y las de celosía. Los tensores son generalmente indeseables por ser vulnerables a accidentes y daños, en la Figura 48, se muestran estos tipos de torres mencionadas.

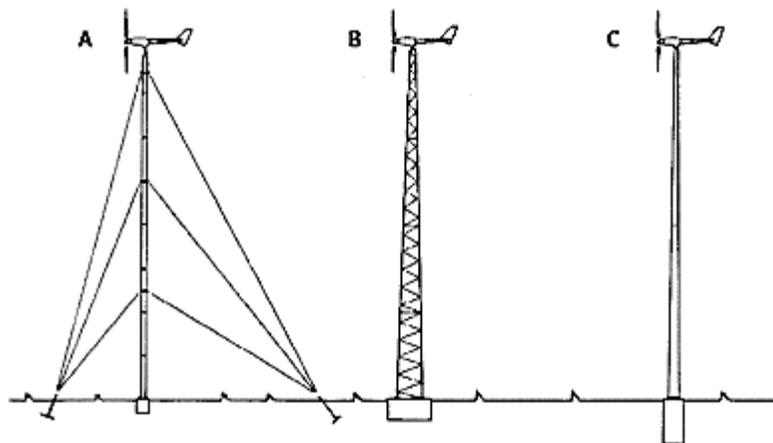


Figura 48: (A) Torres Autoportantes, atirantadas o con tensores. (B) Torres de Celosía. (C) Torres Tubulares.[23]

Las torres autoportantes son las más preferidas, pero están sometidas a mayores tensiones, son más pesadas y más caras, la más frecuente es la tubular con tensores, estas deben ser capaces de resistir las fuerzas máximas que aparecen durante el izaje y las tormentas. En el mercado, las alturas comunes de las torres que se pueden encontrar son de 6, 8, 12, 18, 24, 30 y 40 metros.

#### 1.4.13 Anemómetro.

El anemómetro es el instrumento que se utiliza para medir la velocidad instantánea del viento, y algunos de ellos, pueden medir la dirección de éste, en grados, cabe mencionar que, para tener lecturas más acertadas de este dispositivo, las medidas que se deben tomar son las de un promedio de cierto tiempo, ya que si se toman las medidas instantáneas pueden existir errores bastantes considerables, esto se puede dar por alguna ráfaga de viento que trastorne las lecturas del anemómetro, además, algunos anemómetros cuentan con una veleta, cuya función es determinar la dirección del viento.

Tipos de anemómetros.

Existen diferentes tipos de anemómetros, entre los principales se tienen:

- De rotación (copas o cazuelas): Este es el tipo más común de anemómetros que existe en el mercado, incluyen de tres a cuatro copas montadas sobre un rotor vertical, en el que, las copas atrapan el viento, y esto hace que el rotor comience a girar, entonces, cada vez que el anemómetro completa un giro, se mide la velocidad del viento en base al número de revoluciones por minuto (rpm), el número de las revoluciones por minuto se registra en función del tiempo y es aquí donde se obtiene el promedio de las mediciones.

- De compresión: Este modelo de anemómetro está basado en el tubo de Pitot, que es un tubo con forma de L, con uno de sus extremos abierto hacia la corriente de aire, mientras que el otro extremo se conecta a un dispositivo que mide la presión, y está formado por dos pequeños tubos, el primero con un orificio frontal, que es el que mide la presión dinámica, y otro orificio lateral, que es el que mide la presión estática, y el otro tubo solo posee un orificio lateral. La diferencia que se mide entre las dos presiones, permite determinar la velocidad del viento.
- Sónico: Este tipo de anemómetros utiliza ondas de sonido ultrasónico para medir la velocidad y dirección del viento, y pueden tomar medidas muy precisas. Estos anemómetros consisten de dos pares de dispositivos de ultrasonido que envían y reciben ondas sonoras, midiendo de esta manera, que tan rápido y en qué dirección se desplaza el viento entre ellas.

Para el caso del laboratorio de energías renovables, se trabajará con un anemómetro de rotación, el cual se describirá a continuación.

Anemómetro de rotación.

Como se mencionó anteriormente, este es el anemómetro más utilizado en la actualidad, y a continuación, se mostrarán la Figura 49 y Figura 50, en las cuales se podrán observar sus características, que indican, si el instrumento tiene o no, un diseño adecuado para la medición del viento.

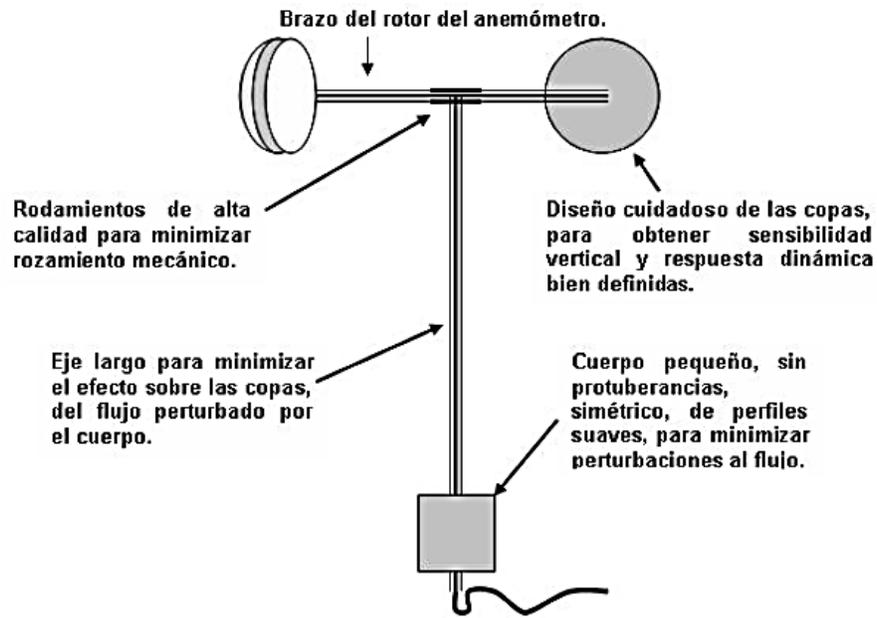


Figura 49: Características de un correcto diseño para un anemómetro de rotación.[23]

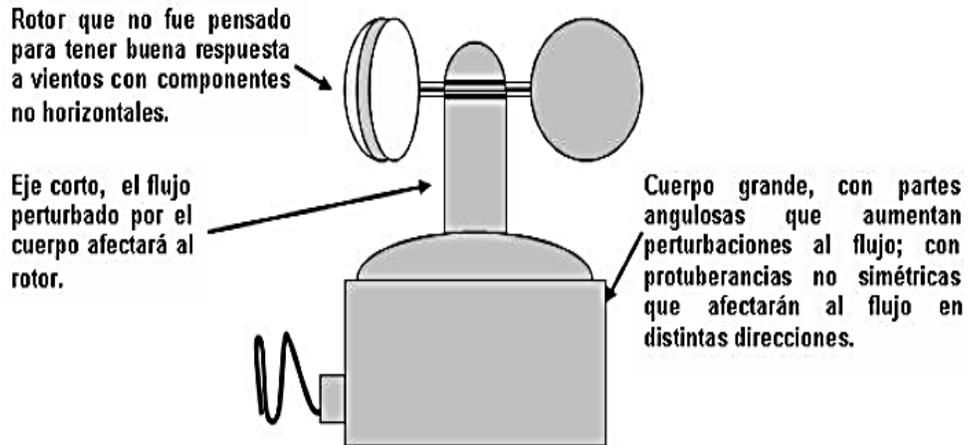


Figura 50: Características de un mal diseño para un anemómetro de rotación.[23]

En las dos figuras anteriores, se describen las características más importantes y que se deben tomar muy en cuenta cuando se adquiere un anemómetro, ya que pueden existir muchos dispositivos de baja calidad, por su mal diseño, que incluso pueden dar errores de medición entre el 5% al 10%, con lo cual, se estarán obteniendo datos erróneos, es por

ello que se debe muy en cuenta las características que definen un buen diseño para este tipo de anemómetro.

Principio de operación.

En el anemómetro, un imán de neodimio está insertado en el cono superior, este cono está montado en un eje de acero a través de micro rodamientos de baja fricción. Las tres copas de plástico van montadas en el cono de teflón, en cada giro completo el imán activa un sensor magnético montado en el eje, el tren de pulsos producido por el giro es llevado desde el sensor a la electrónica de control que se encarga de procesar y guardar los datos de acuerdo a la configuración del software de control que se esté utilizando. Generalmente, el anemómetro está diseñado para registrar velocidades de viento en el rango de 0 m/s a 10 m/s, las velocidades típicas de sistemas de generación eólico de imanes permanentes están comprendidas entre 3 m/s a 10 m/s.

Montaje de los anemómetros de rotación.

Cuando se tiene un anemómetro bien calibrado, y para que dé garantías de exactitud en las mediciones que éste realice, hay que tener en cuenta una serie de consideraciones, las cuales se describirán en este apartado.

Los instrumentos de medición, como anemómetros y veletas, se deben de ubicar en una torre anemométrica, dichos instrumentos, deben ser montados en un brazo o en la cima de la torre, ya que, la forma en que el anemómetro quede finalmente ubicado, puede introducir o no, incertezas de magnitud, pequeñas, pero que serán del mismo orden o mayores que las de calibración o de diseño, obviamente, esto tiene que evitarse.

Es muy claro que si el anemómetro se encuentra ubicado en la parte inferior de la torre anemométrica, las mediciones tomadas no reflejarán datos reales, y si se instala en la

cima de la torre, para obtener datos reales, deben de seguirse ciertos parámetros para evitar errores significativos. La ubicación adecuada del anemómetro es aquella, cuyas distorsiones de las mediciones, provocadas por la torre anemométrica y el brazo, sean menores que el 1% y el 0.5%, respectivamente.

Si el anemómetro es instalado en la parte superior de la torre anemométrica, la separación entre el rotor del anemómetro y la parte superior de ésta, debe de ser por lo menos de 1.5m, pero también, el anemómetro puede ser instalado en la parte inferior del aerogenerador, colocando un brazo sujetado a la torre, la mayoría de torres, son tubulares y de sección circular, en este caso, la separación mínima entre el eje del rotor y el eje de la torre, se tomará de 4 veces el diámetro de la torre.

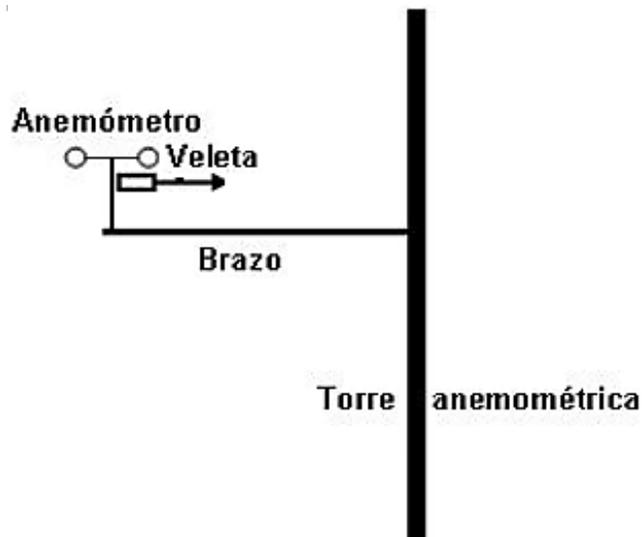


Figura 51: Instalación de anemómetro y veleta.[23]

Cuando el anemómetro sea instalado, como se presentó en la figura anterior y para mantener la perturbación a valores menores del 0.5%, el rotor del anemómetro debe estar separado verticalmente del brazo, por lo menos 15 veces el espesor del brazo, este valor de separación se tomará como mínima para la instalación.

Hay que tomar en cuenta que el anemómetro debe de quedar completamente libre de influencia de alambres tensores de la torre, cables, abrazaderas o de cualquier obstáculo que se encuentre cerca de la instalación, ya que esto puede producir protuberancias innecesarias en las mediciones.

Se recomienda que el brazo sea de sección circular, y no rectangular o angular, y el cable que conduce la señal eléctrica del rotor, debe de ir por dentro del brazo y por dentro de la torre, en caso que esta recomendación no se pueda seguir, el cable debe envolverse alrededor del brazo y la torre quedando bien sujetado a éstos.

A continuación se muestran dos imágenes que describen la correcta e incorrecta instalación de anemómetros sobre la torre anemométrica, donde, en una de las figuras, el viento sopla desde la izquierda de la torre, y la instalación evita cualquier obstáculo, mientras que en la otra se observa que el viento sopla desde la derecha de la torre, pero hay obstáculos que impedirán lecturas correctas del anemómetro.

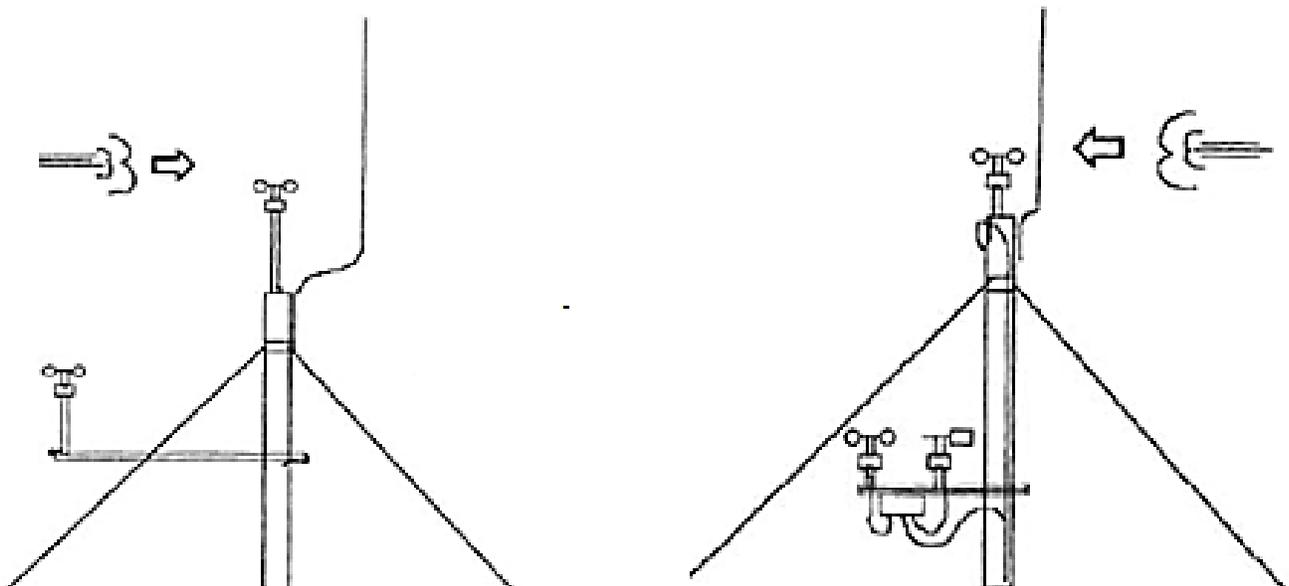


Figura 52: a) Ejemplo de anemómetros correctamente instalados. b) Ejemplo de anemómetros incorrectamente instalados.[23]

## 1.5 Caracterización del recurso Solar en El Salvador.

Para comenzar la caracterización del recurso solar se debe establecer la ubicación geográfica del punto de estudio, para el presente caso la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador será el punto de interés.

La ubicación geográfica es la siguiente:

Según la aplicación Google Maps las coordenadas de El Salvador son:

Latitud de El Salvador:  $13.926989^{\circ}$

Longitud de El Salvador:  $-89.210207^{\circ}$

La Biblioteca de la Universidad de El Salvador está ubicada en:

Latitud de Biblioteca. FIA:  $13.720466^{\circ}$

Longitud de Biblioteca. FIA:  $-89.202026^{\circ}$

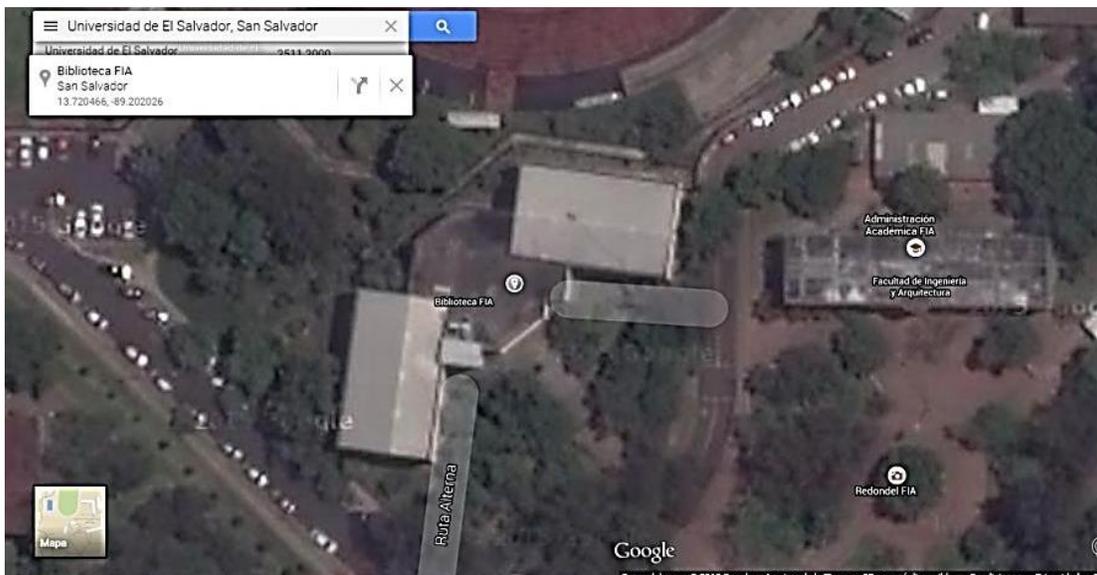


Figura 53: Ubicación geográfica de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, Fuente de imagen: aplicación Google Maps.[24]

Ahora bien el área total de la terraza de la Biblioteca es de:

Perímetro: 176.56 m

Área total de la edificación: 1,005.3181 m<sup>2</sup>

Área del laboratorio de energías renovables: 19.25 m<sup>2</sup>

Área ocupada por el techo: 660.7712 m<sup>2</sup>

Área ocupada por el plafón (instalación de colectores solares): 15.54 m<sup>2</sup>

Área sin construcción: 305.6746 m<sup>2</sup>

Perímetro = 80.4883 m

Lo cual, indica que el área útil de la terraza para la colocación de futuros sistemas fotovoltaicos es de 989.778 m<sup>2</sup> este valor se utilizará para la determinación del potencial del recurso solar.

En la Figura 54 se puede apreciar un plano arquitectónico de la vista en planta de la terraza del edificio de la Biblioteca de la FIA-UES.

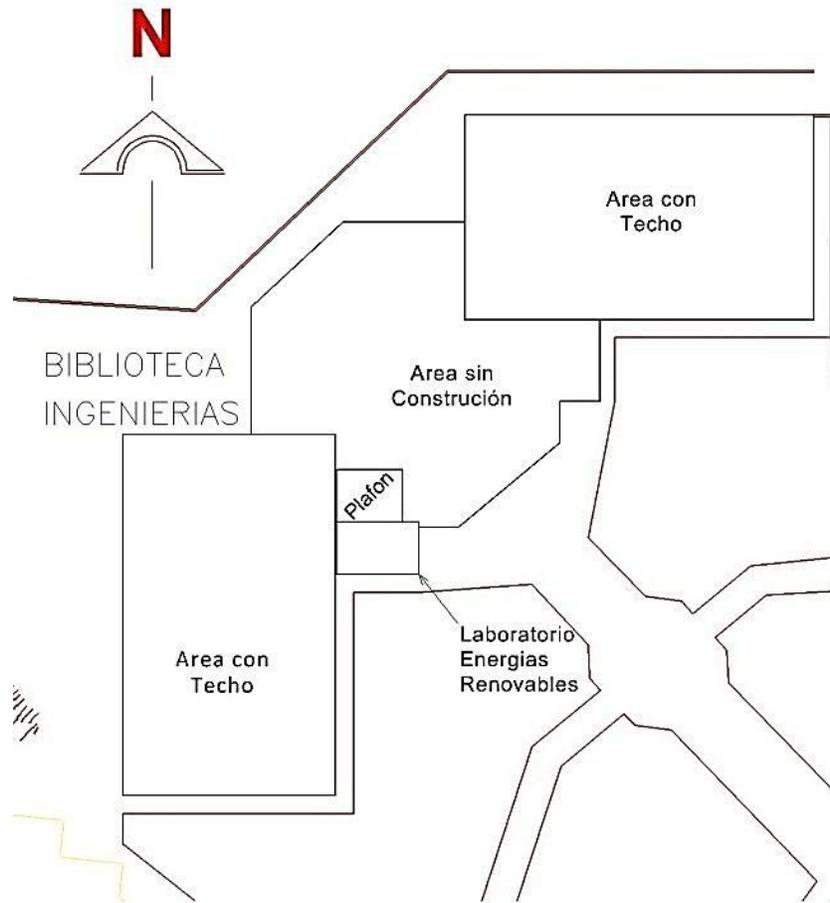


Figura 54: Plano Arquitectónico del Área del laboratorio de ER. De la Biblioteca de la FIA-UES.[24]

### 1.5.1 Irradiación solar

Según los datos extraídos del documento del proyecto “SWERA” (proyecto realizado por la Universidad Centro Americana José Simeón cañas en el cual se realizó un estudio para la creación de mapas de irradiación solar con datos recolectados de estaciones meteorológicas ubicadas en diversos puntos del país) se puede apreciar como en promedio para la región central del área metropolitana de San Salvador es de:  $5.3 kWh/m^2/día$ , como se puede apreciar en el mapa mostrado en la Figura 55 la cual muestra la irradiación solar promedio durante un año.

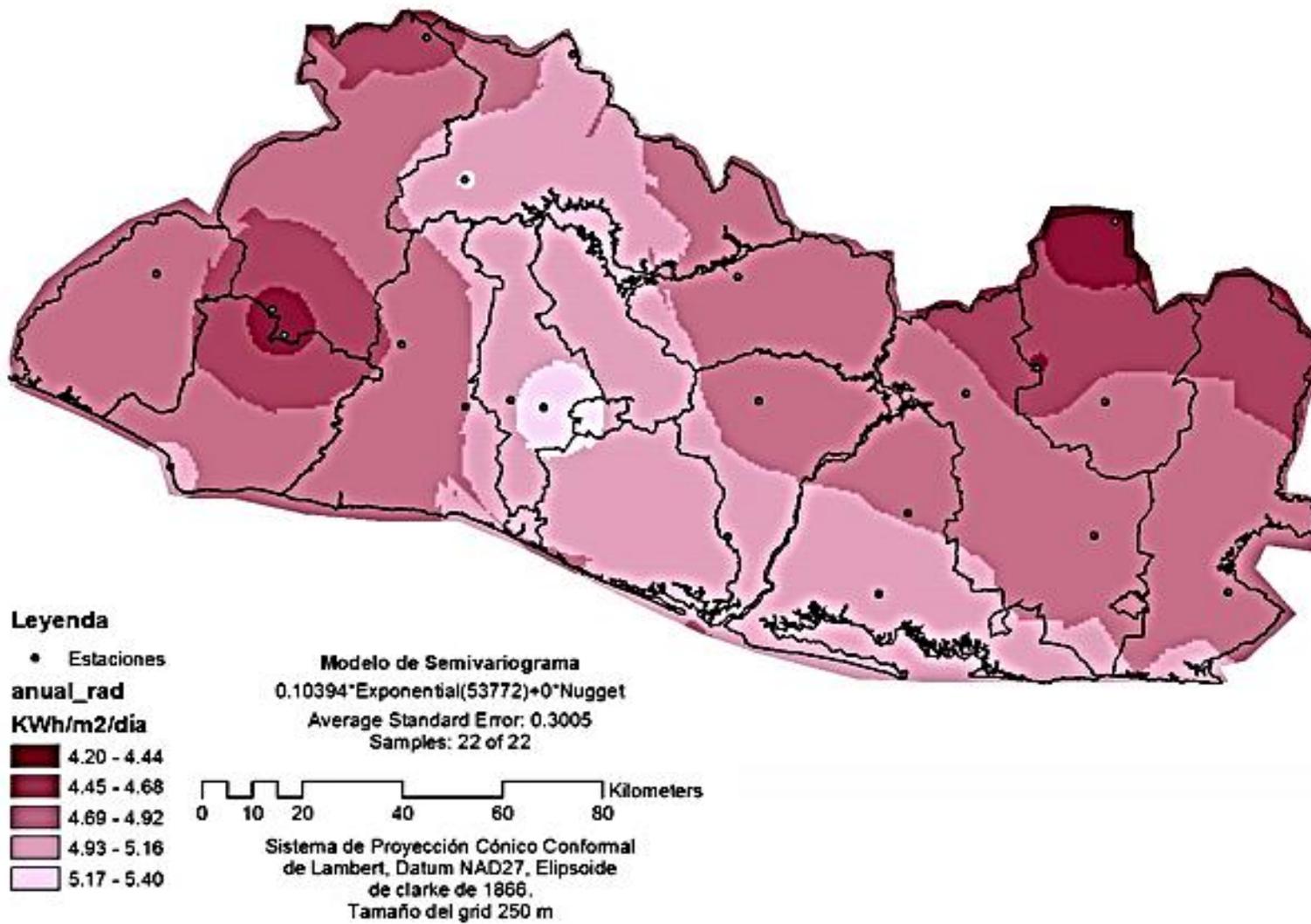


Figura 55: Mapa de irradiación solar promedio durante un año (2004).[19]

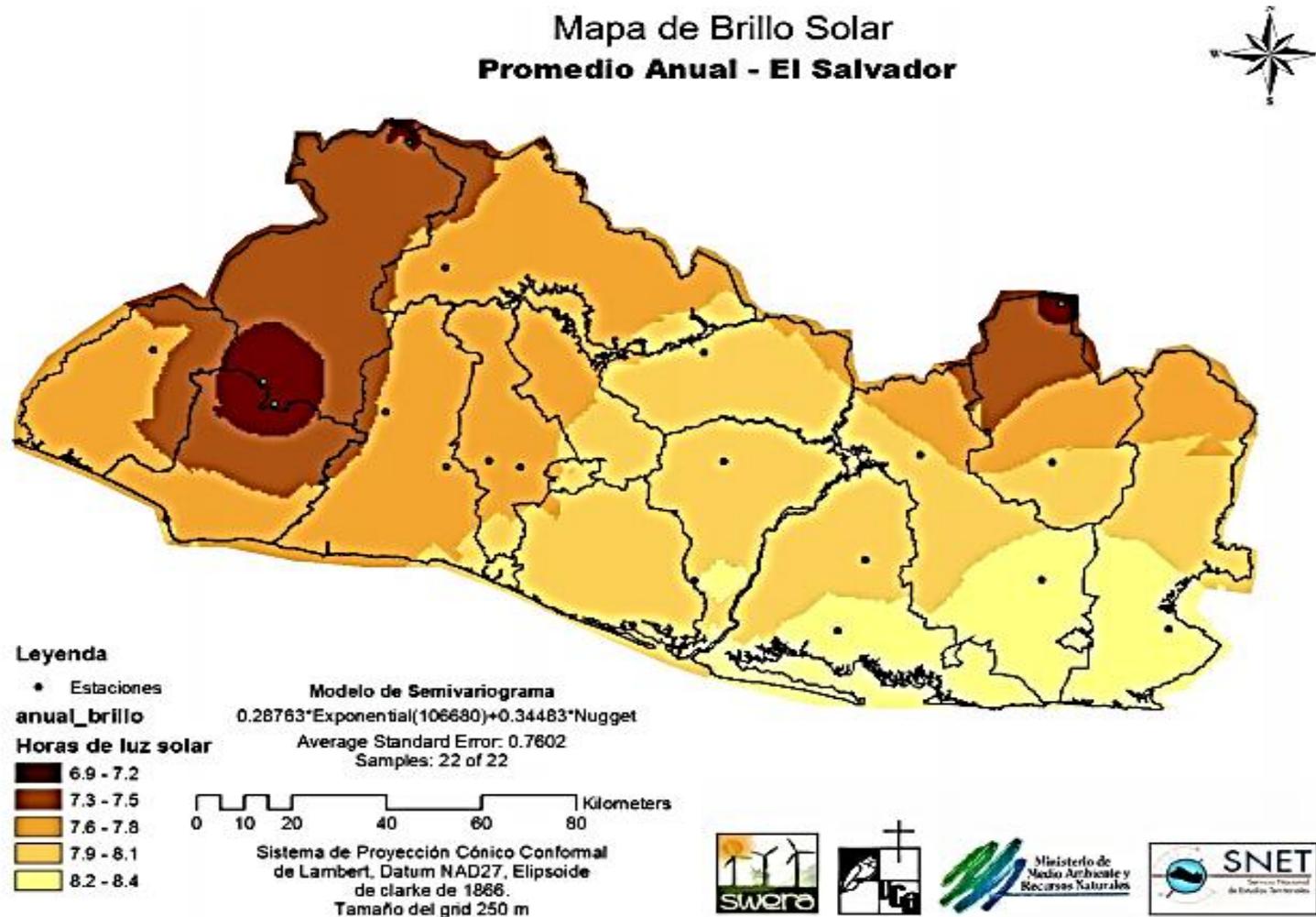


Figura 56: Mapa de horas de luz solar en El Salvador (2004).[19]



Figura 57: Mapa de Radiación solar de El Salvador (2013). [19]

Meses	SWERA	CEL(2012)	NASA
	S-5 (13.7 N, -89.2 O)	Medición	Promedio
	Observatorio	en techo	1983 - 2005
	kWh/m <sup>2</sup> /día	kWh/m <sup>2</sup> /día	kWh/m <sup>2</sup> /día
<i>enero</i>	4.9	4.6	5.8
<i>febrero</i>	5.4	4.7	6.4
<i>marzo</i>	5.7	5.1	6.7
<i>abril</i>	5.4	4.3	6.6
<i>mayo</i>	4.9	3.5	5.9
<i>junio</i>	5.1	3.4	5.7
<i>julio</i>	5.5	4.6	6.2
<i>agosto</i>	5.2	4.2	6.2
<i>septiembre</i>	4.6	4.5	5.4
<i>octubre</i>	4.8	4.2	5.4
<i>noviembre</i>	4.8	5.3	5.6
<i>diciembre</i>	4.8	4.9	5.6
<b>Promedio anual</b>	<b>5.1</b>	<b>4.4</b>	<b>6.0</b>

Tabla 4: Irradiación solar diaria en El Salvador en cada uno de los meses del año [25]

Con estos datos se puede determinar que el potencial solar por hora, considerando el área actualmente disponible de la azotea de la biblioteca es de:

Para el caso de los datos proporcionados por “SWERA”

$$\text{Potencial solar} = \text{Irradiación} \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * \text{Area total disponible}$$

$$\text{Potencial solar} = 5.3\text{k} \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * 989.778 \text{ m}^2 = 5.2458\text{MWh}$$

Para el caso de los datos proporcionados por “Actualización del Mapa de Radiación Solar de El Salvador” utilizando el promedio del valor mostrado.

$$\text{Potencial solar} = \text{Irradiación} \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * \text{Area total disponible}$$

$$\text{Potencial solar} = 5.34\text{k} \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} * 989.778 \text{ m}^2 = 5.28541\text{MWh}$$

$$\# \text{ de Módulos FTV} = \frac{\text{Energía Necesaria}}{\text{HSP} * (\text{Rendimiento de trabajo} * \text{Potencia Pico del Módulo})} [3]$$

## 1.6 Caracterización Recurso eólico en El Salvador

La República de El Salvador está localizada en la parte noroeste de Centroamérica, limita al Norte y Este con Honduras, en el extremo Sureste con el Golfo de Fonseca, al Sur con el Océano Pacífico, y al Oeste y Noroeste con Guatemala.

El viento se genera por el calentamiento desigual de la superficie de la tierra realizado por el Sol. En el caso de El Salvador predominan tres sistemas de vientos: vientos alisios de carácter regional, vientos de carácter local brisas mar-tierra y vientos de carácter local brisas montaña-valles. Los vientos Alisios, son predominantes de rumbo aproximando NE y los Nortes, que transportan aire frío procedente del Ártico hacia los trópicos.

Tipo de Viento	Descripción
Vientos alisios de carácter regional.	El Salvador está sometido a la influencia de los vientos alisios, que constituyen los vientos más constantes de todo el planeta. Estos soplan en la dirección NE desde las regiones de altas presiones de las latitudes medias hacia la zona de calmas ecuatoriales o frente tropical. Estos vientos afectan con mayor intensidad las zonas de mayores alturas del territorio.
Vientos de carácter local: Brisas Mar-Tierra.	Poseen dos direcciones, la primera se produce en sentido mar-tierra durante el día, debido al gran calentamiento que se opera en la superficie terrestre, que provoca una zona de menor presión. Mientras, sobre la superficie del Océano Pacífico, que se encuentra más fría, se genera una zona de mayor presión, lo que provoca que el aire circule en sentido océano-tierra. Por las noches se produce el fenómeno contrario, debido a la rápida pérdida del calor del continente, y el menor calentamiento de la masa de agua del océano.
Vientos de carácter local: Brisas Montañas-Valles.	Estos vientos poseen dos direcciones en función del momento del día. Durante el día, las zonas más altas de país se calientan más rápidamente que los valles y mesetas, por lo que se generan vientos locales que soplan desde los valles y mesetas hacia las zonas montañosas (brisas del valle), suavizando las temperaturas diurnas de las áreas de mayor altura del país. Cuando llega la noche las zonas altas del país se enfrían rápidamente, mientras que las zonas bajas (valles y mesetas) pierden lentamente el calor acumulado durante el día, por lo que las brisas soplan desde las zonas montañosas hacia los fondos de los valles y mesetas (brisas de montaña), suavizando las temperaturas nocturnas de las zonas bajas.

Tabla 5: Régimen de vientos en El Salvador.[19]

Nota: Adaptado de la sección 1.5 Diagnóstico-Clima del “Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial”.

### 1.6.1 Pasos para determinar si el potencial eólico de un sitio es adecuado.

Utilizar mapas de recursos eólicos o también llamados mapas eólicos y tablas de clases de viento.

La clase de potencia de viento es definida como el rango de densidades de potencia del viento a una determinada altura dada, sobre el nivel del suelo, el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés) es quien produce los mapas eólicos, utilizando un sistema computarizado de mapeo analítico y empírico que combina con modelos matemáticos una variedad de conjuntos de datos de clima, además, según estudios del NREL se ha comprobado que el área donde la densidad de energía eólica se convierte en más de 320 W/m<sup>2</sup> a 30 metros sobre el nivel del suelo, y más de 400 W/m<sup>2</sup> a 50 metros sobre el nivel del suelo; es suficiente para desarrollar proyectos que utilicen el viento como fuente para producción de energía eléctrica.

A continuación, se muestra la tabla 6, en la cual se representa una evaluación estándar del potencial de energía eólica y la velocidad del viento en El Salvador.

Clase	Potencial del Recurso	Velocidad del Viento (m/s) 30 m de altura	Densidad de Potencia del viento (W/m <sup>2</sup> ) 30 m de altura	Velocidad del Viento (m/s) 50 m de altura	Densidad de Potencia del viento (W/m <sup>2</sup> ) 50 m de altura
1	Pobre	0.0 – 5.1	0 - 160	0 – 5.6	0 - 200
2	Marginal	5.1 – 5.9	160 – 240	5.6 – 6.4	200 – 300
3	Considerable	5.9 – 6.5	240 - 320	6.4 – 7.0	300 - 400
4	Buena	6.5 – 7.0	300 - 400	7.0 – 7.5	400 – 500
5	--	7.0 – 7.4	400 – 480	7.5 – 8.0	500 – 600
6	--	7.4 – 8.2	480 – 640	8.0 – 8.8	600 – 800
7	--	8.2 – 11.0	640 - 1600	8.8 – 11.9	800 – 2000

Tabla 6: Definiciones estándar de clases de viento.[19]

A continuación, se muestran una serie de mapas de Potencial Eólico de El Salvador con mediciones a diferentes niveles del suelo, que servirán para determinar a qué nivel y en que departamentos es más conveniente instalar sistemas eólicos para la generación de electricidad.

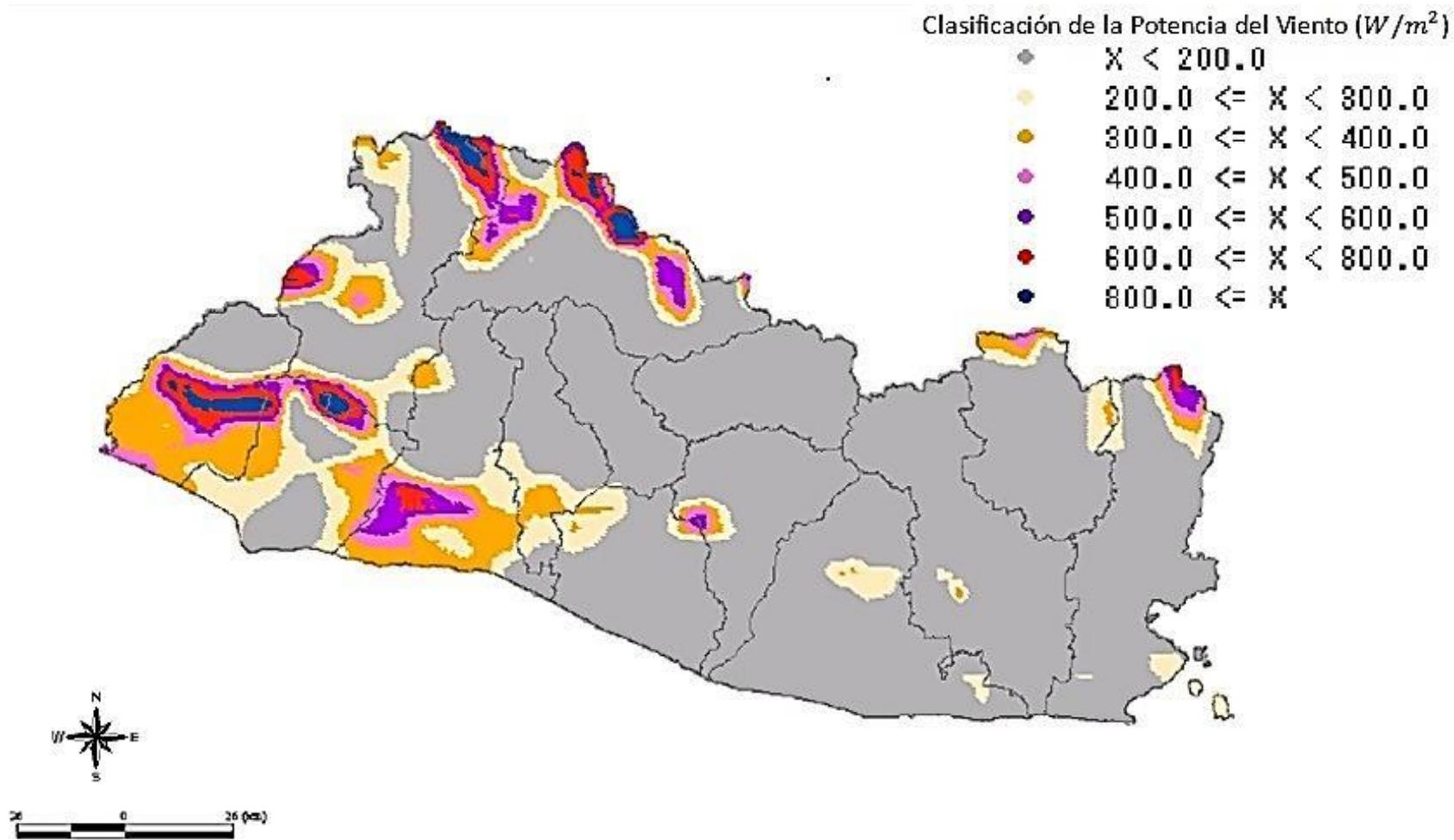


Figura 58: Mapa del Potencial Eólico de El Salvador. (30m sobre el nivel del suelo).[26]

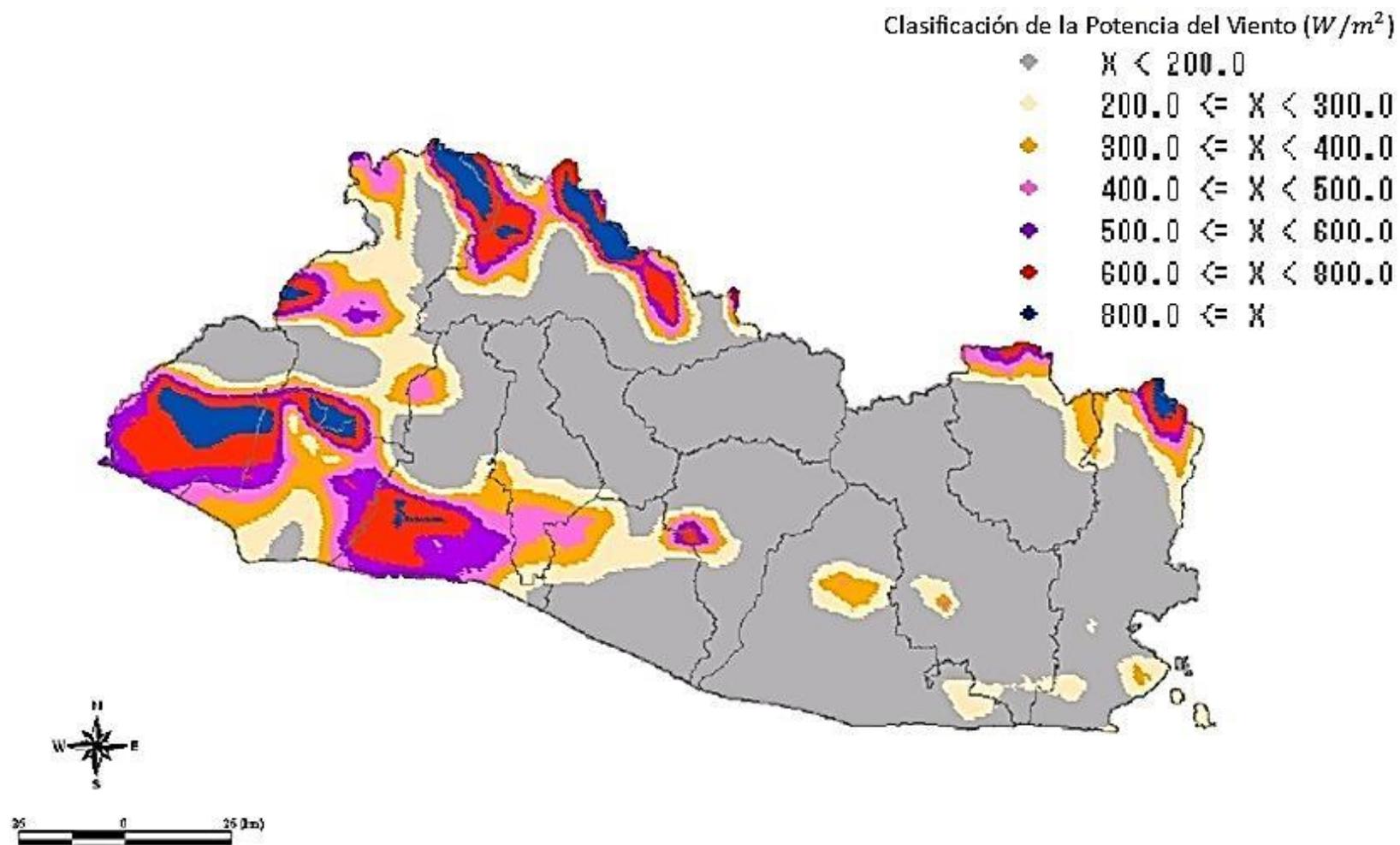


Figura 59: Mapa del Potencial Eólico de El Salvador. (50m sobre el nivel del suelo). [26]

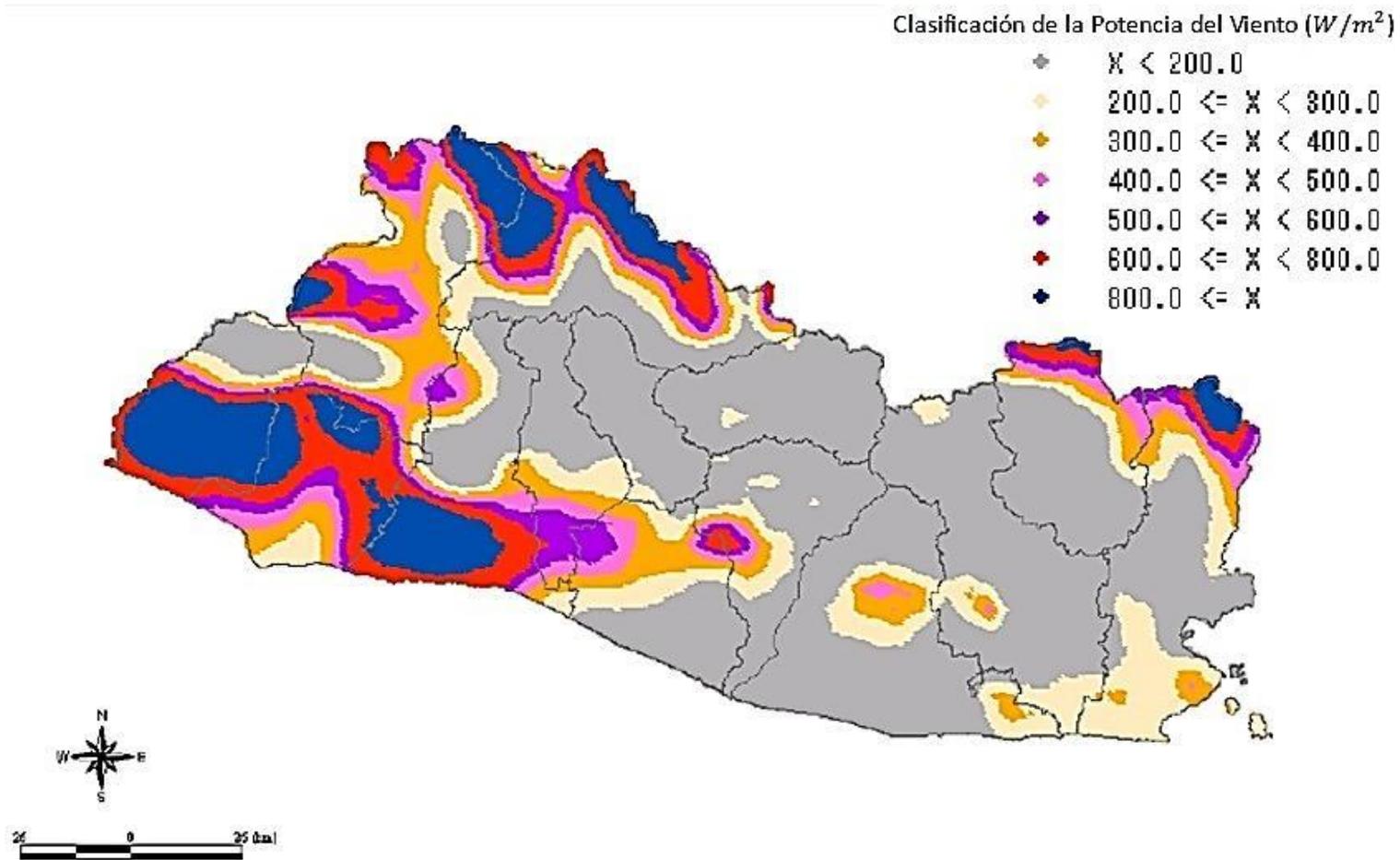


Figura 60: Mapa del Potencial Eólico de El Salvador. (80m sobre el nivel del suelo). [26]

## CAPÍTULO II: DISEÑO DE RECURSO SOLAR FOTOVOLTAICO.

### 2.1. CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPOS FOTOVOLTAICO.

#### 2.1.1. Caracterización de paneles fotovoltaicos bajo normas ASTM/IEC.

Antes de empezar a caracterizar el equipo es necesario saber a qué se refiere realizar un proceso bajo normativa, en el cual se puede mencionar que una norma no es más que un documento en el cual se establecen los requisitos de los procedimientos además de las regulaciones ante un ente específico que puede variar en cada país.

Las normas se elaboran por consenso en donde participan todas las partes que tienen interés en el desarrollo o uso de las normas; cabe mencionar que las normas las usan individuos, compañías y agencias a nivel mundial.

Las Normas desarrolladas en el documento son ASTM (American Society for Testing Materials) e IEC (International Electrotechnical Commission); las normas ASTM hasta cierto punto se puede considerar como “voluntarias” ya que el ente regulador no exige observarlas, sin embargo en cada país según sus autoridades gubernamentales frecuentemente dan fuerza de ley a las normas voluntarias para el cumplimiento, mediante citas en leyes, regulaciones y códigos. En lo que se refiere al proceso de certificación bajo la normativa ASTM se ejecuta sin la intervención de la entidad, pero muchos fabricantes prefieren indicar que sus productos han sido sometidos a pruebas de acuerdo a una norma ASTM, colocándola en la etiqueta del producto para mayor confianza de parte del comprador.

Las normas IEC, países miembros o no de la organización pueden adoptarlas. Un fabricante ubicado en un país no miembro puede acercarse a un ente certificador en

cualquier país miembro para que dichos productos sean probados y certificados, cabe destacar que El Salvador es un país afiliado de la IEC a través del organismo Salvadoreño de Normalización (OSN).

#### 2.1.2. Prueba de inspección visual.

La norma ASTM 1799 (12.02) detalla las prácticas para la inspección visual de los módulos fotovoltaicos, en donde este ensayo se basa en la percepción de detalles que la persona que lo lleva a cabo para identificar cualquier tipo de anomalías o defectos que el módulo fotovoltaico posea. Entre las anomalías más frecuentes a encontrar, al realizar esta inspección son:

- ✓ Pobre calidad de fabricación.
- ✓ Defectos en la estructura o soportes.
- ✓ Rajaduras, distorsión o superficie pegajosa de los materiales poliméricos.
- ✓ Burbujas o delaminación del encapsulado.
- ✓ Corrosión de sujetadores, partes mecánicas o elementos eléctricos del circuito.
- ✓ Huecos o corrosión en cualquiera de las capas fotovoltaicas de película delgada.
- ✓ Decoloración del superestrato de material de encapsulado.
- ✓ Decoloración de elementos fotovoltaicos activos.
- ✓ Rotura, rajaduras, ralladuras, arrugas o torceduras en superficies externas.
- ✓ Celdas fotovoltaicas tocando otra celda o el marco del módulo.
- ✓ Capas metálicas faltantes, desnudas o dañadas en la superficie de la celda, etc.

Según la norma IEC 61215, la iluminación de local en la ejecución del ensayo no debe ser inferior a 1000 lux, por lo cual se realiza en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de La Universidad de El Salvador donde se encuentra una lámpara de inducción y cumplimiento de norma.

### 2.1.3. Ensayo de aislamiento eléctrico.

Conforme a la Norma IEC 61215 dicho ensayo se encarga de verificar si el MFV está lo suficientemente aislado eléctricamente mediante la comprobación de la rigidez dieléctrica y la medición de la resistencia de aislación, dicho ensayo consiste en aplicar una tensión eléctrica entre el circuito eléctrico del módulo y el marco, al realizarlo se verifica que no se produzcan descargas o alguna discontinuidad dieléctrica.

La norma ASTM E1462 describe 2 procedimientos para probar la integridad del aislamiento entre las partes eléctricamente activas accesibles del módulo y las superficies expuestas no conductoras. Dichos procedimientos son:

Procedimiento de resistencia de aislamiento: Es la medida entre las partes accesibles y superficies fuera del circuito y entre el circuito fotovoltaico, este procedimiento se emplea con un óhmetro de alta impedancia.

Procedimiento de resistencia dieléctrica al voltaje: Se aplica un voltaje en rampa entre el circuito fotovoltaico y las partes accesibles del MFV, de ello se mantiene un monitoreo de la corriente, o se determina si la corriente de fuga sobrepasa un límite predeterminado. Después se hace una inspección en el módulo en busca de evidencia de posibles arcos.

### 2.1.4. Ensayo de características eléctricas en condiciones normalizadas.

La norma ASTM E1036 recomienda un proceso para la corrección a valores normalizados de un MFV y su equivalente IEC 60891 ambas describen un procedimiento matemático para efectuar la corrección. En esta sección se detalla la norma IEC como guía.

El ensayo consiste en obtener los parámetros básicos de un MFV mostrados en la Figura 61 los cuales son:

Corriente de cortocircuito  $I_{cc}$

Tensión de circuito abierto  $V_{ca}$

Tensión a potencia máxima  $V_{mp}$

Corriente a potencia máxima  $I_{mp}$

Potencia máxima  $P_m$

### 2.1.5. Curva característica corriente-tensión

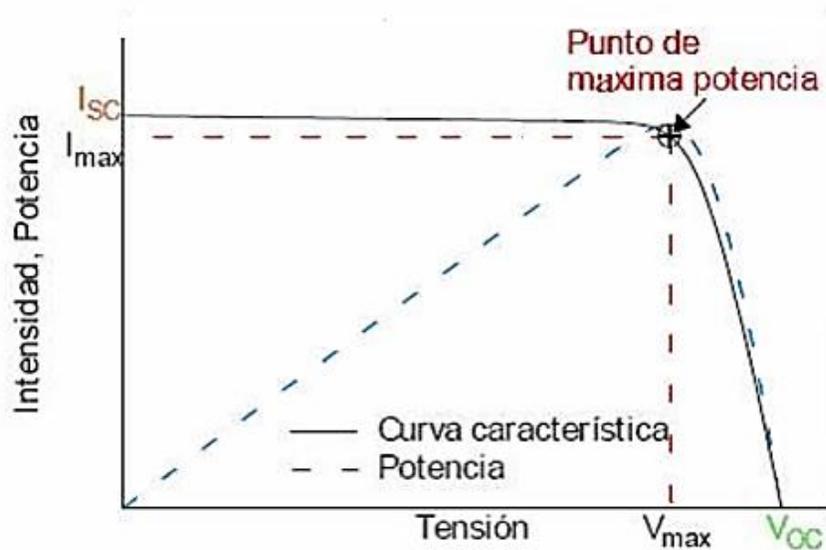


Figura 61: Curva característica detallando los principales parámetros del módulo fotovoltaico.[27]

En la práctica, el procedimiento denota el someter al módulo a una irradiancia definida, fijando su temperatura en un valor determinado, mientras que con el mismo se alimenta una carga resistiva variable entre cero e infinito, además se mide simultáneamente valores de corriente generada y tensión entre bornes para los distintos puntos de funcionamiento.

En el ensayo se debería de realizar en una cámara de irradiancia colocar un valor fijo de irradiancia de  $1000W/m^2$ , con una temperatura de celda de  $25^{\circ}C \pm 1^{\circ}C$ ., y la composición espectral media de la radiación directa cuando la masa de aire es de 1.5. Lo anterior correspondería a las condiciones de prueba estándar STC. Pero a falta de infraestructura como una cámara de ambiente controlado, en ambas normas antes mencionadas establecen un procedimiento para obtener la curva STC de un MFV a partir de una tomada con diferentes parámetros. Las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$I_2 = I_1 + I_{SC} \left( \frac{G_2}{G_1} - 1 \right) + \alpha(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 14: Parámetros de medición de corriente en pruebas.[4]}$$

$$V_2 = V_1 - R_S(I_2 - I_1) - \kappa I_2(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1) \quad \text{Ecuación 15: Parámetros de medición de tensión en pruebas.[4]}$$

Dónde:

$I_1, V_1$ : Son coordenadas de los puntos de la curva característica medida.

$I_2, V_2$ : Son coordenadas de los puntos de la curva característica corregida.

$G_1$ : Es la irradiancia medida con el dispositivo de referencia.

$G_2$ : Es la irradiancia deseada.

$T_1$ : Es la temperatura medida en el dispositivo bajo ensayo.

$T_2$ : Es la temperatura deseada.

$I_{SC}$ : Es la corriente de cortocircuito medida del dispositivo bajo ensayo para  $T_1$  y  $G_1$ .

$\alpha, \beta$ : Son los coeficientes de temperatura de corriente y tensión del dispositivo bajo ensayo en las STC o en la irradiancia objetivo de la corrección y dentro del rango de temperatura de interés.

$R_S$ : Es la resistencia serie interna del dispositivo bajo ensayo.

$K$ : Es un factor de corrección de la curva.

Antes de poder determinar la curva característica en condiciones STC se deben calcular las constantes  $\alpha, \beta, R_S$  y  $\kappa$  de la siguiente forma:

- ✓ Los valores de los coeficientes de temperatura se obtienen al graficar los valores de  $I_{SC}$  y  $V_{oc}$  en función de la temperatura y ajustar una curva por mínimos cuadrados. El valor de cada pendiente corresponde al valor del coeficiente de temperatura.
- ✓ Para determinar el valor de la resistencia serie interna del módulo fotovoltaico se traza la curva I-V del dispositivo de prueba a una misma temperatura y a dos niveles de irradiancia distintos (las magnitudes no son necesarias). Durante las mediciones, las temperaturas del dispositivo de prueba no variarán más de 2°C. Teniendo los valores de  $V_{pm\acute{a}x}$  e  $I_{pm\acute{a}x}$  de ambas curvas se obtiene el valor de  $R_S$  por la siguiente fórmula:

$$R_S = 100 \frac{V_{pm\acute{a}x2} - V_{pm\acute{a}x1}}{I_{pm\acute{a}x1} - I_{pm\acute{a}x2}}$$

Ecuación 16: Resistencia serie interna del módulo fotovoltaico.[4]

Dónde:

$V_{pm\acute{a}x2}$ : Es el voltaje a potencia máxima de la curva de menor irradiancia.

$V_{pm\acute{a}x1}$ : Es el voltaje a potencia máxima de la curva de mayor irradiancia.

$I_{pm\acute{a}x2}$ : Es la corriente a potencia máxima de la curva de menor irradiancia.

$I_{pm\acute{a}x1}$ : Es la corriente a potencia máxima de la curva de mayor irradiancia.

En el procedimiento para llevar a cabo la caracterización de los módulos se implementó el circuito mostrado en la Figura 62 en donde se muestra la conexión básica de la prueba con una fuente artificial (Lámpara 120 VAC) y con la fuente natural (Sol).

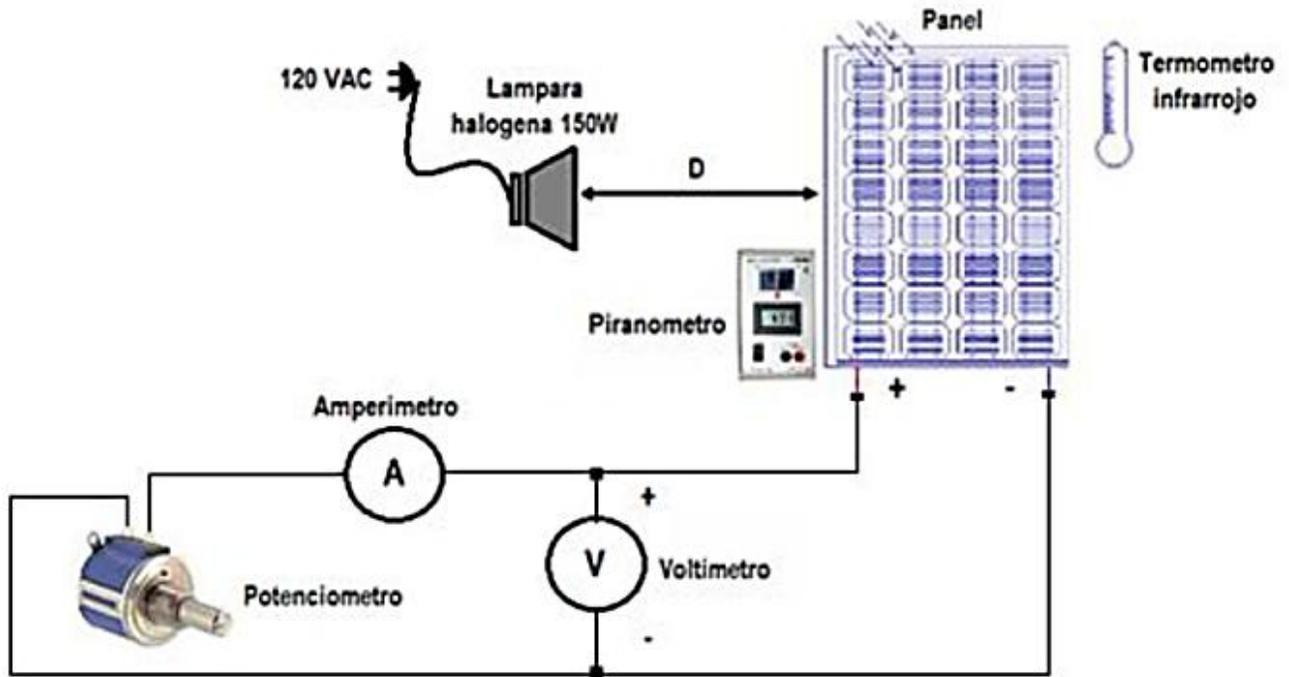


Figura 62: Obtención de curva de respuesta con iluminación Artificial.[14]

Se verifica la respuesta del módulo a una temperatura constante de  $60^{\circ}\text{C}$  donde se mantiene con un margen de variación de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Esto se logra con corrientes de aire en la superficie del panel fotovoltaico por medio de un ventilador y midiendo la temperatura con el termómetro infrarrojo.

Con la temperatura ya estable se toman las mediciones, de voltaje y corriente e irradiancia a una distancia  $D$ , en donde se varía el potenciómetro desde cero hasta su valor nominal, y se concluye que el conjunto de puntos  $(V, I, T)$  representa la curva característica del panel fotovoltaico, dichos procedimientos pueden ser tomados a otros valores de temperatura.

## 2.2. EQUIPO UTILIZADO EN EL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.

### 2.2.1. Panel fotovoltaico.

En la Figura 63 se puede apreciar el módulo o panel fotovoltaico empleado, el cual es del tipo monocristalino con una tensión nominal máxima de 17V y una tensión a circuito abierto de 21.5 V.

Los paneles empleados poseen una potencia nominal de 100W y están colocados en una estructura metálica que permite una fácil orientación de los mismos.



Figura 63: Panel Fotovoltaico monocristalino de 4x9 celdas empleado en el laboratorio

[28]

A continuación se presenta un cuadro resumen de las características más importantes de los paneles fotovoltaicos empleados.

Panel Fotovoltaico	
Marca	MONTELEC
Potencia	100 Watts
Máxima Tensión Salida	17 V
Máxima Corriente	5.88 A
Vcc	21.5 V
Isc	6.53 A
Máxima Operación Sistema	100 V
Condiciones Prueba Estándar	100 W/m <sup>2</sup> 25°C AM1.5
Nº Celdas	4 x 9

Tabla 7. Especificaciones Técnicas del Panel Fotovoltaico según el fabricante.[28]

### 2.2.2. Controlador de Carga Xantrex C60.

#### Modos de Funcionamiento.

El controlador de carga, marca Xantrex C60 mostrado en la Figura 64 es un equipo muy completo el cual puede utilizarse para sistemas 12V y 24V de CC, dispone de numerosas características entre las que se pueden destacar sus 3 modos de operación: como regulador de carga FV, como regulador de derivación de CC, o como regulador de cargas de CC (desconexión por baja tensión). Estos 3 modos de funcionamiento se explicarán a continuación.



Figura 64: Controlador de Carga, marca Xantrex C60. [29]

Regulación de carga fotovoltaica: Al seleccionar este modo, el LED de estado parpadeará en verde o estará encendido fijo en verde. Alternará entre rojo y verde en el modo de ecualización. Este modo se emplea para la carga de baterías por medio de una matriz FV, para este controlador en específico se puede trabajar hasta 60A en tensiones de 12V y 24V. En el esquema de la Figura 65 se muestra el diagrama de bloques de la conexión de dicho modo de operación.



Figura 65: Diagrama de bloques de operación en el modo Regulador de carga FV.[29]

Modo de regulación de derivación: Al seleccionar este modo, el LED de estado parpadeará en verde o estará encendido fijo en verde. En este modo el controlador puede gestionar la carga de las baterías con fuentes de alimentación alternativas, como sistemas Eólicos, Hidráulicos, FV, etc.

Los generadores FV no necesitan controladores de derivación porque los módulos FV pueden permanecer en circuito abierto sin sufrir daños, por el contrario los sistemas eólicos y otros pueden resultar dañados, por lo cual para este modo de operación se necesita una carga de “volcado” la cual tiene como función principal absorber la corriente que puede producir la fuente e un punto más alto, en la Figura 66 se muestra el diagrama de bloques de este modo de funcionamiento.



Figura 66: Diagrama de bloques de operación en el modo regulación de derivación.[29]

Modo de regulación de cargas de CC: El controlador Xantrex C60 también puede ser utilizado para controlar cargas CC sin generador (por ejemplo cuando sucede una desconexión por baja tensión, en el caso fotovoltaico la falta de luz solar representa este caso), en este modo de operación el controlador actúa como regulador evitando que las baterías sufran daño por exceso de descarga. El esquema de la Figura 67 muestra el diagrama de bloque del funcionamiento del controlador en dicho modo.

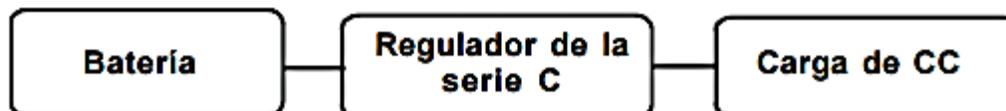


Figura 67: Diagrama de bloques de operación en el Modo de regulación de cargas de CC.[29]

Al seleccionar este modo, el LED de estado normalmente parpadeará en rojo o estará encendido fijo en rojo en cuanto el regulador desconecte las cargas de CC cuando el nivel de tensión de la batería es bajo.

Cuando el equipo se encuentra en el modo de regulación de cargas de CC, el equipo como modo de protección de las baterías se desconecta después de 6 minutos cuando el valor de desconexión por baja tensión (LVD) se alcance dicho valor es programado por medio de las perillas de ajuste ubicadas en el interior del equipo, por otra parte existe un valor de reconexión (LVR) el cual se ajusta en las perillas anteriormente mencionadas, tales perillas se muestran en la Figura 68.

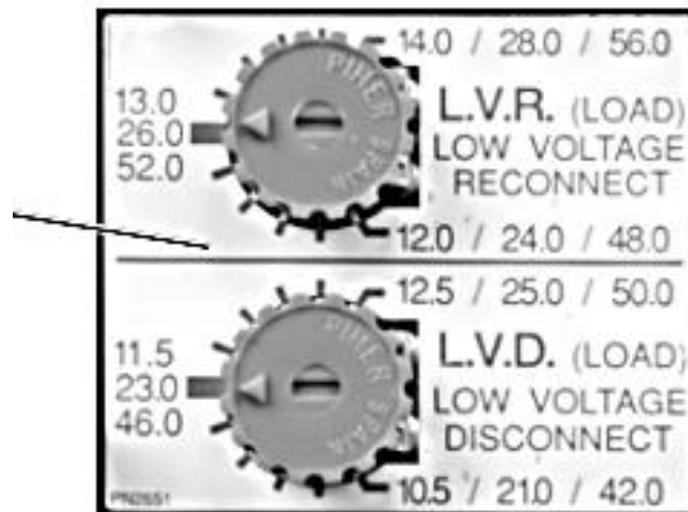


Figura 68: Perillas de ajuste de LVR y LVD para el modo de regulación de cargas de CC. [29]

LED indicador de estado.

El controlador de carga Xantrex C60, posee como única interface de usuario un LED multicolor, el cual envía una serie de indicaciones luminosas las cuales tienen un significado particular que a continuación abordaremos.

- Verde fijo: La batería está siendo cargada en el modo “flotante”, el LED permanece encendido hasta que el nivel de tensión de las baterías caiga por debajo del nivel ajustado de tensión flotante en un periodo acumulado de una hora.
- Verde parpadeando: Indica que el controlador está funcionando en el modo de REGULACIÓN DE CARGA o en el modo de REGULACIÓN DE DERIVACIÓN, las baterías no se encuentran completamente cargadas.

A medida que la tensión de la batería llega al ajuste BULK (A TENSIÓN MÁXIMA), el LED de estado parpadeará en verde varias veces (hasta cinco) y después hará una pausa, indicando que la tensión de la batería se está aproximando al ajuste de carga a tensión máxima y proporcionando una indicación del estado de la batería.

- Rojo fijo: El controlador se encuentra operando en el modo de REGULACIÓN DE CARGAS DE CC y la tensión ha llegado al nivel de desconexión por baja tensión y si en un periodo de 6 minutos no se reducen las cargas o reinicia la generación de los paneles el controlador desconectará las cargas.
- Rojo Parpadeando: A medida que la tensión de la batería se aproxima al ajuste de LVD, el LED parpadeará en rojo varias veces (hasta cinco) y después hará una pausa, con indicación de la tensión de la batería.
- Naranja parpadeando lentamente: el controlador a desconectado las cargas por que se llegó al nivel de baja tensión (LVD), existe una opción para obtener un periodo de gracia de 10 minutos para que siga funcionando el equipo a baja tensión y es presionar el botón de “rearme”.
- Rojo y verde alternativamente: El equipo se encuentra en el proceso de Ecuilización.

- Naranja parpadeando rápidamente: el controlador ha detectado una situación anormal, sobretensión o sobre-temperatura y el controlador desconectará las cargas.

A continuación en la Figura 69 se presenta la indicación de cada uno estados del LED multicolor tal como aparecen en la carcasa del equipo.

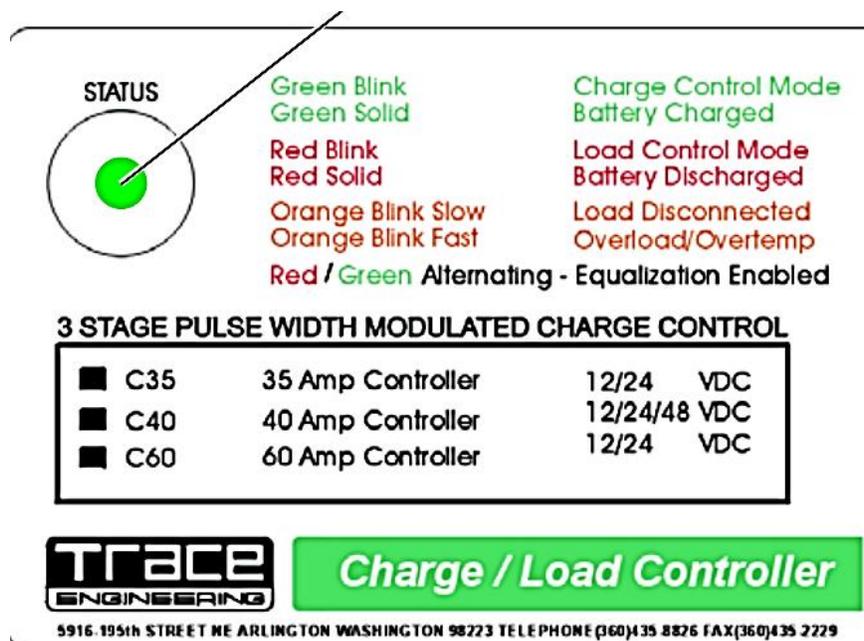


Figura 69: Estados del LED multicolor del equipo.[29]

Cableado.

El equipo posee ciertas recomendaciones o consideraciones que se deben tomar en cuenta para su adecuado funcionamiento, como primer paso se debe ajustar el Jumper de nivel de tensión de salida el cual para el modelo C60 puede ser de 12V o de 24V.

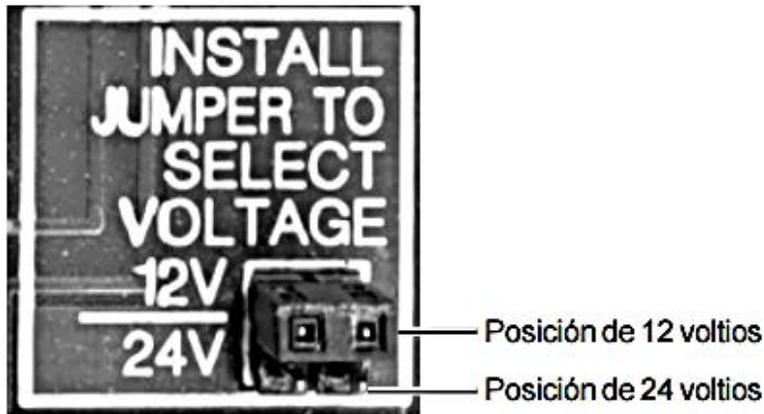


Figura 70: Jumper selector de nivel de tensión de salida  $V_{out}$  del equipo.[29]

El equipo posee borneras de conexión para el generador fotovoltaico y para el sistema de baterías, dichas borneras se encuentran en el interior de la carcasa del equipo y se pueden observar en la Figura 71.

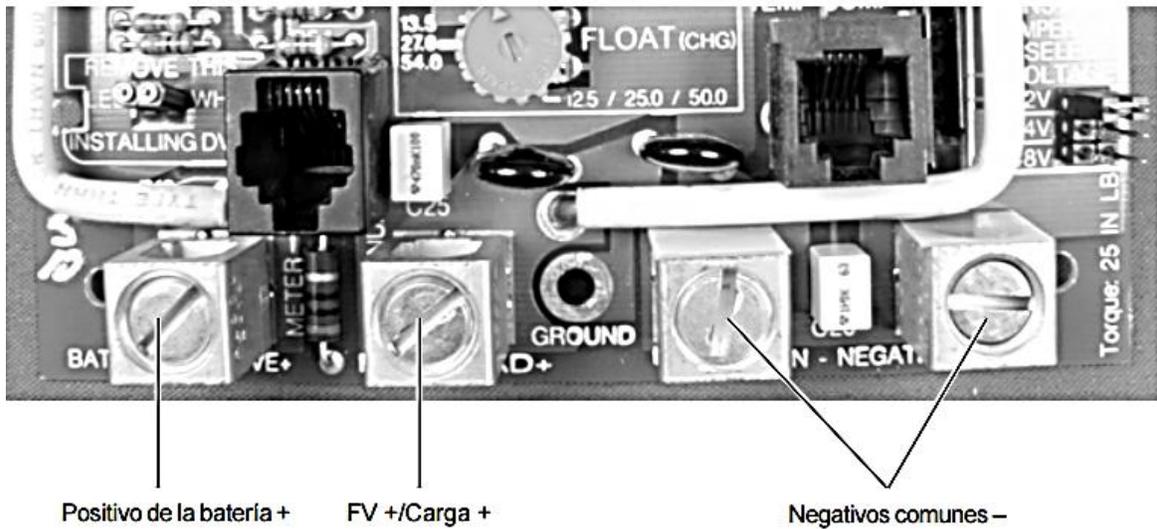


Figura 71: Borneras de conexión del equipo, donde se pueden apreciar que los negativos son comunes tanto para baterías como para el sistema FV.[29]

En la Figura 71 se puede observar como los negativos del generador FV y el sistema de baterías son comunes, así como también se puede notar que en la parte central de las borneras existe un terminal para la conexión a tierra.

Ahora se describe el diagrama de conexión del equipo en el modo utilizado en el presente trabajo (regulación de carga FV), en este modo se debe de conectar el terminal positivo de la matriz del sistema fotovoltaico al borne marcado FV POS/LOAD situado en la parte inferior del equipo, luego se debe conectar el terminal negativo de la matriz FV al terminal COMMON NEGATIVES, a continuación se deben conectar los terminales positivo y negativo de las baterías a los terminales BAT POS y COMMON NEGATIVES respectivamente.

En la Figura 72 Se puede apreciar el diagrama de conexión típico del equipo, si se realizan las conexiones del modo aquí mostrado el equipo funcionará en el modo de regulación de cargas de FV.

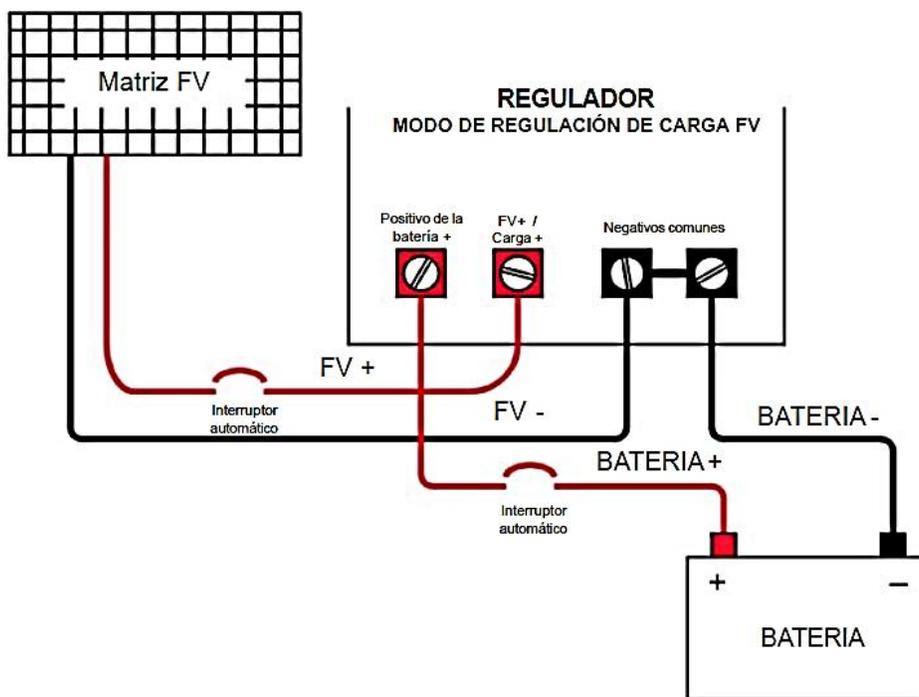


Figura 72: Diagrama de conexión típico del modelo Xantrex C60.[29]

Ahora, se explicarán algunos botones y selectores del equipo con los cuales se pueden cambiar los parámetros de carga y niveles de tensión de la misma.

Como se puede apreciar en la Figura 73, el equipo está conformado por una tarjeta electrónica la cual posee varios selectores en forma de jumper para definir los parámetros de carga y nivel de tensión de la misma entre estos selectores podemos mencionar:

- ✓ Jumper selección de modo de funcionamiento.
- ✓ Este puente determina el modo de funcionamiento: Modo de derivación y de regulación de carga FV (Charge Control), o modo de regulación de cargas (Load Control). El ajuste de fábrica es modo de regulación de carga (Charge Control).
- ✓ Conmutador de rearme.
- ✓ Si se pulsa y se mantiene pulsado, se inicia o suspende manualmente la equalización de la batería en el modo de regulación de carga. Para efectuar un reinicio después de una situación de error, pulse y suelte el conmutador. Para volver a conectar después de una desconexión por baja tensión, pulse y suelte el conmutador. Si la tensión permanece por debajo del ajuste de LVD, la unidad se desconectará transcurrido un período de 'gracia' de 6 minutos.
- ✓ Potenciómetros de Ajuste de los parámetros de tensión.

En el modo de regulación de carga, puede ajustar la tensión de carga flotante y de carga a tensión máxima regulando los potenciómetros (pots) situados en la parte inferior central de la tarjeta de circuito.

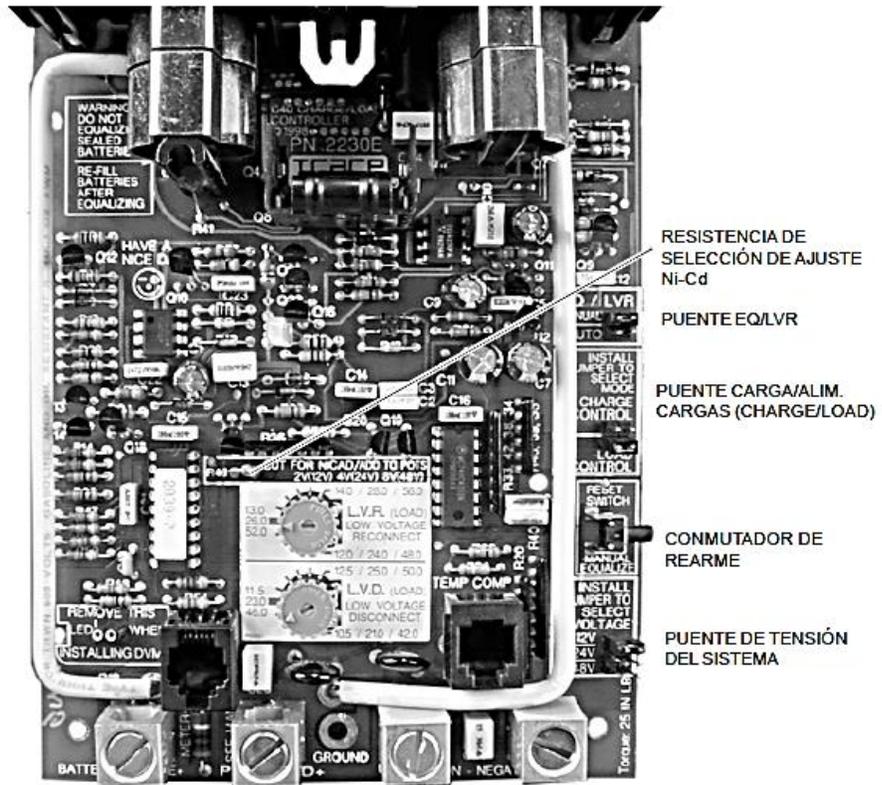


Figura 73: Tarjeta electrónica que conforma el Xantrex C60 donde se pueden apreciar los selectores de las características de carga que posee el equipo.[29].

Tabla resumen de especificaciones.

Marca	XANTREX
Modelo	C60
Configuración Tensión	12 V DC / 24 VDC
Abierto en Arreglo FV	55 V DC
Corriente de carga	60 A DC continuos
Recomendación para Interruptor Automático con el recomendado calibre del conductor	60 A DC (100% continuos Duty Cycle), #6 AWG
Máxima corriente de corto circuito	85 A Intermitentemente
Máxima caída de Tensión	0.30 V - modo control de carga
Consumo de corriente total	En operación - 15mA (típico), en vacío - 3mA
Método Regulación de Carga	Estado Sólido, 3-etapas (bulk, absorption and float) Modulación de Ancho de Pulso (PWM)

Tabla 8: Especificaciones Técnicas del Controlador de Carga según el fabricante[29]

Ajustes de control de carga de batería.

Batería Plomo-Acido	Sistema a 12 V:
	Float 12.5 - 14.5 V DC
	Bulk 13.0 - 15.0 V DC
	EQ = +1 aboveBulk
Batería NiCad	Sistema a 12 V:
	Float 14.5 – 16.5 V DC
	Bulk 15.0 - 17.0 V DC
	EQ = no
	Recomendado

Tabla 9. Especificaciones Técnicas del Ajuste de control de carga, según el fabricante.[29]

### 2.2.3. Inversor DC/AC

El inversor Power Express 750 está diseñado con la última tecnología Soft Start Technology (SST), la cual le proporciona un incremento gradual de la tensión en el inicio de la inversión con el fin de evitar fallas por arranque en frío o por sobre cargas, elimina las fallas sobrecargas momentáneas, esta tecnología le proporciona mayor eficiencia, posee mejor sistema de enfriamiento y aumenta la vida del equipo.

El equipo posee 2 LED's indicadores de estados, el LED de color verde indica que el equipo está en modo de inversión normal, por el contrario el LED de color rojo indica que el equipo sufre una falla o está operando en un estado anormal (indica una condición de sobre carga, sobre temperatura o una entrada de tensión anormal).



Figura 74: Inversor de potencia entrada de tensión DC salida de tensión AC. [30]

El equipo posee 2 tomas hembras tipo polarizado americano de 120 V y un interruptor de encendido y apagado en una de sus partes laterales, del otro extremo del equipo se encuentran las borneras de entra de baterías o generadores CC, tal como se muestran en la Figura 75 y Figura 76.

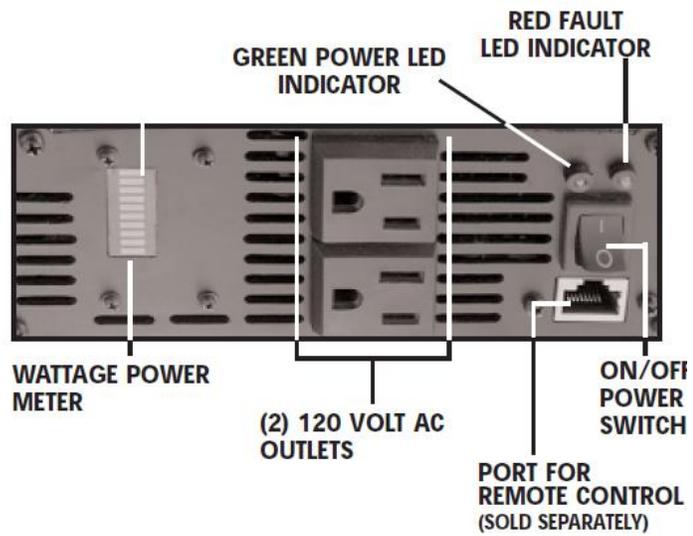


Figura 75: Vista de conectores e interruptor del inversor, Nota: el equipo utilizado en el proyecto no posee el medidor de Watts y el puerto para control remoto.[31]

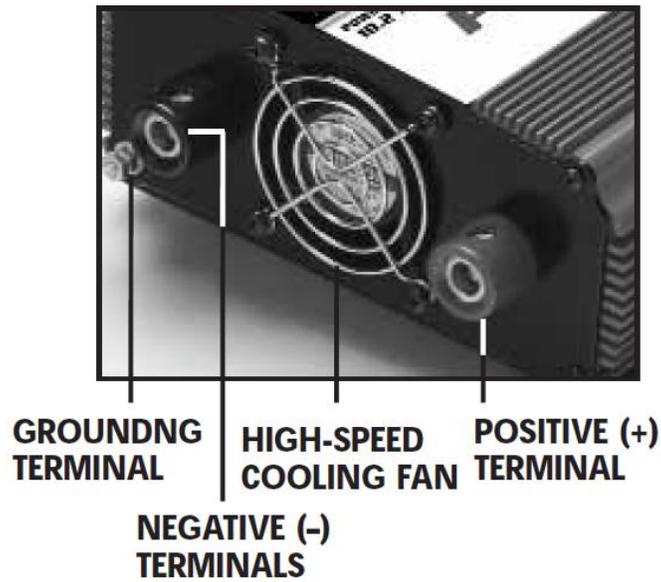


Figura 76: Borneras para la conexión de baterías o para generadores CC.[31]

Principio de operación.

El inversor Power Express 750 convierte tensiones de 12 Vdc en tensiones sinusoidales estándares de 120 Vac. El convertidor trabaja con 2 estados, en el primer estado el equipo incrementa el nivel de tensión en la entrada de 12 Vdc a 145 Vdc y en el segundo estado el equipo utiliza una técnica de inversión de alta frecuencia, convirtiendo los 145Vdc en 110/120 Vac utilizando una serie de bancos de transistores MOSFET. En la Figura 77 se muestra un diagrama de bloques con el funcionamiento del inversor, donde se pueden apreciar los estados anteriormente mencionados.

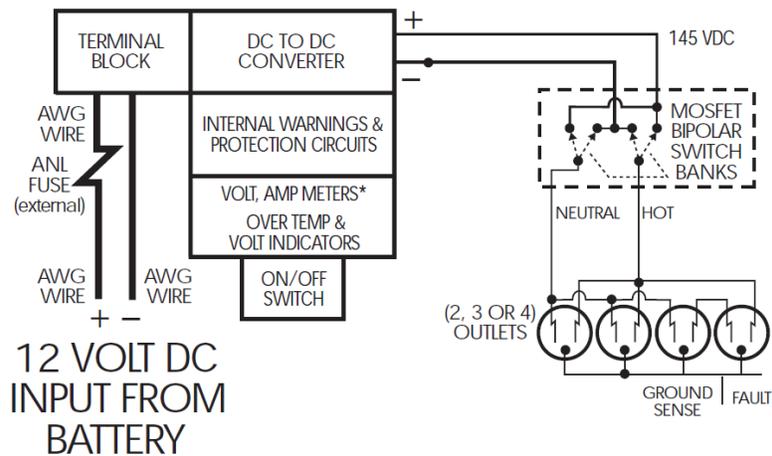


Figura 77: Diagrama de bloques del funcionamiento de los estados del inversor Power Express.[31]

Forma de onda de la señal de salida del inversor.

La señal de salida AC generada por el inversor es conocida como “señal seno modificada” la cual se muestra en la Figura 78, esta forma de onda tiene características similares a la onda senoidal, es aceptada por la mayoría de las cargas AC, tales como cargas lineales, cargas electrónicas, motores y transformadores.

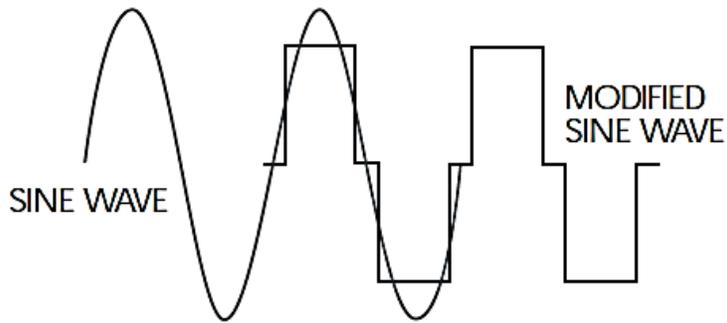


Figura 78: Forma de onda de la señal de salida del inversor, donde se puede apreciar la forma de onda modificada.[31]

Los inversores que poseen señales de salida senosoidales puras, tienen un costo mayor por lo cual su utilización está limitada a aplicaciones específicas.

A continuación se presenta una tabla resumen de las características eléctricas del equipo.

Marca	Power Express
Modelo	PE-750
Salida de Potencia	
Continua	750 Watt
Sobrecarga (Instantáneo)	1500 Watt
Entrada de Batería DC	
Sistema 12V DC	12V DC nominal (11-15V) operativos
Salida de Inversor AC	
Tensión	110V AC RMS +/- 10%
Frecuencia	60 Hz +/- 2%
Forma de Onda	Pura regulación de onda seno modificada
Eficiencia	90%
Otras especificaciones:	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Sistemas de protecciones:</li> <li>✓ Protección contra corto circuito.</li> <li>✓ Protección contra sobre voltaje.</li> <li>✓ Alarma Sonora de bajo Voltaje (&lt;10.6 V)</li> <li>✓ Protección por bajo voltaje.</li> <li>✓ Protección térmica.</li> </ul>

Tabla 10. Especificaciones Técnicas del inversor de potencia según el fabricante.[32]

#### 2.2.4. Contactor.

Un contactor es un componente electromecánico que tiene por objetivo establecer o interrumpir el paso de corriente, ya sea en el circuito de potencia o en el circuito de mando, tan pronto se dé tensión a la bobina.

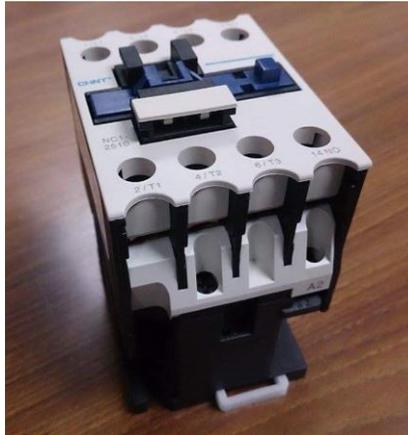


Figura 79: Contactor con tres contactos principales y un contacto auxiliar.[33]

Marca	CHINT
Modelo	NC1-2510
Tensión de bobina	110V/60Hz
Estándar de Construcción	IEC 60947-4-1
Valor de corriente operacional	
380 V ~	25 A
400 V ~	8.5 A
Corriente Térmica Convencional	40 A
Valor de tensión de aislamiento	690 V ~
Potencia controlada	
220/230 V	5.5 kW
Frecuencia de Operación	
Vida Eléctrica	1200 Ciclos/h
Vida Mecánica	3600 Ciclos/h
Potencia de bobina	
Atrayente	110 VA
Sostención	11 VA
Potencia	3-4 W
Rango de actuación	Voltaje atrayente: (85% ~ 110%)

Tabla 11. Especificaciones Técnicas del Contactor según el fabricante.[34]

### 2.2.5. Fusibles.

Los fusibles se utilizan para la protección contra sobre intensidades en circuitos ramales, según sea la ampacidad del conductor y la carga.



Figura 80: Fusible de cartucho.[35]

Tipo Fusible	De cartucho; de cinta
Marca	LITTELFUSE
Denominación del fabricante	157.5701.5501
Uso de fusibles	Para baterías
Tensión de trabajo	80 V DC
Caída de tensión	125 Mv
Corriente de trabajo	50 A
Capacidad Interruptora	300A / 48V DC

Tabla 12. Especificaciones técnicas del fusible según el fabricante.[35]

Curva de disparo del fusible

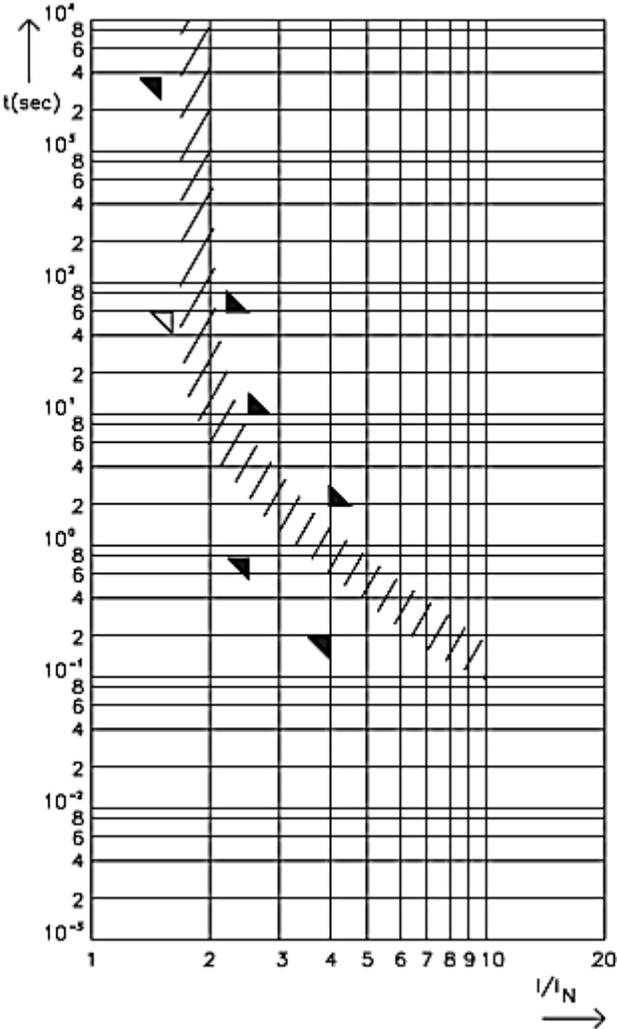


Figura 81: Fusible de cartucho. Tiempo límite para generación de pre-arco. [35]

En base a la Figura 81 se tiene sobre el eje de las ordenadas se tiene tiempo t(segundos), y sobre el eje de las abscisas se tiene la relación corriente sobre corriente nominal  $I/I_N$ .

### 2.2.6. Portafusibles.

Cada fabricante de fusibles hace portafusibles que se adaptan a los valores de tensión y corriente del fusible seleccionado.



Figura 82: Portafusible adecuado para la instalación de fusible de cartucho.[35]

Marca	LITTELFUSE
Denominación del fabricante	177.5701.0001
Denominación del fabricante	80V
Temperatura de contacto	425 A máxima
Base	Material aislante en acuerdo a DIN 7708/1
	Arandela elástica según la norma ISO 4036
	Tuercas hexagonales según DIN 439
	Arandela según DIN 125
Material Conductor	Aleación de cobre forjado / Aleación de cuivreux

Tabla 13. Especificaciones técnicas del portafusible según el fabricante.[35]

2.2.7. Cable instalado para banco de baterías.

Marca	General Cable
Serie	Carolprene® 105°C Welding Cable
Conductor	6 AWG totalmente recocido cobre desnudo trenzado según ASTM B-172
Funda protectora	Carolprene® 105°C, black Rango de temperatura: -50°C to +105°C
Calificación de la funda	CAROLPRENE (TAMAÑO) AWG 105C WELDING CABLE 600 VOLT P-07-KA1000015-MSHA ECHO EN USA
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente al agua</li> <li>• Resistente a la luz solar</li> <li>• Diseñado para soportar severas condiciones del medio ambiente</li> <li>• Resistente a la exposición al petróleo, ácidos, álcalis, calor, las llamas, la humedad y los productos químicos</li> <li>• Cumple o excede los requisitos de prueba de llama de MSHA</li> </ul>
Aprobaciones Industriales	Aprovado por MSHA Cumple RoHS
Ampacidades sugerida Para Aplicaciones 600 voltios In-Line	105 Amperios
Ampacidades de cable portátil de acuerdo con la Tabla NEC 400.5 (A)(2).	

Tabla 14: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.

### 2.2.8. Cables utilizados para interconexión de equipos.

Marca	Phelp Dodge
Tipo cable	THHN 600V 90°C
Construcción	1. Conductor de cobre suave sólido o cableado. Clase 2 (mm <sup>2</sup> ) / Clase B (AWG/kcmil). 2. Aislamiento de PVC retardante a la llama. 3. Chaqueta externa de poliamida (nylon).
Características	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistente a la abrasión, el calor y la humedad.</li> <li>• Temperatura de operación: En lugares secos y húmedos 90°C, en lugares mojados 75°C.</li> <li>• Tensión de Operación: 600V</li> <li>• Menor emisión de humos tóxicos por menor contenido de PVC</li> </ul>
Normas de Fabricación	UL-83 UL-1581 NTP 370.250 (2008)
Ampacidad según calibre del conductor*	
10 AWG	40 Amperios
12 AWG	30 Amperios
14 AWG	25 Amperios

Tabla 15: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.

### 2.3. DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

A continuación se describirá cada uno de los diagramas del sistema solar Fotovoltaico empleado en el laboratorio, además su modo de funcionamiento y principales características.

#### 2.3.1. Diagrama Unifilar del sistema.

En la Figura 83 se puede apreciar el circuito unifilar del sistema fotovoltaico, donde como primer elemento se encuentran los dos paneles fotovoltaicos de 100W empleados, luego se conectan a una protección termo-magnética de 2 polos (P2), la cual protege el

controlador de carga de sobre intensidades de corriente (sobre cargas) y contra cortocircuitos, luego dicha protección es conectada a los bornes FV+ y Común del Controlador de Carga en ese mismo punto del circuito se conecta a un Voltímetro Analógico y a un Amperímetro Analógico (esté conectado en serie con Controlador de Carga), del controlador de carga se divide el circuito en dos ramas la primera es la que se dirige al contacto normalmente abierto del contactor K1, la cual alimenta a la protección termo-magnética Q la cual protege a las cargas CC a emplear. La segunda rama es la que se dirige a los bornes de entrada del inversor, luego la salida del inversor pasa por una protección termo-magnética Q y baja hasta el contactor K2 y luego a las cargas AC.

Además en la Figura 84 se muestra un diagrama esquemático de conexión para un mayor entendimiento del proceso de conexión.

**SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Tension de Operacion del Sistema 12 Vdc

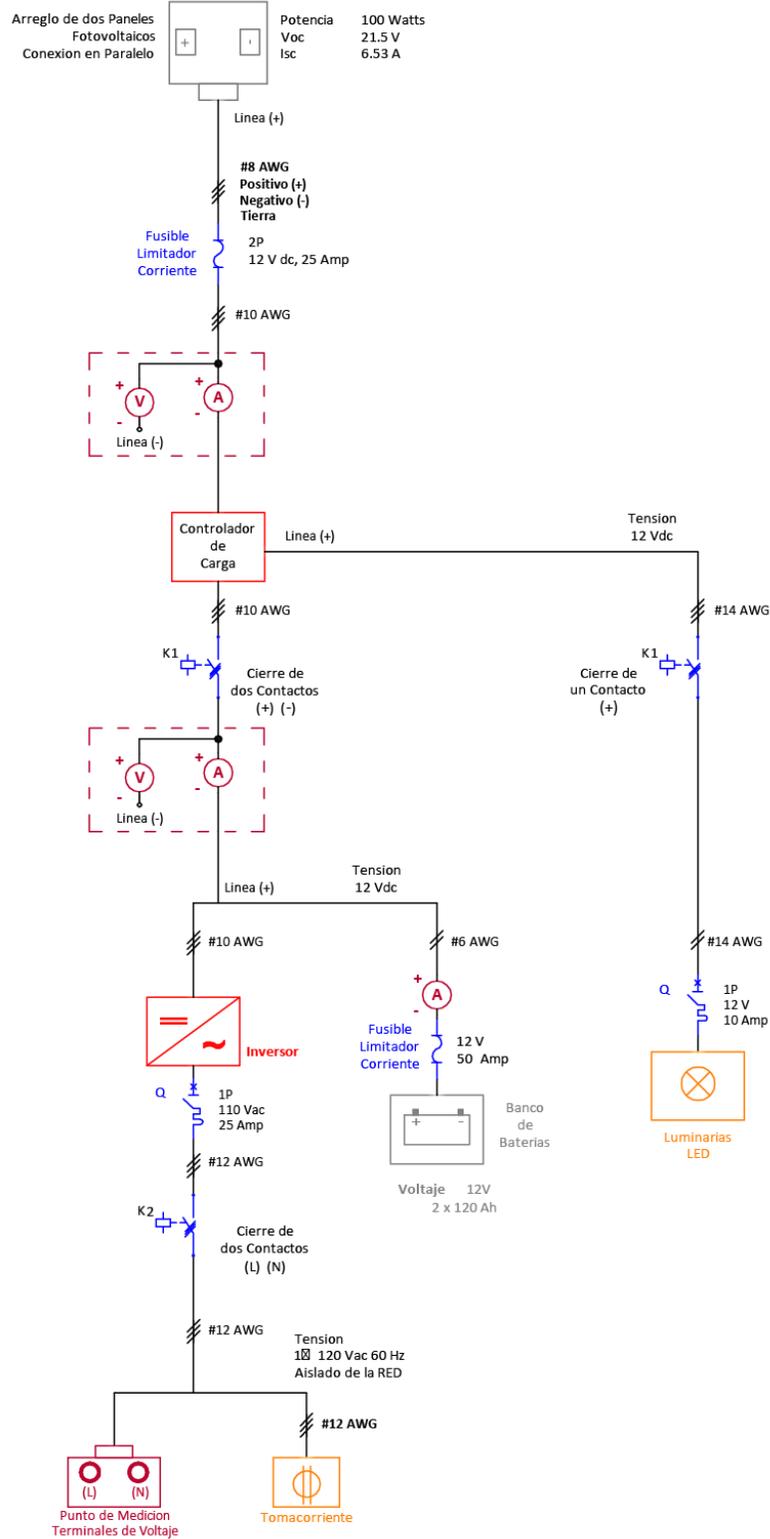


Figura 83: Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico.[36]

Nota: Este diagrama se puede visualizar mejor en los anexos.

**SISTEMA FOTOVOLTAICO**  
Tension de Operacion del Sistema 12 Vdc

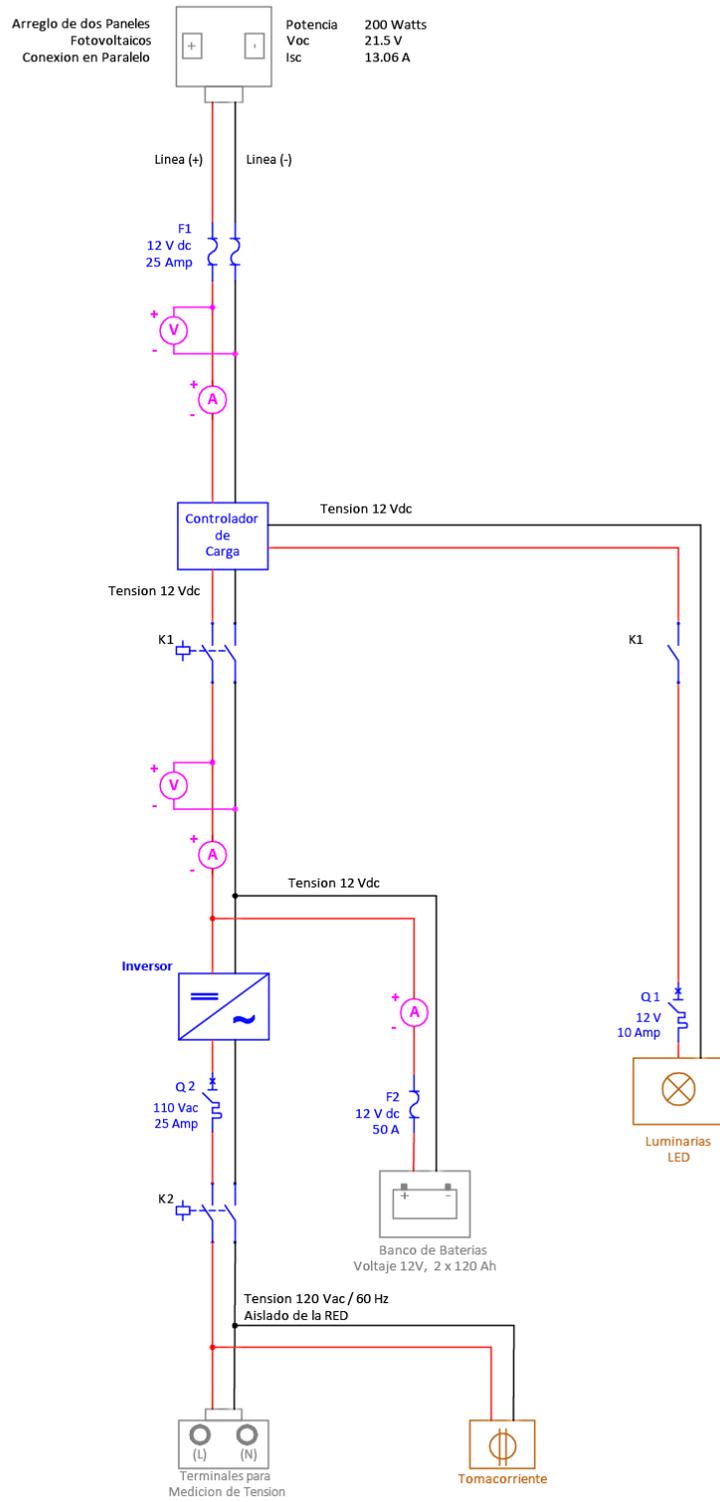


Figura 84: Diagrama esquemático de conexión.[36]

Nota: Este diagrama se puede visualizar mejor en los anexos.

## 2.4. EQUIPO DE MEDICIÓN Y SENSORES EMPELADOS EN EL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

### 2.4.1. Multímetro KEITHLEY 2700.

Para la toma y recolección de datos de los diferentes sensores a utilizar se necesita un equipo con la función de tomar lecturas en las diversas magnitudes de cada uno de los sensores, en el proyecto se utiliza el Multímetro de KEITHLEY 2700 con una tarjeta de adquisición (switching modules).

A continuación se explicará el método de conexión con el multímetro de cada uno de los diferentes sensores ya que cada uno requiere una serie de pasos para la adecuada toma de sus mediciones.

Panel de control de Multímetro KEITHLEY 2700.

Como primer paso se explicará las funciones de los principales botones del panel de control frontal del equipo.

El equipo posee 5 conectores en los cuales se introducen puntas de medición para las diversas funciones del equipo estas están distribuidos en el lado derecho del panel frontal las cuales son:

**INPUT:** En estas entradas sirven para las funciones Voltaje AC, DC, resistencia a 2 hilos, frecuencia, temperatura y dB.

**AMPS:** Sirve como terminal de entrada para la medición de corrientes no mayores de 3 A.

**SENSE  $\Omega$  4 WIRE:** Funciona para la función de medición de resistencias por el método de 4 hilos.

INPUTS: Selecciona la fuente de medición ya sea el panel frontal o la tarjeta de adquisición.

SHIFT: Activa las funciones auxiliares de los botones del panel frontal.

STORE: Sirve para activar la función de almacenaje de datos.

RECALL: Sirve para hacer el llamado de los datos almacenados en memoria de forma local.

STEP y SCAN. Estos botones sirven para configurar la función de recolección de datos.

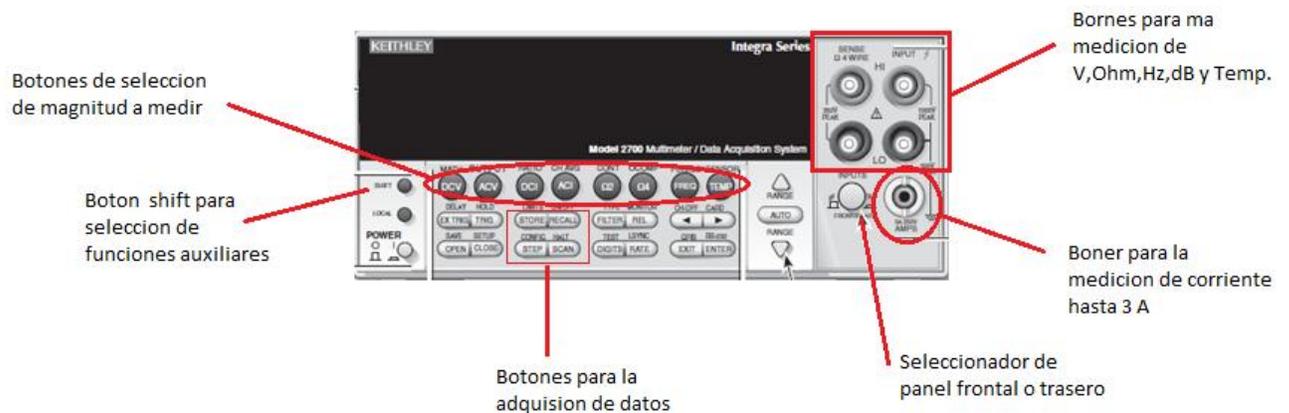


Figura 85: Panel frontal de Multímetro KEITHLEY 2700.[37]

En la parte trasera del equipo se encuentran los conectores de enlace con los medios externos tales como los conectores para los puertos Serial RS232, puerto para comunicación con protocolo IEEE-488, y los conectores para la función TRIG que sirve para la función de activación/paro remoto.

Y además en la parte trasera del equipo se encuentran los slot para las tarjetas de adquisición de datos.

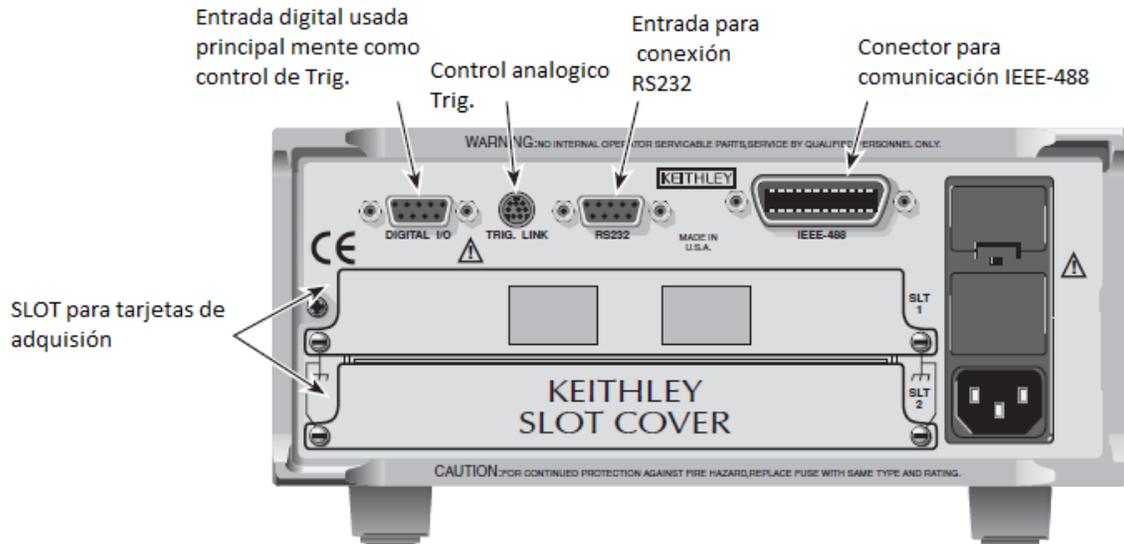


Figura 86: Parte trasera del Multímetro KEITHLEY 2700.[37]

Esquema de conexión de sensores para el sistema Fotovoltaico.

Para la medición de los datos se utiliza la tarjeta de adquisición de datos del multímetro KEITHLEY 2700 en el cual utilizaron los canales CH1 y CH2 para la medición de Voltaje y corriente respectivamente proveniente de los paneles FV, es de considerar que para la medición de la corriente se necesita utilizar una resistencia del tipo shunt ya que el equipo solo puede realizar mediciones hasta 3 A.

En dicha resistencia se realiza una medición de tensión, y se realiza una conversión de por medio de la siguiente ecuación.

$$I = \left( \frac{30}{75e^{-3}} \right) * Tensión\ Shunt$$

Ecuación 17: Corriente de conversión mediante efecto Shunt para medición.[2]

En la Figura 87, se muestra el diagrama de conexión para la medición de los parámetros anteriormente descritos.

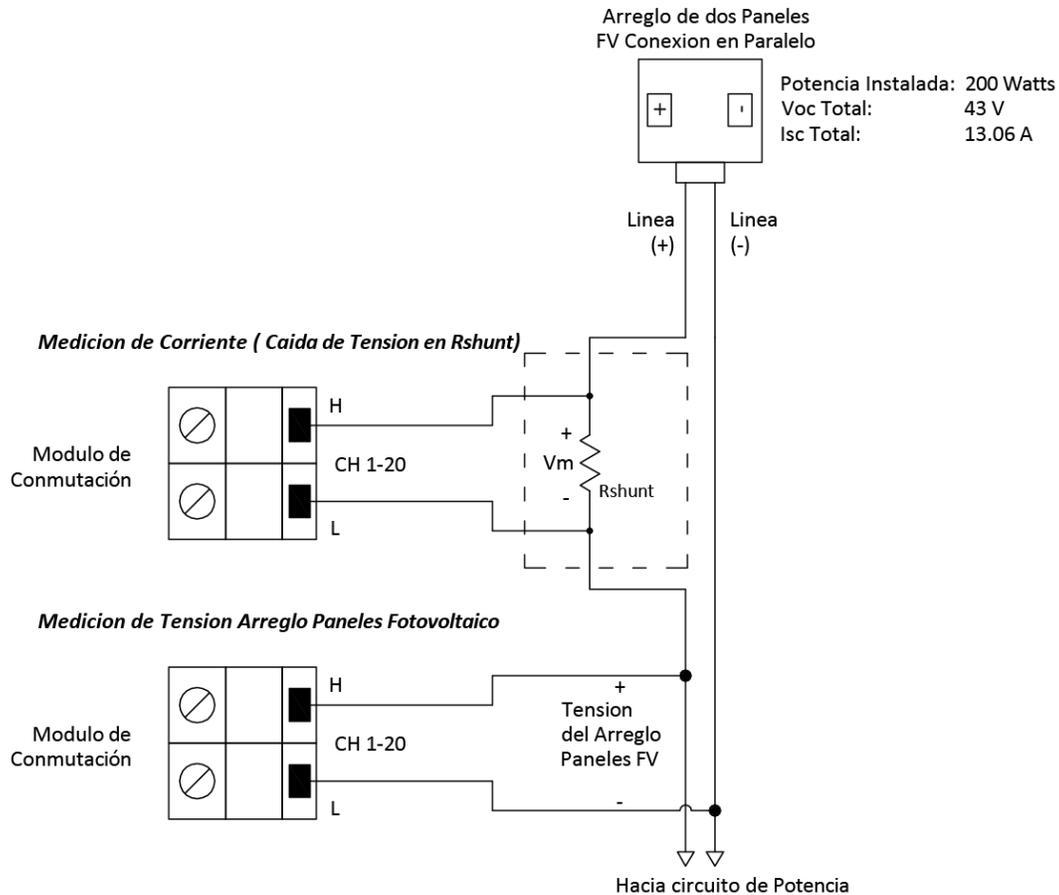


Figura 87: Diagrama de conexión para la medición de tensión y corriente del SFV.[37]

## 2.5. ANÁLISIS DE DATOS EXPERIMENTALES.

A continuación se presentan los resultados obtenidos por medio de las mediciones realizadas a cada uno de los componentes del Sistema Solar Fotovoltaico.

### 2.5.1 Irradiación solar:

Para asegurarnos que los datos son confiables se realizó una comparación con los datos mostrados por una estación meteorológica ubicada del edificio de potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador, en la Figura 88 se puede apreciar el

gráfico obtenido del sitio web de la estación meteorológica anteriormente descrita para el día 18 de agosto de 2015 y en la Gráfica 12 se puede apreciar el mismo intervalo de medición con los datos recolectados por medio de nuestros sensores.

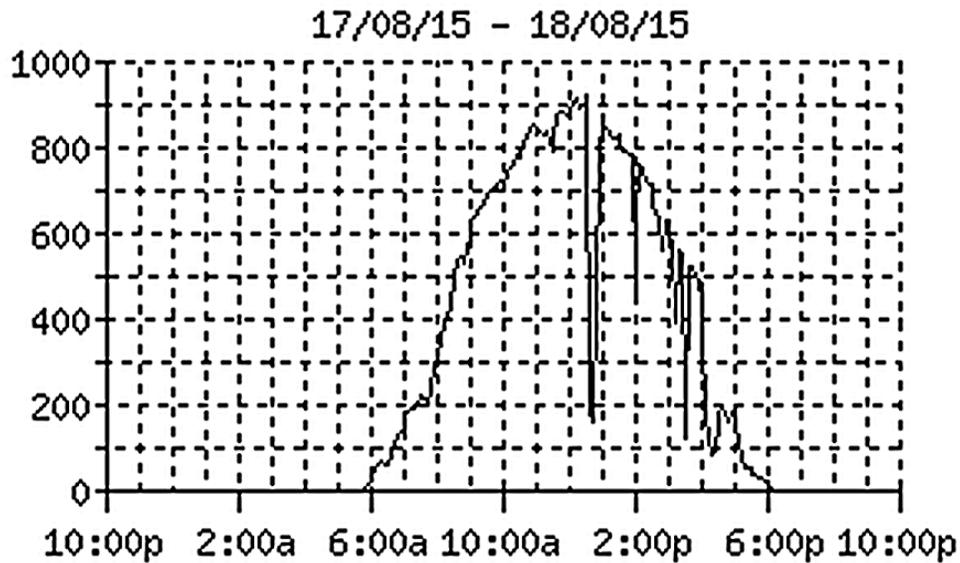
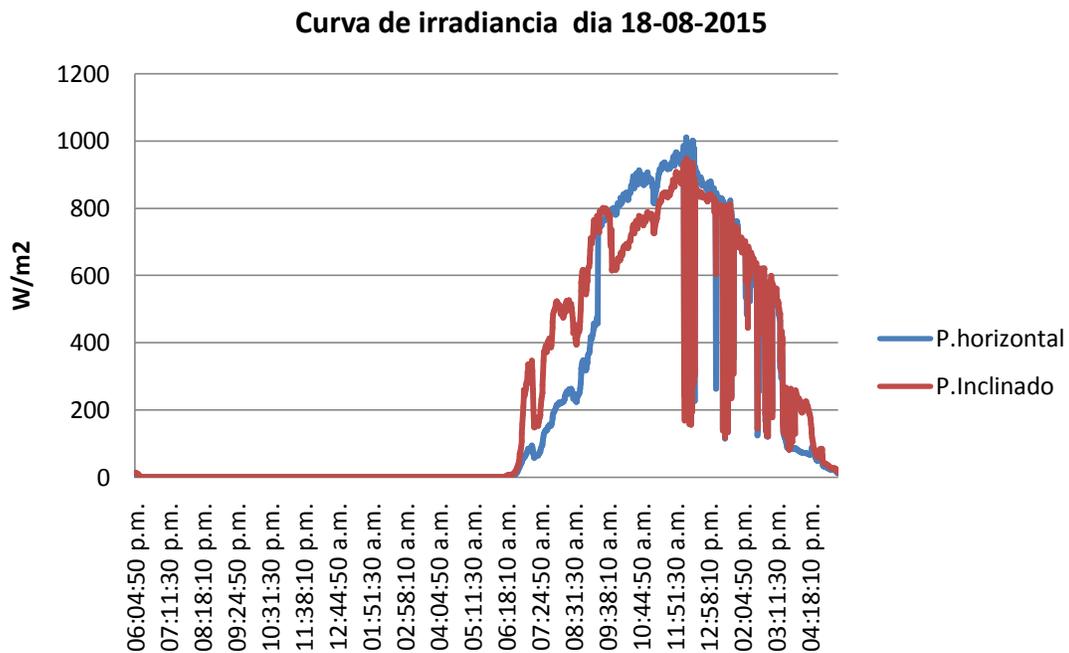


Figura 88: Curva obtenida del sitio web <http://clima.fia.ues.edu.sv/> donde se puede apreciar la irradiación solar en el día 18-08-2015.[38]



Gráfica 12: Toma de mediciones de irradiación el día 18-08-2015.[32]

Se puede apreciar que ambas gráficas mantienen la misma tendencia, lo cual garantiza que los datos obtenidos son adecuados.

Otra prueba para comprobar la exactitud de los datos recolectados es observar la Figura 89 y verificar la hora de la salida y puesta del sol, para dicha comprobación se utilizó el dato proporcionado por el sitio web del ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN). Donde indica que la salida del sol fue a las 5:44 a.m. y su puesta fue a las 6:17 p.m.

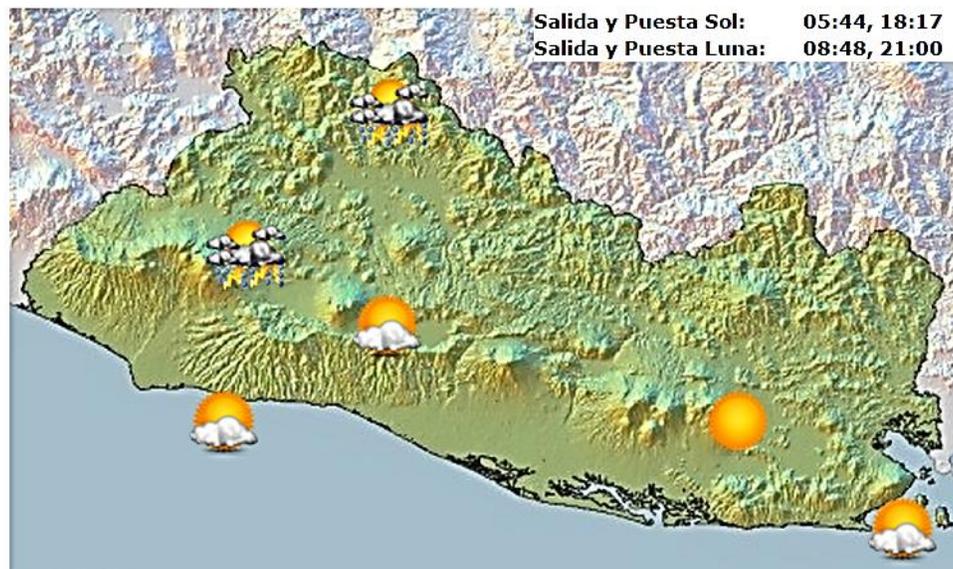


Figura 89: Dato de salida y puesta del sol el día 18-08-2015, en El Salvador, proporcionado por el MARN.[39]

Como se puede apreciar en la Figura 89, la salida del sol marca los primeros datos de irradiación solar, lo cual proporciona de mayor confiabilidad a las mediciones.

A continuación en la Gráfica 13 se pueden observar los datos recolectados en un día promedio de medición, donde se aprecia que la gráfica que representa al plano inclinado posee un valor mucho mayor que la gráfica que representa a el plano horizontal. Del

análisis de dicha gráfica promedio se puede extraer el valor de la irradiancia promedio diaria, la cual se muestra en la Tabla 16 con un incremento en el plano inclinado valor de irradiancia del 8.5% respecto al plano Horizontal:

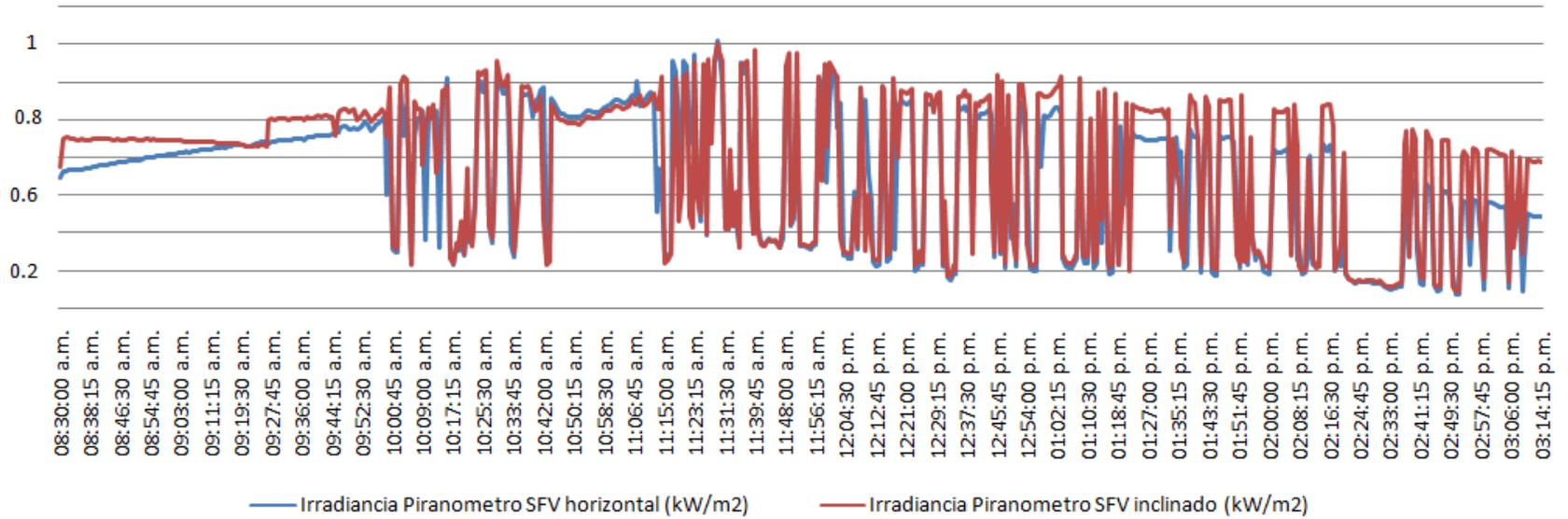
Inclinación	Promedio de medición (W/m <sup>2</sup> )
Irradiancia Piranómetro Horizontal	711.228148
Irradiancia Piranómetro Inclinado a 30°	771.664031

Tabla 16: De análisis de la curva de irradiancia solar en un día promedio, se pueden observar los datos del promedio de las mediciones de irradiancia para cada uno de los días.[32]

*Incremento de irradiancia en el plano inclinado*

$$= \frac{771.664031 - 711.228148}{711.228148} * 100\% = 8.5\%$$

**Curvas de Irradiancia Horizontal e Inclinada a 30 grados orientación Sur  
Hora: 8:30 am hasta 3:00 pm**

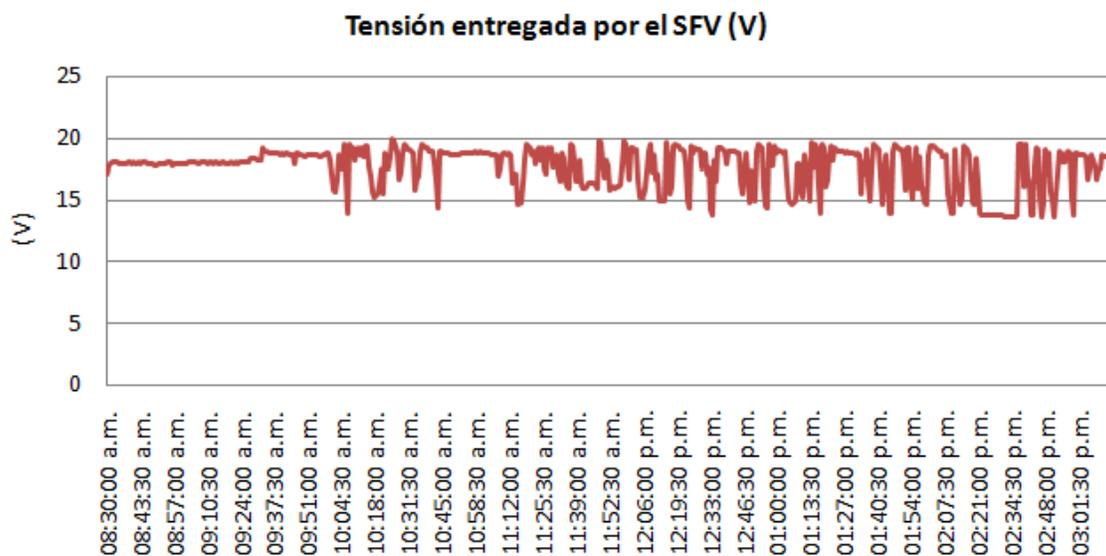


Gráfica 13: Toma de datos de un día se puede apreciar como el promedio de mediciones del plano inclinado es superior al valor de irradiancia del plano horizontal.[32]

## 2.5.2 Análisis de datos del generador fotovoltaico.

A Continuación se presentan los datos recolectados del arreglo fotovoltaico y su respectivo análisis, como primer paso se presenta las gráficas de la tensión nominal y la corriente generadas por el arreglo.

En la Gráfica 14 se puede apreciar los datos de tensión que el sistema fotovoltaico entrega al controlador de carga.

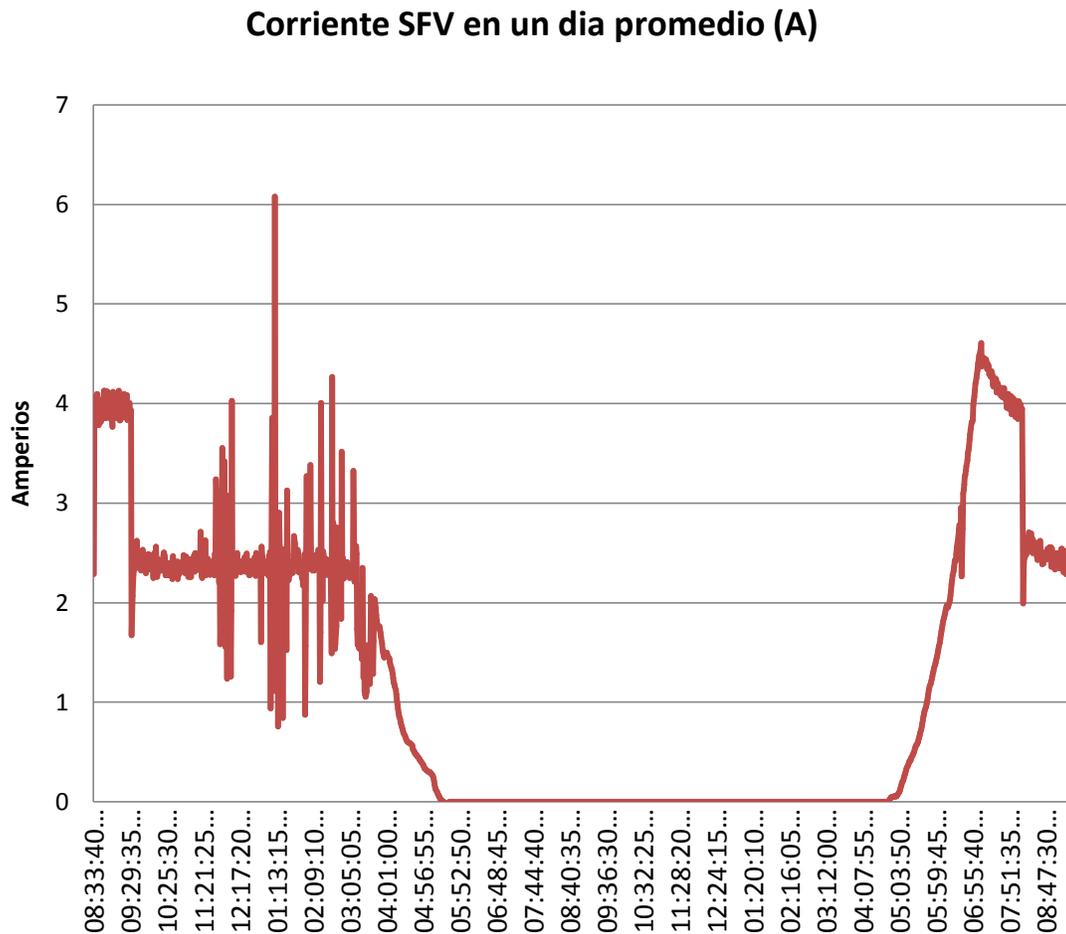


Gráfica 14: Datos de tensión entregada por el SFV en un día promedio.[32]

De la gráfica anterior se puede determinar el valor de tensión promedio diario, el cual es de: 17.69 V.

Ahora se debe determinar el valor de corriente promedio diario, el cual se obtiene del análisis de la Gráfica 15, la cual representa los datos obtenidos en un día promedio, del análisis de los datos se determina que el valor promedio de corriente en un día, es de: 2.19A.

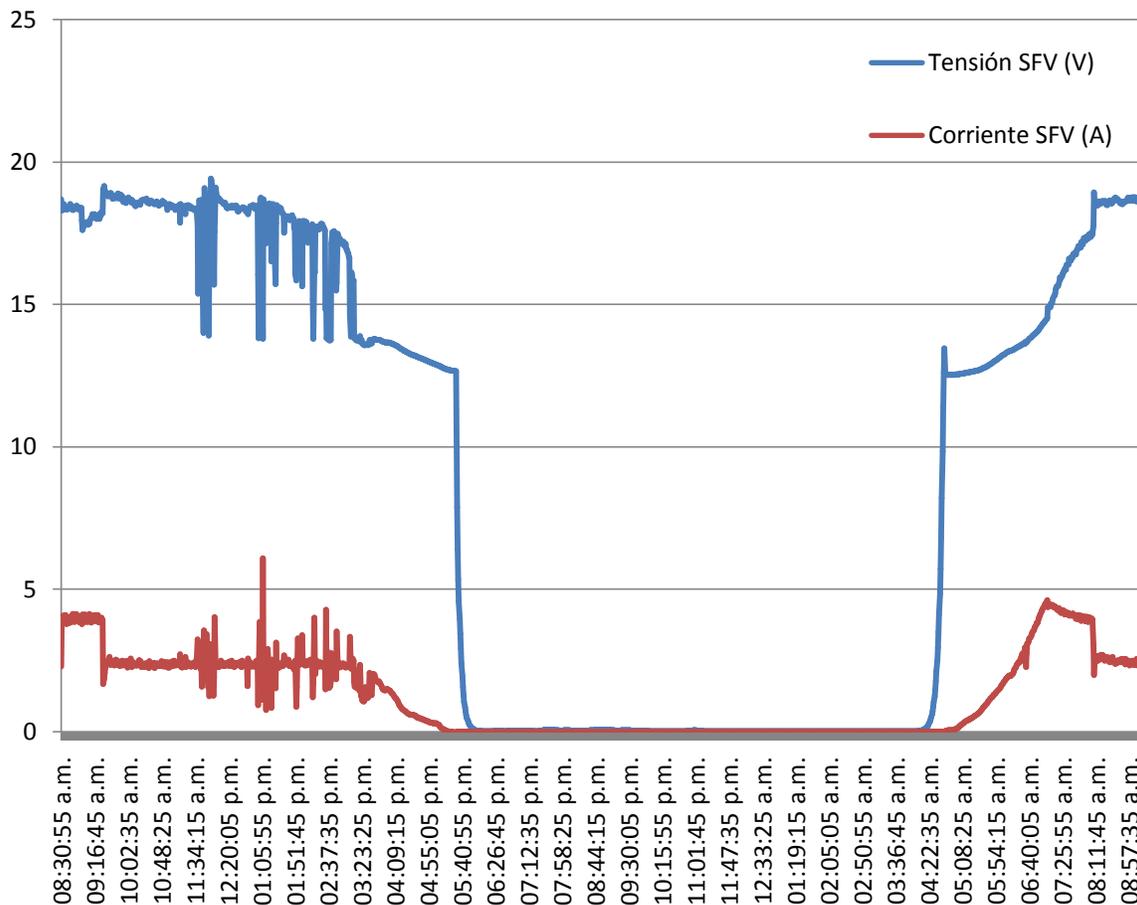
Es de recordar que este valor se obtiene en un periodo de tiempo en el cual las baterías ya están previamente cargadas, el valor de la corriente cuando el sistema de acumuladores esta descargado se mencionara más adelante.



Gráfica 15: Corriente suministrada por el sistema FV en un día promedio.[32]

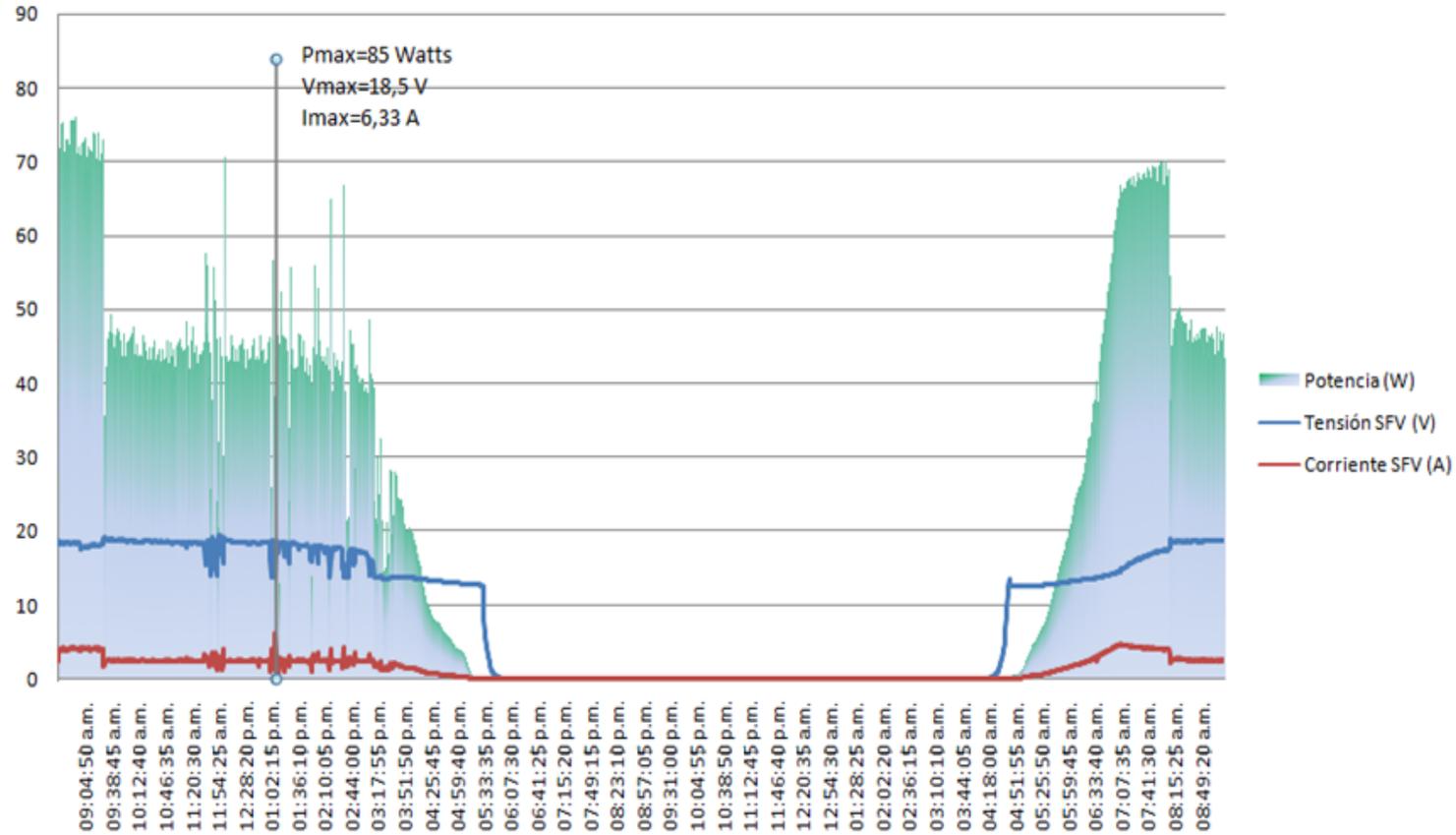
En la Gráfica 16 se pueden apreciar la gráfica de tensión y la gráfica de corriente, de la cual se puede observar como a medida que la luz solar se termina los datos empiezan a llegar al punto de cero. Otro punto importante de observar es que el valor de tensión se incrementa de forma considerable hasta llegar a aproximadamente 12V, luego a medida que la irradiación solar aumenta, el valor de tensión crece hasta estabilizarse, por el

contrario la corriente incrementa de manera exponencial con una curva suave que aumenta consecutivamente en el tiempo.



Gráfica 16: Corriente y tensión de un día promedio.[32]

### Datos de generación del SFV en un día promedio.



Gráfica 17: Gráfica de potencia de un día potencia, donde además se puede apreciar los valores máximos de medición.[32]

Además se graficaron los datos de potencia de un día promedio, de donde se obtuvieron los valores de máximos para dicho periodo, los cuales son:

Potencia Máxima = 85.00 Watts

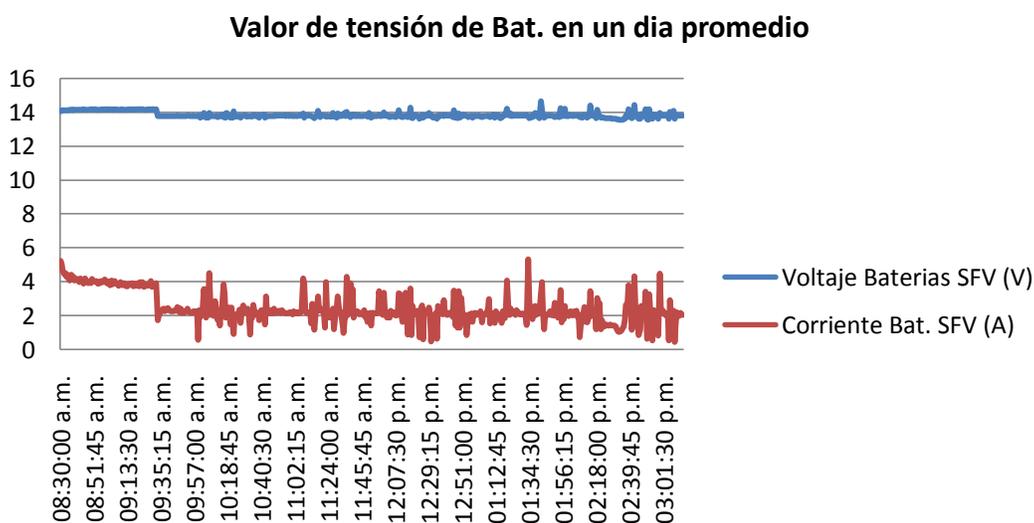
Tensión máxima = 18.5 V

Corriente Máxima = 6.33 A

Si observamos el valor de la tensión en dicho punto se puede comparar con el dato de placa el cual es  $V_{mmp} = 17V$ , la cual es muy similar considerando que dicho valor fue tomado a condiciones de laboratorio.

### 2.5.3 Análisis de datos de baterías.

A continuación se presentan los datos del análisis del sistema de acumuladores, como primer punto se analizará el valor de tensión y corriente en un día promedio, el cual se presenta en la Gráfica 18.



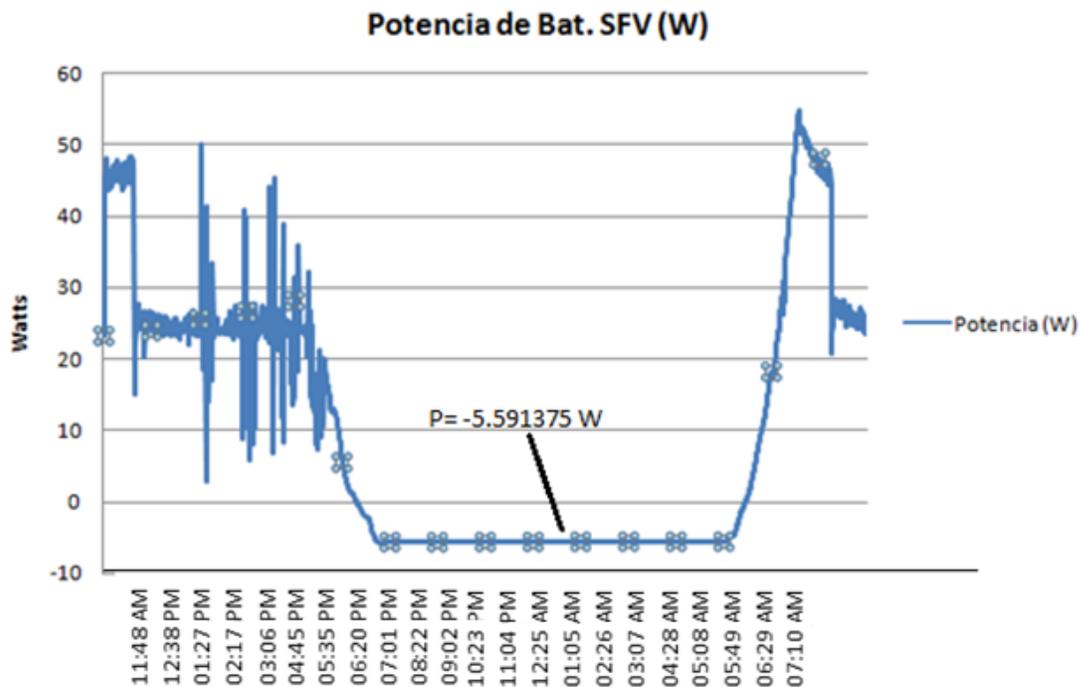
Gráfica 18: Valor de la tensión de las baterías y la corriente de las mismas, en un día promedio.[32]

De la gráfica anterior se puede determinar el valor promedio de tensión y corriente, los cuales son los siguientes:

Tensión promedio Bat: 13.86 V

Corriente promedio Bat: 2.43 A

Como siguiente paso se observará el gráfico de potencia de las baterías para el mismo periodo, el cual se puede observar en la Gráfica 19.



Gráfica 19: Potencia de las baterías del sistema fotovoltaico.[32]

En la gráfica anterior se puede apreciar como durante la noche el sistema de acumuladores funciona como generador, generando un valor constante de: 5.59 W, lo cual es el consumo del inversor y de las bobinas de los contactores, durante el día las baterías se cargan lo cual genera una potencia alta.

#### 2.5.4 Análisis de datos del Controlador de carga.

Ahora analizaremos el funcionamiento del controlador de carga, como primer punto se comprobará que el sistema trabaje siguiendo el concepto teórico del funcionamiento de este tipo de equipos en el proceso de carga de las baterías.

En la Figura 90 se puede apreciar la gráfica de carga teórica de una batería, en la cual se pueden apreciar las 3 etapas del proceso de carga tal como se mencionaron en el capítulo I.

Las 3 etapas como se mencionó anteriormente son:

- Bulk
- Absorción
- Flotación

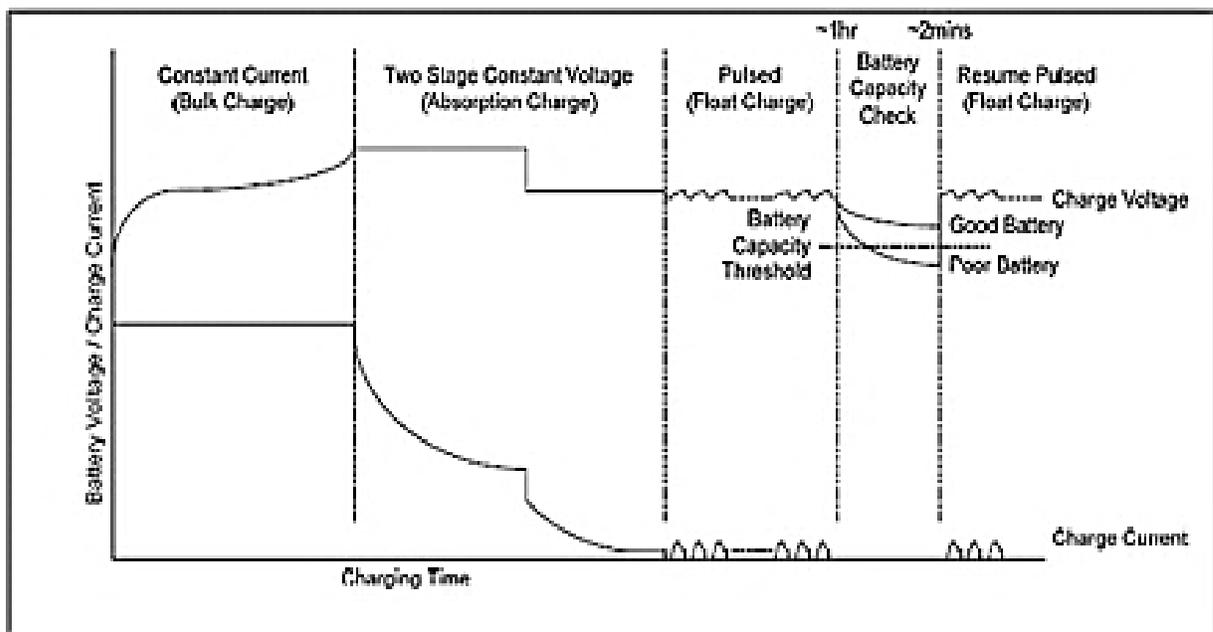
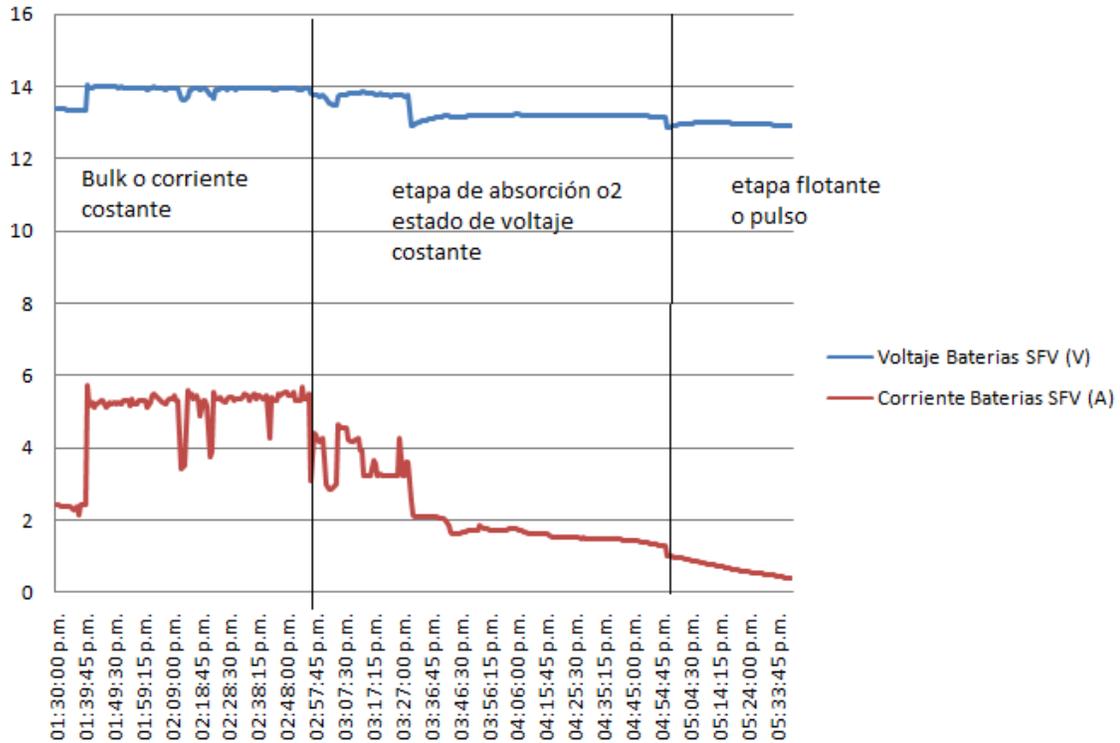


Figura 90: Proceso de carga de una batería por medio de un controlador de carga.[5]

## Gráfico de Proceso de carga de Baterias



Gráfica 20: Proceso de carga de una batería, donde se puede apreciar las 3 etapas del proceso de carga generado por el controlador de carga.[32]

En la Gráfica 20 se puede apreciar como en los datos tomados del proceso de carga del sistema de baterías, se cumple con las formas de la curva del modelo teórico de las etapas del proceso de carga.

### CAPÍTULO III: DISEÑO DE RECURSO SOLAR TÉRMICO.

Para la caracterización del recurso solar térmico se realizaron diversos ensayos, dependiendo de cuál propiedad física se desea analizar, cabe destacar que los ensayos fueron realizados para un sistema solar térmico de baja temperatura.

Estos ensayos fueron desarrollados mediante la síntesis de la normativa internacional UNE-EN 12975-2006 en donde los parámetros básicos en un equipo de calentador solar de placa plana son los siguientes: irradiancia, temperatura y caudal.

Pero antes se hablará del equipo de calentador solar de placa plana implementado en el laboratorio montado sobre la biblioteca de la FIA-UES.

#### 3.1. EQUIPO UTILIZADO EN EL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.

Como se mencionó en la sección de energía solar térmica del capítulo I, un sistema solar térmico consta de 3 equipos principales como son el sistema almacenador o termotanque, el sistema captador o colector solar y el sistema de distribución. Adicionalmente se describen los sensores e instrumentos para la caracterización del sistema solar térmico.

##### 3.1.1. Termotanque.

O también conocido como etapa de almacenamiento, en la instalación del laboratorio es el termotanque de la marca KALOTRON Solar modelo 46002 como el mostrado en la Figura 91.



Figura 91: Termotanque empleado en el laboratorio.[40]

Entre sus características se encuentran la de poseer en su interior una cubierta como aislante térmico de Poliuretano, el tanque es porcelanizado, su capacidad de volumen es de 150 lt, su temperatura máxima de almacenamiento es de 50°C - 60°C, la presión de trabajo es de 6.5 Kg/cm<sup>2</sup>.

La conexión de las tuberías CPVC de entrada y salida de agua caliente sanitaria se muestra en la Figura 92, donde la tubería roja muestra la salida del agua caliente del termotanque, y la tubería de color azul muestra la entrada de agua fría al termotanque.

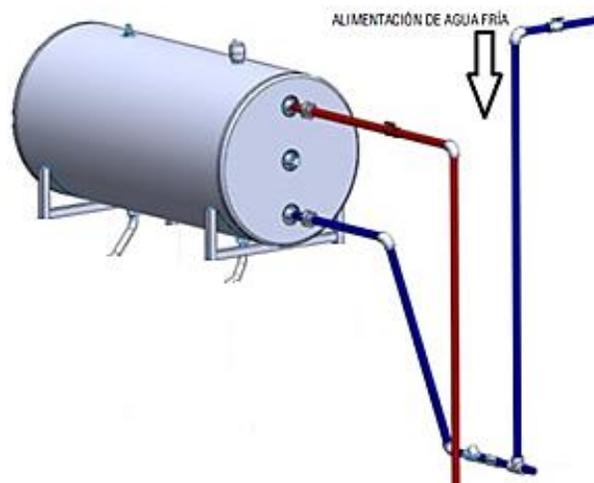


Figura 92: Conexión de tuberías CPVC al termotanque[40].

Además el termotanque posee las siguientes válvulas en la parte superior:

Válvula eliminadora de aire: Se encarga de eliminar el aire acumulado en el interior del tanque, dicha válvula es mostrada en la Figura 93:



Figura 93: Válvula eliminadora de aire. [40]

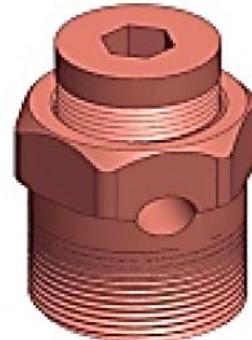


Figura 94: Válvula de alivio. [40]

Válvula de alivio: Elimina la presión excedente dentro del tanque, es decir, en un incremento de la presión esta válvula extrae esta sobre presión del termotanque, por lo cual se puede decir que es autoregulable, la válvula de alivio se mostró en la Figura 94.

Tabla resumen de termotanque.

TERMOTANQUE KALOTRON SOLAR	
Modelo	46002
Aislante	Poliuretano
Tanque	Porcelanizado
Capacidad	150 lt
Temperatura	50°C - 60°C
Presión de trabajo	6,5 kg/cm <sup>2</sup>
Otros	
El Termotanque Posee:	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Válvula de alivio.</li> <li>• Válvula Eliminadora de Aire.</li> </ul>	

Tabla 17: Resumen de características del Termotanque. [41]

### 3.1.2. Colector solar.

El colector instalado en el laboratorio es conocido como colector solar plano y su principal aplicación es el del agua caliente sanitaria o agua caliente para uso doméstico, dicho colector solar es de la marca KALOTRON SOLAR modelo 47008, y se muestra en la Figura 95.

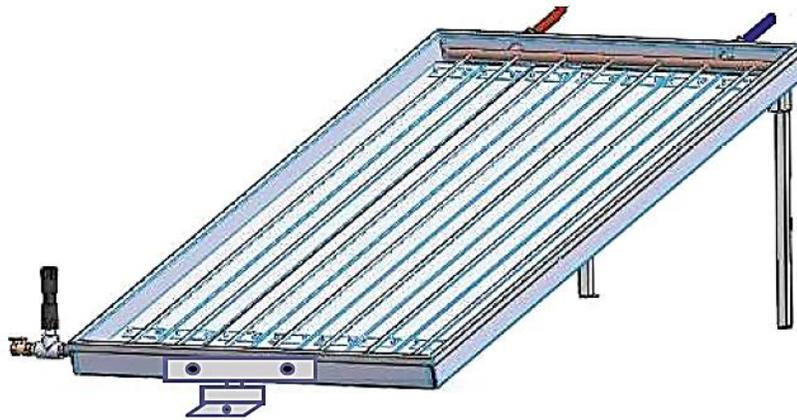


Figura 95: Colector Solar plano empleado en el laboratorio.[40]

Entre sus características se puede mencionar que posee una cubierta aislante de la tecnología Tempshield que consiste en una o dos capas de aire entre dos capas de aluminio, la cual proporciona una excelente resistencia térmica, el cual evita la máxima pérdida de temperatura en su cubierta, también posee en su captador tubos de cobre con aletas de aluminio, en su cubierta es de policarbonato, al inferior de este posee una llave de drene y conector TEE para instalar válvula anti congelamiento.

Colector solar plano KALOTRON SOLAR	
Modelo	47008
Aislante	Tempshield
Captador	Tubos de Cobre con Aletas de Aluminio
Cubierta	Policarbonato
Otros	
El colector solar Posee: Llave de Drene y conector TEE para instalar válvula Anti congelamiento.	

Tabla 18: Resumen de características del colector solar plano.[41]

### 3.1.3. Sistema de distribución.

El sistema de distribución es el que se encarga de transportar el agua fría hasta el termotanque y también se encarga de salida desde el termotanque con el agua caliente hasta el punto de consumo.

El sistema de distribución fue montado con tubería de Policloruro de vinilo clorado CPVC el cual es un termoplástico producido por cloración de la resina de policloruro de vinilo (PVC). Los usos incluyen tuberías de agua fría y caliente, y el manejo de líquidos industriales debido a su excelente resistencia a temperaturas elevadas.

### 3.1.4. Termopar tipo J

Primero se describe la definición de un termopar, y no es más que un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce una diferencia de potencial muy pequeña del orden de los milivoltios, que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado punto caliente o unión caliente y el otro llamado punto frío o unión fría. Y debido a la unión de diversos metales existe una diversidad de tipos de termopares. En la Figura 96, se muestra un termopar como el usado en el laboratorio de energías renovables.



Figura 96: Termopar empleado.[42]

A continuación se muestra una tabla que describe algunos tipos de termopares y las temperaturas de trabajo.

TIPO DE TERMOPAR Y UNIONES	RANGO DE TEMPERATURA
“J” Hierro-Constantan	-0 - 760 °C.
“K” Cromel-Alumel	-200 + 1370 °C.
“T” Cobre-Constantan	-200 + 350 °C.
“E” Cromel-Constantan	-200 + 1250 °C.
“R” Platino-Platino-Rhodio 13%	0 + 1450 °C.
“S” Platino-Platino-Rhodio 10%	0 -1450 °C.
“B” Platino Rhodio 30% -Platino Rhodio 6%	0 -1700 °C.

Tabla 19: Tipos de termopares y rango de temperatura soportada. [42]

En la Figura 97 se muestra el diagrama de conexión de los termopares en el sistema instalado en el laboratorio de energías renovables para su constante monitoreo de temperaturas en la entrada y salida de agua de las tuberías CPVC.

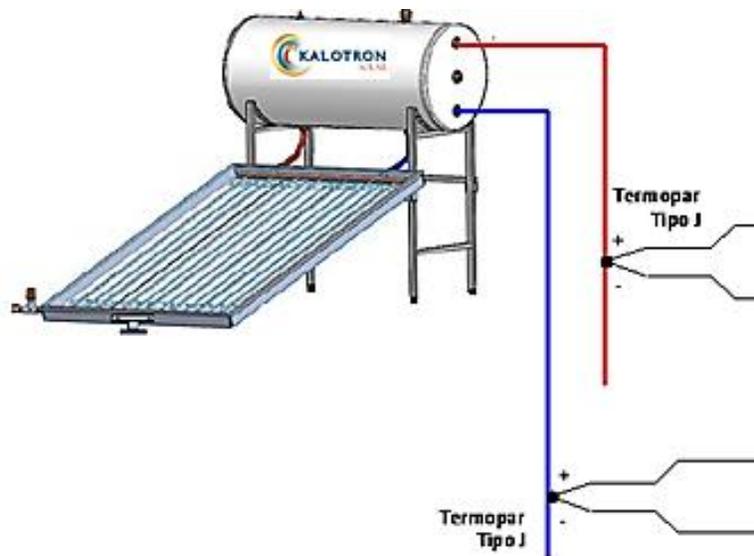


Figura 97: Colocación de termopar en las tuberías del sistema. [36]

### 3.1.5. Medidor volumétrico de agua.

La función básica del medidor volumétrico de agua consta en cuantificar el volumen de agua proveniente del termotanque en un instante determinado, esto con el fin de lograr la medición del caudal explicada en una sección posterior a esta para su caracterización.

La Figura 98, muestra el medidor volumétrico empleado en el laboratorio.



Figura 98: Medidor volumétrico de agua.[43]

## 3.2. CARACTERIZACIÓN DEL EQUIPO SOLAR TÉRMICO Y MEDICIONES OBTENIDAS.

### 3.2.1. Irradiancia.

Al momento de la caracterización del equipo es de suma importancia los datos de irradiación en el lugar a montar cualquier componente del sistema de energía solar térmica. Ya que de esos cálculos se verificara el funcionamiento del equipo fuera de las condiciones de laboratorio.

Para un correcto cálculo de irradiancia se hace un estudio global de los parámetros que influyen en la irradiancia global, se mostrará el método matemático para el cálculo de todas las irradiaciones en un lugar específico.

Primero se presentan las coordenadas geográficas de la ubicación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, con una Latitud  $\phi$  de 13.72 y una Longitud de -89.20 a una altitud de 695 msnm.

Luego se calcula la declinación solar  $\delta$ , el cual es el ángulo entre la línea Sol-Tierra y el plano ecuatorial celeste. El valor de la declinación solar varía a lo largo del año, de 23,45° (21 de junio), a - 23,45° (21 de diciembre), la ecuación que describe este parámetro es la siguiente:

$$\delta = 23.45 \sin \left( 360 \left( \frac{284 + n}{365} \right) \right) \quad \text{Ecuación 18: Declinación solar. [3]}$$

Siendo n el número correlativo del año.

Después se hace el cálculo de la altura solar  $\alpha$  el cual es el ángulo comprendido entre la localización del astro sol y el horizonte, y la ecuación que la representa es la siguiente, donde  $\omega$  representa ángulo horario a la salida del sol y  $\phi$  la Latitud.

$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad \text{Ecuación 19: Altura solar. [3]}$$

El ángulo acimutal solar  $\sigma$ , el cual se mide sobre el horizonte, y es el ángulo comprendido entre el punto cardinal Sur el cual se toma como origen y el punto que se desplaza el astro sol, y la ecuación que representa este parámetro es la siguiente:

$$\cos \sigma = \frac{\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta}{\cos \delta \cos \phi} \quad \text{Ecuación 20: Ángulo acimutal. [3]}$$

Para el cálculo de la irradiancia directa se hace mediante la siguiente ecuación

$$G = B \cos \theta + D \quad \text{Ecuación 21: Irradiancia Global.}[3]$$

Dónde:

D: irradiancia difusa

B: irradiancia directa

G: irradiancia global

$\theta$ : Ángulo de incidencia el cual se calcula de la siguiente ecuación.

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos w \quad \text{Ecuación 22: Ángulo de incidencia solar.}[3]$$

Mediante el uso de un piranómetro modelo SKS110 marca Skye se encuentran las constantes de calibración de  $K = 10 \frac{\mu V}{w.m^{-2}}$  y el piranometro patrón  $K = 13 \frac{\mu V}{w.m^{-2}}$ .

La irradiancia difusa de las pruebas se calcula mediante la siguiente ecuación, de la cual se despeja dicha variable:

$$K = \frac{V_{difusa}}{I_{difusa}} \quad \text{Ecuación 23: Constante de calibración.}[3]$$

$$I_{difusa \text{ pira}} = \frac{V_{difusa}}{K_{pira}}$$

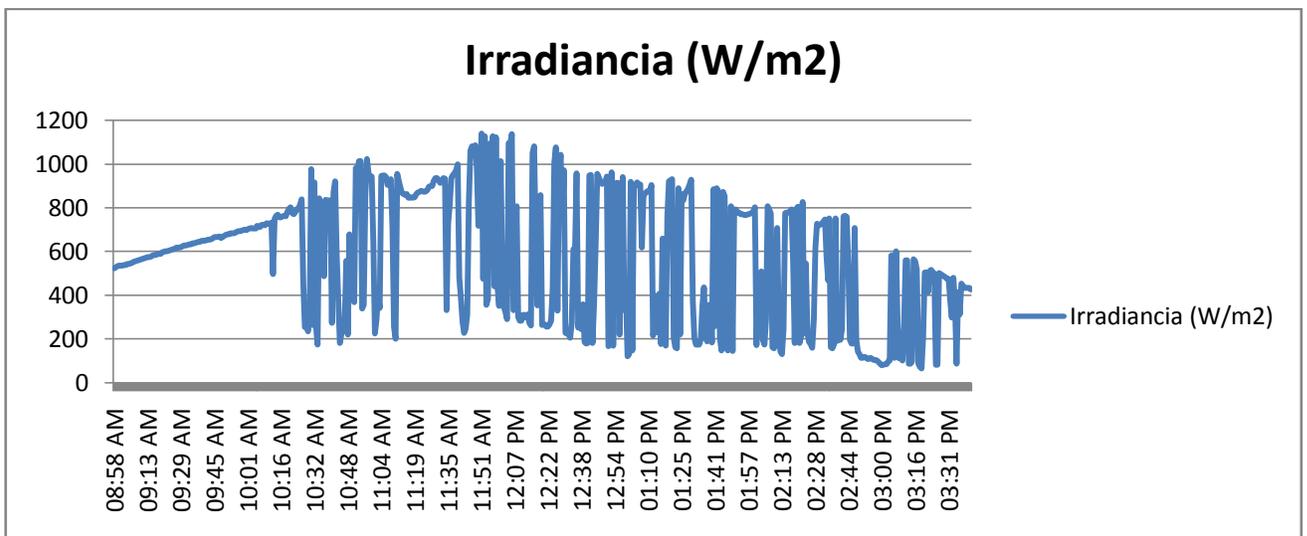
Resolviendo para cálculo de irradiancia directa se despeja de la Ecuación 21, y sustituyendo por los demás valores:

$$B = \frac{G - D}{\cos \theta}$$

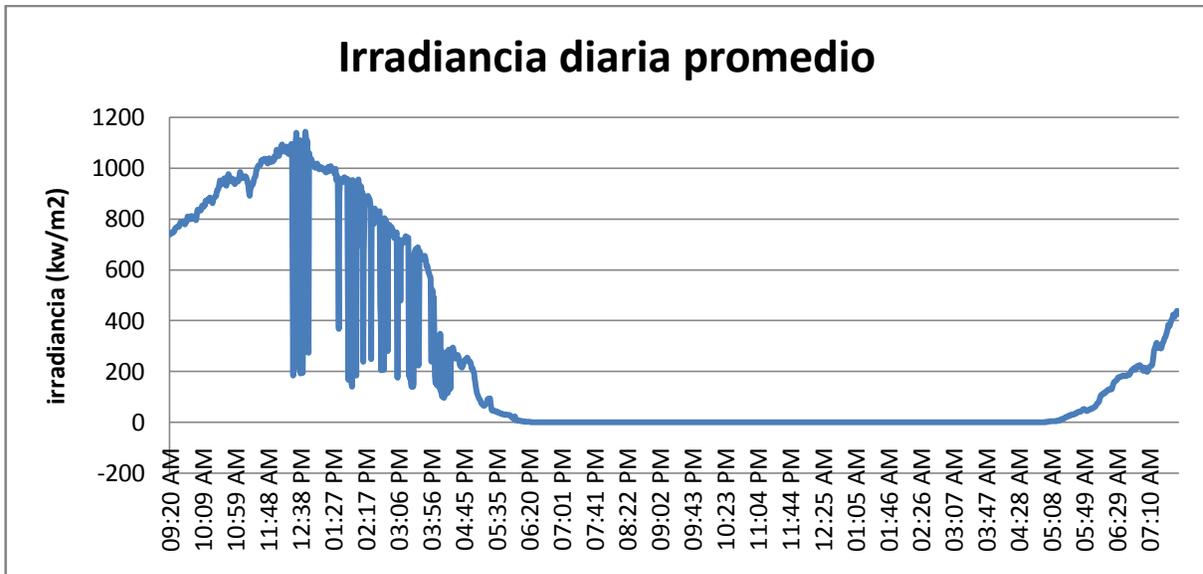
Ecuación 24: Irradiancia directa.[3]

Para el tiempo de caracterización sobre la irradiancia, a lo largo del periodo de toma de mediciones se realizaron mediciones arrojadas por el piranómetro, las cuales devuelve al Data Logger un valor en mV y el valor de la irradiancia se calcula mediante la Ecuación 24: Irradiancia directa. y su constante de calibración.

De los datos arrojados se genera la Gráfica 21 de irradiancia promedio, donde se aprecia caídas en los valores de irradiancia debido al paso de nubes, donde se puede ver las variaciones de irradiancia durante la tarde de un día.



Gráfica 21: Irradiancia de una tarde promedio con nubes.[44]



Gráfica 22: Irradiancia diaria promedio.[44]

### 3.2.2. Temperatura.

Para la caracterización de la temperatura se realiza mediante un monitoreo constante de los termopar tipo J instalados en las tuberías CPVC a la salida y entrada de agua del termostanque, los termopar se conectan a los canales del Data Logger, como se puede ver en la Figura 99.

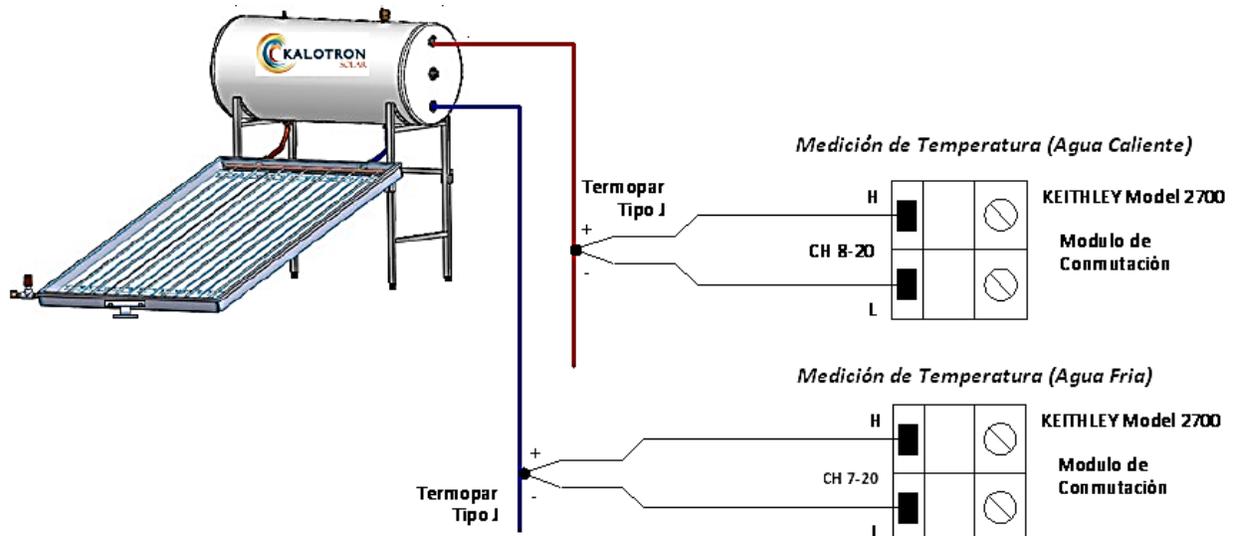
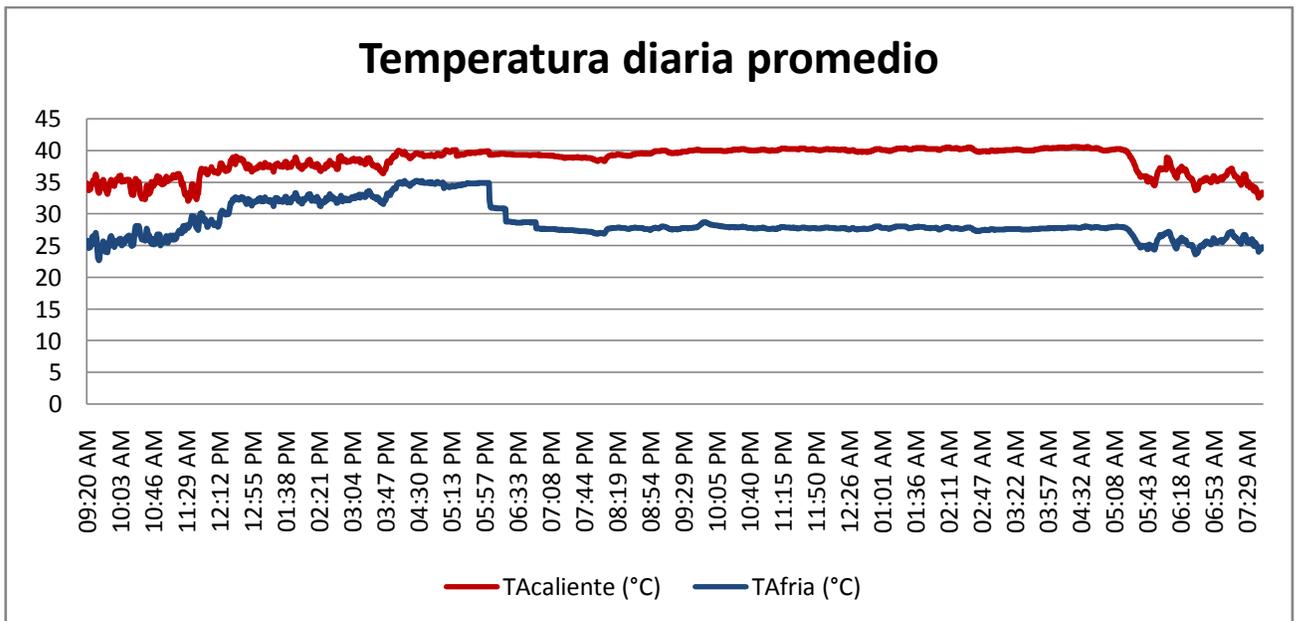


Figura 99: Diagrama de conexión de termopar en las tuberías del termotanque.[36]

En el periodo de caracterización se han logrado tomar diversas medidas de temperatura gracias al Data Logger, de los cuales se muestra una curva característica promedio de cada uno de los termopares, dicha curva se presenta en la Gráfica 23.

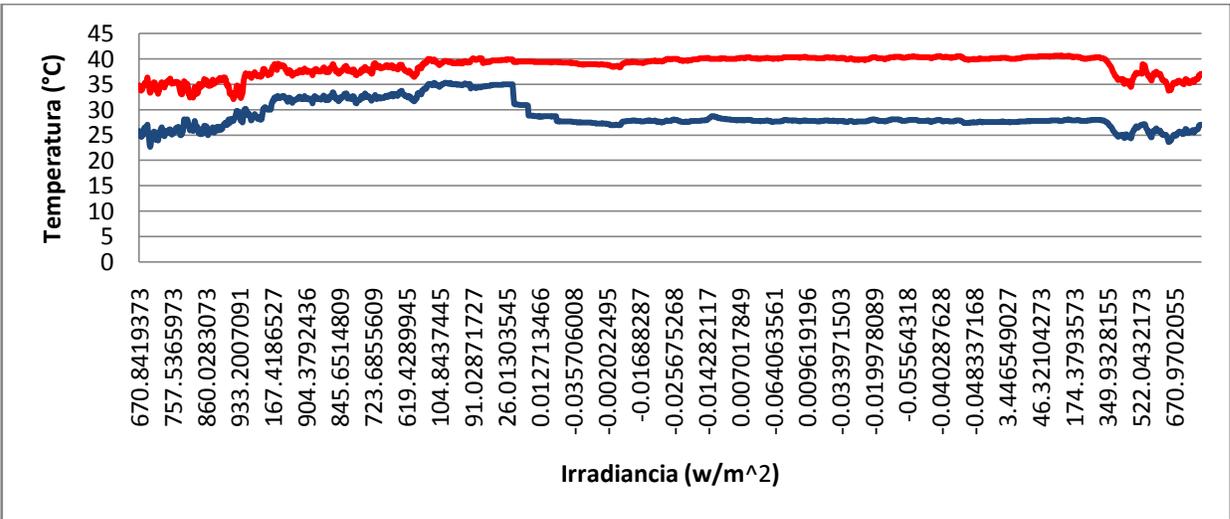


Gráfica 23: Curvas promedios de Temperatura.[44]

De la Gráfica 23 se aprecia la temperatura promedio a lo largo de un día en el cual se aprecia que la temperatura durante el día y la noche permanecen bajo un rango constante y con pérdidas cercanas a 5°C según los datos del fabricante, aun y cuando la temperatura ambiente cambie la temperatura de la salida del termotanque se mantendrá en valores superiores a esta, manteniendo así el calor aun durante la noche.

En el periodo de muestreo de los termopares, se realizó un análisis de los datos diarios obtenidos por el Data Logger, en el cual se puede apreciar una diferencia de temperatura promedio de 9.87°C dicho de otra forma, el agua fría que entra al termotanque es elevado en promedio casi 10°C.

Ahora, se mostrará el comportamiento de la temperatura conforme varia la irradiancia durante el día, lo cual se muestra en la Gráfica 24, donde se puede apreciar que durante la noche y madrugada los valores de irradiancia solar bajan a cero pero la temperatura trata de mantenerse a la temperatura ganada durante el día. La línea roja trazada muestra la temperatura censada en la tubería de agua caliente, mientras que la línea azul muestra la temperatura censada en la tubería de entrada al termotanque de agua fría.



Gráfica 24: Curvas promedios de Temperatura vs Irradiancia.[44]

### 3.2.3. Caudal en sistema de distribución.

Para la realización de las siguientes pruebas de medición de caudal se realizaron mediante 2 métodos para la entrada y salida de agua del termotanque.

En la entrada de agua fría se utilizó una conexión de un medidor volumétrico en metros cúbicos para medir en cuanto tiempo varia cierta cantidad de volumen de agua, y el cociente de esos valores, determina el caudal de entrada en  $m^3/s$  o ya sea convirtiéndolo a Lt/s.

Dicha prueba da un valor aproximado de  $210 \times 10^{-6} m^3/s$

La siguiente prueba se realizó mediante un depósito graduado y el volumen de salida del termotanque a diferentes aperturas de la válvula de paso lo cual para la medición del caudal se desarrolló el cociente entre de volumen de salida del termotanque y el tiempo con el cual se vertió agua hasta la graduación seleccionada.

Con el cual se muestra en la ecuación 25.

$$Q = \frac{V}{t}$$

Ecuación 25: Caudal.[46]

Dónde:

Q: Caudal

V: Volumen

t:Tiempo

Los datos promedio con la válvula de paso a media apertura brindan cálculos de caudal de  $56.9 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  o  $56.9 \times 10^{-3} \text{ L/s}$ ., mientras que los datos promedio con la válvula de paso a total apertura brinda cálculos de caudal de  $207 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  o  $207 \times 10^{-3} \text{ L/s}$ .

### 3.3. ESTUDIOS DE DATOS DEL SISTEMA SOLAR TÉRMICO.

#### 3.3.1. Estudio económico.

Con los datos de temperatura ya obtenidos en la caracterización del equipo solar térmico, se procederá a hacer un estudio económico al ser sustituido por un calentador de agua eléctrico convencional y ver su impacto en la facturación de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de La Universidad de El Salvador FIA-UES.

Ahora bien, si se asume una temperatura ambiente de  $25^\circ\text{C}$ , y al calentar toda el agua a  $40^\circ\text{C}$  se aplica la siguiente ecuación para encontrar la Cantidad de calor tomando la capacidad calorífica del agua como una constante:

$$Q = m * c * \Delta T \qquad \text{Ecuación 26: Cantidad de calor.}[3]$$

Dónde:

Q: Cantidad de calor.

m: Masa de agua

c: Capacidad calorífica específica.

$\Delta T$ : Diferencia de temperatura.

Además:

Masa de agua: 1Lt de agua = 1 Kg de agua

Calor específico del agua  $\approx 1 \text{ Kcal}/(\text{Kg} \cdot ^\circ\text{K})$

Diferencia de temperatura =  $40^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 15^\circ\text{C}$  que es lo mismo en  $^\circ\text{K}$

Entonces se obtiene  $Q=2250$  Kcal

Y la potencia calorífica por hora se muestra en la Ecuación 27:

$$P = \frac{Q}{t} \quad \text{Ecuación 27: Potencia calorífica. [3]}$$

Resolviendo  $P=2250$  Kcal/1hora =2250 Kcal/hora

Además:

1 kilocaloría = 4187 Joules

1 Joule=1 Watt\*seg

De las conversiones se logra obtener que la potencia para elevar la temperatura en ese delta T es de 2616.87 Watts o 2.617 kW, ahora bien esto trasladado a energía se vuelve que la energía necesaria de un calentador de agua sanitaria para elevar la temperatura durante 1 hora es de 2.62 kWh, y si se mantiene un parámetro de funcionamiento como el sistema solar térmico de mantener el agua a 40°C las 24 horas del día, la energía necesaria por el calentador de agua eléctrico deberá ser de 62.8 kWh durante el día asumiendo que el calentador deberá elevar en ese mismo delta de temperatura durante ese periodo de tiempo.

Aplicable al pliego tarifario vigente 2015 proporcionado por la SIGET, si la energía que se emplea es de 1884.15 kWh durante el mes se tiene un consumo de US\$340.48 es decir de otra forma que en el laboratorio de energías renovables de FIA-UES se tiene un ahorro de casi US\$340.48 mensuales al tener el sistema solar térmico.

Pero de los datos de una hoja técnica de un calentador de agua convencional el uso promedio es de 2 horas diarias por lo cual se obtiene de los datos anteriores y del pliego tarifario vigente un ahorro para la biblioteca de FIA-UES mensualmente de US\$29.18.

## CAPITULO IV: DISEÑO DEL RECURSO EÓLICO.

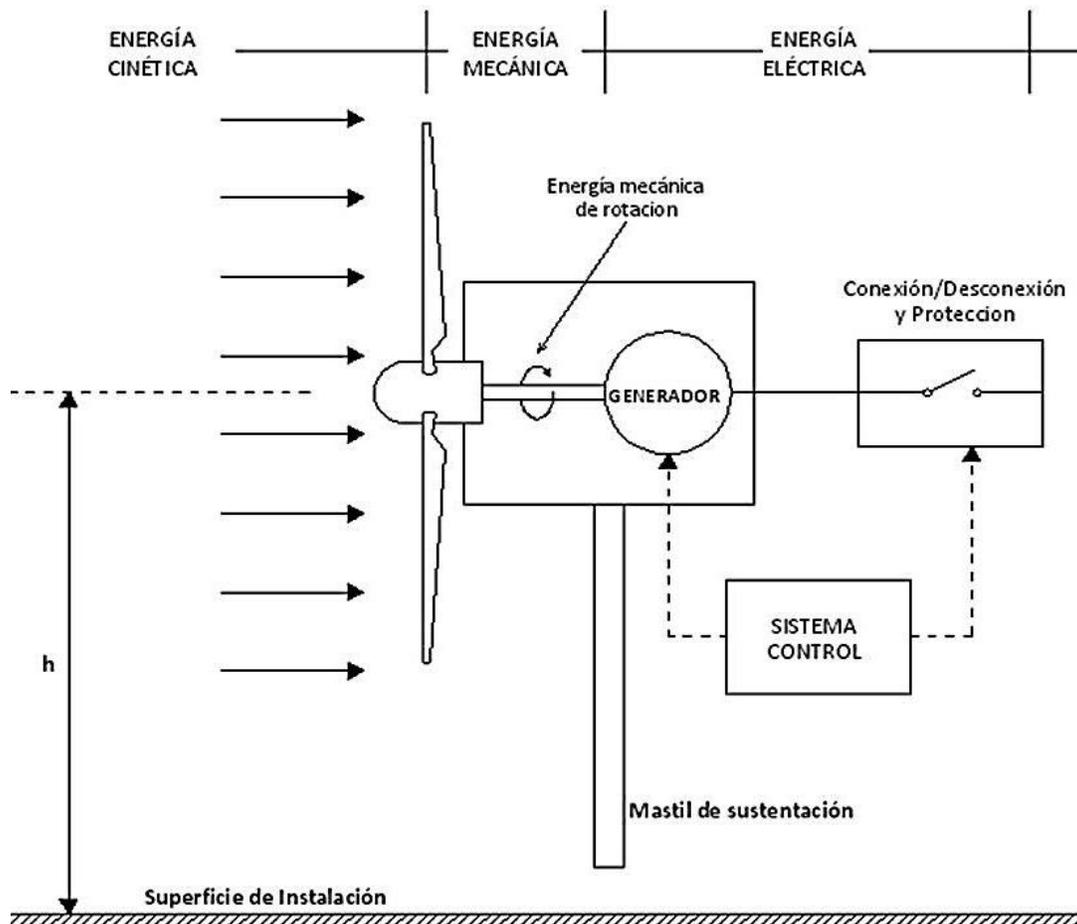


Figura 100: Diagrama en bloques de un sistema eólico [21]

Todo sistema eólico está integrado por un conjunto de subsistemas cuyo objetivo es captar la energía cinética del viento y transformarla en energía eléctrica (fundamentalmente) de la forma más óptima posible.

De forma general pueden señalarse los siguientes subsistemas componentes:

- Subsistema de captación.
- Subsistema de transmisión mecánica.

- Subsistema de generación eléctrica.
- Subsistema de orientación.
- Subsistema de regulación.
- Subsistema soporte.
- Subsistema de conexión y desconexión.
- Subsistema de control.

Como pudo observarse en la Figura 100, la energía cinética de la masa de aire se convierte en energía de rotación (del rotor) y, por tanto, en energía mecánica del tren de potencia. Posteriormente, la energía mecánica del tren de potencia es transformada en energía eléctrica mediante un generador eléctrico.

A continuación se detalla todos los subsistemas aplicados al laboratorio de energías renovables.

El subsistema de captación, de transmisión mecánica, generación eléctrica, orientación y regulación lo conforma en sí el mismo aerogenerador, este es del tipo tripala, posee una serie de engranajes y rodamientos internamente, posee un generador con una capacidad de suplir hasta 400 W a cierta velocidad especificada por el fabricante, además posee un timón de cola, el cual le permite orientarse según la dirección del viento, ya que su diseño es a barlovento, finalmente posee una electrónica que permite la regulación de carga de las baterías conectadas en los bornes de salida del mismo.

El subsistema de soporte lo conforma un mástil instalado sobre la terraza de la biblioteca, el cual tiene una altura de 6 m y esta sujetado a una base de concreto por medio pernos, además cuenta con cuatro tensores para cable de acero inoxidable, los cuales le dan firmeza a toda la estructura.

El subsistema de conexión y desconexión lo conforman un conjunto de interruptores y fusibles, además el subsistema de control es del tipo manual conformado por una maneta de tres posiciones, estos y otros detalles se verán de manera amplia en el diagrama de conexión del sistema eólico.

#### 4.1 EQUIPO UTILIZADO EN EL SISTEMA EÓLICO.

##### 4.1.1 Aerogenerador

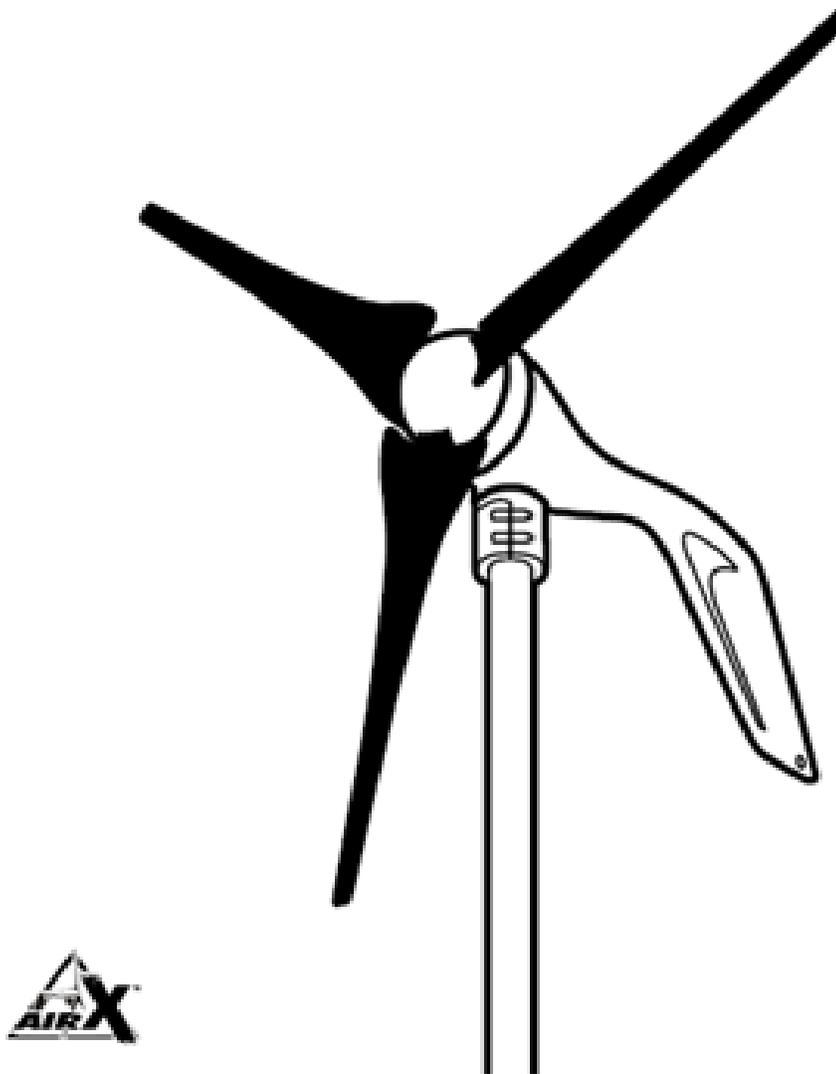


Figura 101: Ilustración del aerogenerador [45]

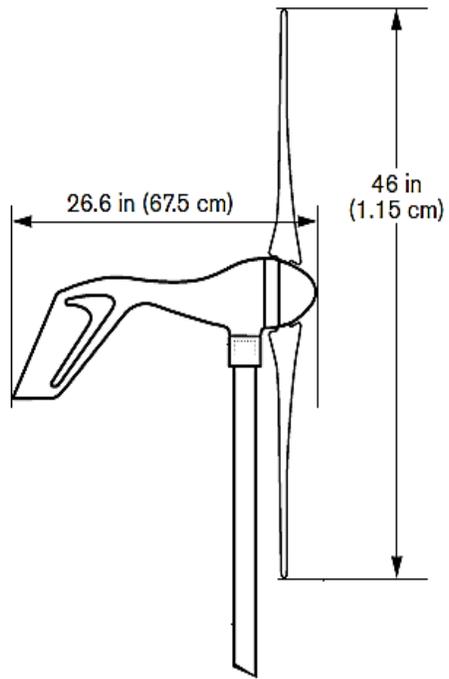


Figura 102: Vista de perfil del aerogenerador [45]

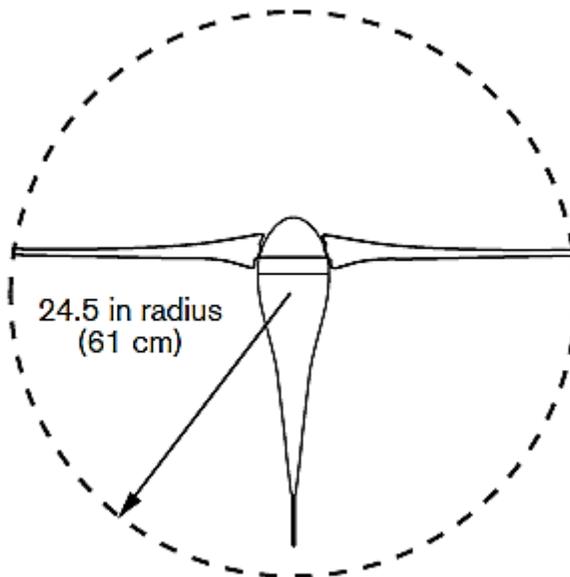


Figura 103: Vista aérea del aerogenerador [45]

La Tabla 20 nos muestra un resumen de las características más importantes del aerogenerador, cabe mencionar que el aerogenerador está configurado para trabajar con un sistema a 24 Vdc.

Marca	Southwest Windpower, Inc.
Modelo	Air X
Peso	13 lb / 6 kg
Diametro Rotor	46 in / 1.17 m
Puesta en marcha, velocidad del viento	8 mph / 3.6 m/s
kilowatt hora/mes	Promedio de velocidad del viento 36 kWh/mes @ 12 mph / 5.4 m/s
Maxima velocidad del viento	110 mph
Potencia Nominal	400 watts a una velocidad del viento @ 28 mph / 12.5 m/s
Certificaciones	CSA (certificado 196-1954979), CE
Punto ajuste Regulacion de tension (Ajuste de fabrica)	
Sistema a 12 Voltios	14.1 Voltios
Sistema a 24 Voltios	28.2 Voltios
Sistema a 48 Voltios	56.4 Voltios
Rango ajuste de regulacion	
Sistema a 12 Voltios	13.6 a 17.0 V (aproximadamente)
Sistema a 24 Voltios	27.2 a 34.0 V (aproximadamente)
Sistema a 48 Voltios	54.4 a 68.0 V (aproximadamente)

Tabla 20: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.

Para instalar el Air X, se necesita de una torre, también llamado mástil, en general, cuanto mayor sea la torre, mayor será la velocidad del viento y en última instancia la producción de energía será mayor. La altura mínima recomendada de la torre es de 7.6 m en campo abierto 6 m sobre obstrucciones cercanas. La seguridad debe ser la principal preocupación al seleccionar el lugar de montaje, se debe recordar que la seguridad tiene prioridad sobre la eficiencia. A continuación, se muestra una imagen de cómo se recomienda que debe ser la instalación del aerogenerador sobre obstrucciones cercanas.

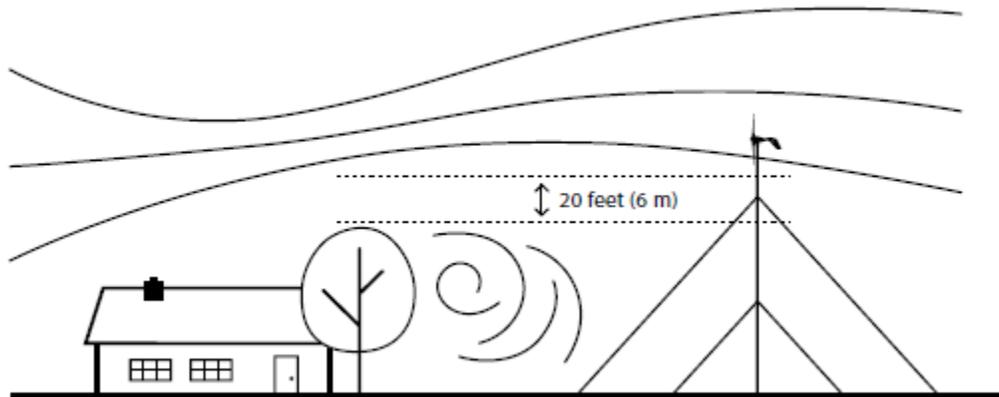


Figura 104: Instalación recomendada de la torre del aerogenerador. [45]

El aerogenerador está instalado a una altura de 17.5 m medido desde el nivel del suelo, el mástil sobre el cual está montado tiene una altura de 6 m y la biblioteca tiene una altura de 11.5 m desde el nivel suelo hasta la terraza.

Modo de funcionamiento del Air X.

- Modo de Carga: Si el Air X se conecta al banco de baterías con un valor de tensión por debajo del punto de ajuste de regulación de voltaje, las palas girarán en respuesta al viento. Con un viento disponible, las palas continuarán girando hasta que el voltaje de la batería coincida con el punto de ajuste de la regulación. Hay que tener en cuenta que el Air X requiere un voltaje de baterías mínimo o el controlador se comportará como si hubiera una condición de circuito abierto.
- Modo de Regulación: El Air X produce energía y cuando el voltaje de las baterías sube hasta el punto de ajuste de regulación de éstas, entra en modo de regulación. En este punto, deja de producir potencia y el número de revoluciones bajará considerablemente hasta casi parar. El Air X permanecerá en el modo de regulación hasta que las caídas de tensión de la batería estén ligeramente por debajo del punto de ajuste de la regulación (tensión de corte). Cuando se alcanza

la tensión de corte, las palas se reanudarán hasta comenzar a girar en respuesta al viento disponible.



Figura 105: Instalación del aerogenerador sobre mástil, con una altura efectiva desde el nivel suelo de 11.5 m. [46]

- Modo de Parada: Este modo está marcado por una reducción considerable en la velocidad de la turbina, cuando ésta llega aproximadamente entre 500 a 700 rpm. El Air X entrará en modo de parada cuando tenga una velocidad del viento de 15.6 m/s (35 mph), y permanecerá así hasta que la velocidad se reduce a 14 m/s (32 mph). Si una velocidad del viento de 22 m/s (50 mph) se detecta, la turbina se cerrará completamente por 5 minutos.

- Modo de frenado: El Air X se puede colocar en modo de frenado por medio de un cortocircuito directamente en las turbinas, cortocircuitando los cables positivos y negativos, o por el uso de un interruptor de parada. El interruptor de parada desconecta primero la turbina de la batería y luego cortocircuita los cables positivos y negativos, el dispositivo que se utiliza para realizar el frenado del aerogenerador es una maneta de tres posiciones.

#### 4.1.2 Controlador de Carga DC del Sistema Eólico

Marca	MONTELEC
Configuración Voltaje	24 V DC
Corriente de carga	60 A DC
Potencia	1440W
Entrada de Batería DC	Sistema a 24 V DC
Entrada individual de arreglo Fotovoltaico	SI
Salida individual de carga de consumo	SI (protegida)

Tabla 21: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.

#### 4.1.3 Fusibles

Los fusibles de cinta utilizados en este sistema son de la misma marca y mismo modelo utilizados en el sistema fotovoltaico, descritos en el capítulo II.

#### 4.1.4 Portafusibles

Los portafusibles de cinta utilizados en este sistema de la misma marca y mismo modelo utilizados en el sistema fotovoltaico, descritos en el capítulo II.

#### 4.1.5 Interruptor termomagnético

Campo de aplicación: Los interruptores termomagnéticos se utilizan, en primer término, para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos a los cables y conductores eléctricos.

De esa manera asumen la protección de medios eléctricos contra calentamientos excesivos según la norma DIN VDE 0100 parte 430. Bajo determinadas condiciones los interruptores termomagnéticos también garantizan la protección contra descargas peligrosas por tensiones excesivas de contacto originadas por defectos de aislamiento según la norma DIN VDE 0100 parte 410.

##### Detalle constructivo

Los interruptores termomagnéticos disponen de un disparador térmico (bimetal) con retardo, dependiente de la sobrecarga en función del tiempo, para sobreintensidades bajas; y un disparador electromagnético sin retardo para sobreintensidades mayores y de cortocircuito.

Los materiales especiales de los contactos garantizan una larga vida útil y ofrecen una elevada seguridad contra soldadura de los mismos.

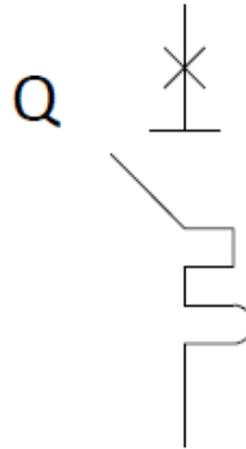
##### Principio de funcionamiento

Debido a la extrema velocidad de separación de los contactos en caso de fallas y a la rápida extinción en las cámaras apaga chispas, del arco voltaico generado, los interruptores termomagnéticos desconectan con seguridad, limitando fuertemente la intensidad de la corriente.

Con ello se bajan, por lo general, los valores límites admisibles de  $I_2t$  de la clase 3 de limitación de energía según la norma DIN VDE 0641 parte 11, en un 50%. Esto garantiza una muy buena selectividad en los dispositivos de protección de sobre corriente conectados aguas arriba.



(a)



b)

Figura 106: Interruptor termomagnético marca SIEMENS,(a) imagen real del dispositivo, (b) simbología del dispositivo según normativa IEC. [47]

Marca	SIEMENS
Modelo	5SX1
Curva de disparo	C
Profundidad de montaje	55 mm
Corriente de servicio $I_n$	25 A
Norma	EN 60 898
Capacidad de ruptura de diseño según EN 60898	3,000 A
Numero de Polos	1 y 2
Tension de diseño	230/400 V AC
Tensión de servicio	
min V DC/AC	24
max V DC/polo	60
max V AC	400

Tabla 22: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.[47]

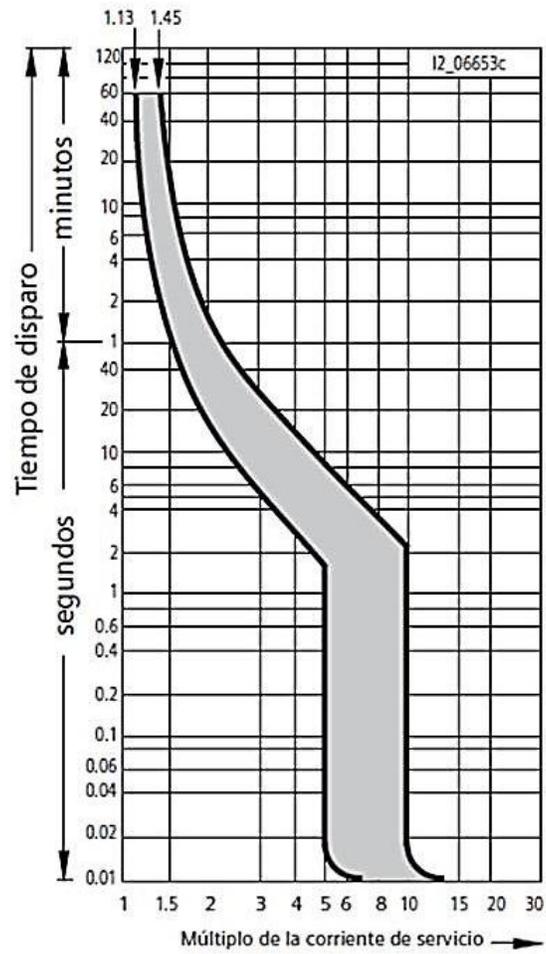
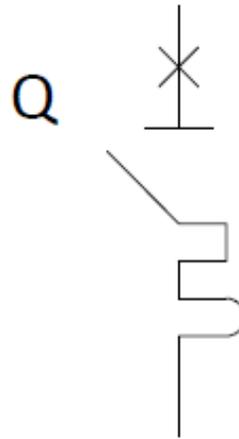


Figura 107: Curva de disparo tipo C del modelo 5SX1, según las normas EN 60 898, DIN VDE0641. [47]



(a)



(b)

Figura 108: Interruptor termomagnético marca SCHNEIDER, (a) imagen real del dispositivo, (b) simbología del dispositivo según normativa IEC. [48]

Marca	SCHNEIDER
Modelo	C60HC
Curva de disparo	Tipo C
Datos técnicos en base a IEC 60947-2	
Tipo	1 Polo
Tensión de Impulso $U_{imp}$	6 kV
Tensión de aislamiento	500 V AC
Capacidad de apertura	
Clasificación	10 Amp
Voltaje 230/400	$I_{cn} = 10,000 \text{ kA}$

Tabla 23: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.

#### 4.1.6 Anemómetro y veleta

El sensor utilizado incluye tanto sensor para la velocidad del viento y sensores de dirección del viento. Sus componentes son robustos y resisten a los vientos con fuerza de huracán, pero son sensibles a una ligera brisa. Incluye rodamientos sellados para una larga vida. Las especificaciones de rango y la precisión que detalla el fabricante se han verificado en las pruebas de túnel de viento.



Figura 109: Anemómetro y veleta marca Davis. [49]

Marca	Davis
Modelo	Vantage Pro2
Detalles Generales	
Temperatura de operación	Rango de -40° a +65°C
Tipo de sensor	
Velocidad del viento	Sensor magnético de estado solido
Dirección de viento	Veleta de viento y potenciómetro
Tipo de cable	Cuatro conductores, N° 26AWG
Máxima longitud de cable	73m
Material	
Superficie de control y veleta de viento	ABS resistente al UV
Copas de viento	Policarbonato
Armadura del anemómetro	Negro-aluminio anodizado
Dimensiones (Largo x ancho x alto)	381 mm x 38 mm x 457 mm
Peso	1 lb (1.332 kg)
Salida de sensor	
Dirección del viento	
Exactitud	± 3°
Velocidad del viento	
Rango	0.5 a 89 m/s
Exactitud	± 1 m/s

Tabla 24: Detalle de especificaciones técnicas, según fabricante.[49]



Figura 110: Instalación de Anemómetro y veleta, sujeta al mástil que sujeta al generador. [46]

## 4.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE VIENTO

En este apartado se describen algunas de las manipulaciones que se suelen realizar con los datos de viento registrados con el objeto de facilitar un juicio respecto a lo apropiado o no del punto de medida para el aprovechamiento energético eólico.

En este sentido se estudian básicamente dos aspectos: distribuciones temporales y distribuciones de frecuencia.

### 4.2.1 Distribuciones temporales

A partir de la evolución temporal de la velocidad registrada del viento, se trata de dar respuestas a cuestiones tales como:

- Cuál es la variación media diaria del viento en un período dado.
- Cuál es la variación de las velocidades medias mensuales a lo largo de un año.
- Cuál es la variación interanual de la velocidad media del viento.
- Cuál es la variación de las rachas y calmas máximas mensuales a lo largo del año.  
Esta información no puede ser obtenida desde las velocidades medias horarias, pero puede ser registrada separadamente.

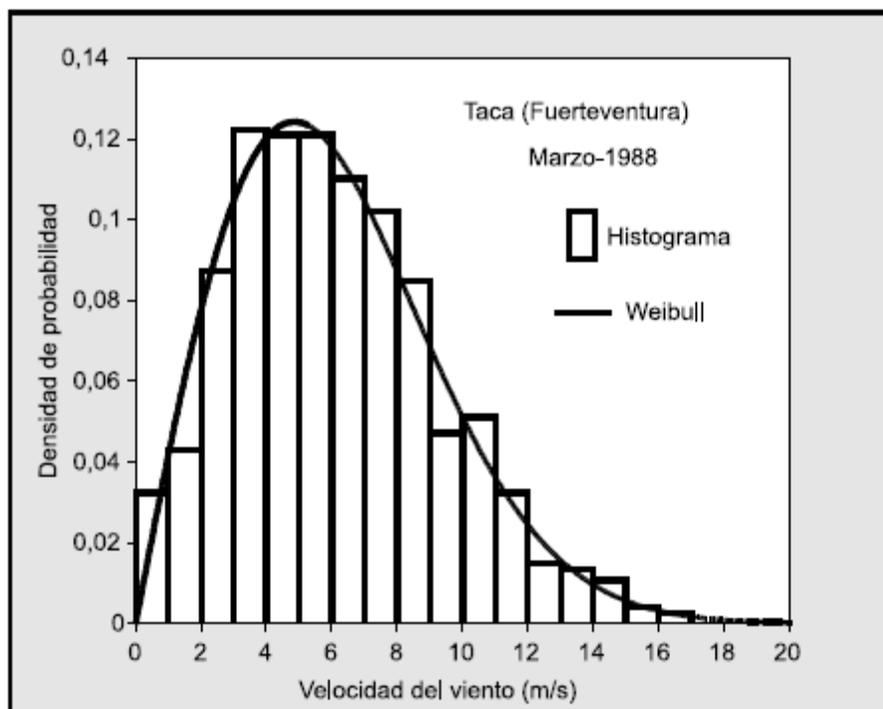
### 4.2.2 Distribuciones de frecuencia

Aparte de las distribuciones de la velocidad del viento en el tiempo es importante conocer el número de horas por mes o por año durante las cuales ocurre una determinada velocidad del viento, es decir, la distribución de frecuencias de la velocidad del viento.

Para determinar estas distribuciones de frecuencias se debe en primer lugar dividir el dominio de la velocidad del viento en un número de intervalos, normalmente de un ancho de 1 m/s. Entonces se procede a calcular el porcentaje de veces en que la velocidad del

viento sopla en cada intervalo. La representación de dichas frecuencias relativas constituye el histograma de frecuencias relativas Gráfica 25.

A menudo es importante conocer el tiempo o frecuencia en el cual la velocidad del viento es más pequeña que una velocidad del viento dada; cuando estas frecuencias son representadas en función de la velocidad del viento se obtiene el histograma de frecuencias acumuladas. Con frecuencia, también es importante conocer el número de horas que una turbina eólica estará en funcionamiento o la fracción del tiempo que una turbina eólica produce por encima de una potencia dada. En este caso es necesario sumar el número de horas en todos los intervalos por debajo de una velocidad dada del viento. El resultado es la distribución de duración. Los valores de duración son comúnmente representados con la velocidad del viento en el eje de ordenadas.



Gráfica 25: Densidad de probabilidad experimental y teórica.[21]

Otro tipo de representación a menudo utilizado en el análisis del viento son los diagramas de estructura del mismo; que representan en forma de histograma de barras verticales las

frecuencias de ocurrencia observadas en intervalos de dirección y velocidad dados. Asimismo, es frecuente representar las frecuencias de direcciones mediante diagramas denominados rosa de los vientos.

En el análisis estadístico del viento con la finalidad de evaluar la energía extraíble del mismo mediante máquinas eólicas es habitual trabajar con funciones de densidad de probabilidad continuas  $f(v)$  que se ajusten a los datos experimentales (Gráfica 25). La función de densidad de probabilidad representa una aproximación muy útil para calcular probabilidades partiendo de un histograma: en primer lugar es mucho más simple, permite sustituir la tabla completa de valores de la distribución de frecuencias por la ecuación matemática de  $f(v)$ ; en segundo lugar es más general, trata de reflejar no el comportamiento de una muestra concreta, sino la estructura de distribución de los valores de la variable a largo plazo; en tercer lugar es más operativa, permite obtener probabilidades de cualquier suceso.

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

Ecuación 28: Función de densidad de Weibull de dos parámetros. [22]

La función de densidad más frecuentemente utilizada en el análisis de la energía eólica es la de Weibull (Ramírez y Carta, 2005) de dos parámetros (Ecuación 29),  $k$  es el parámetro de forma (adimensional) y  $c$  es el parámetro de escala (las mismas unidades que la velocidad).

De igual manera, la función de distribución acumulativa  $F(v)$  de una variable aleatoria continua  $V$  es la probabilidad de que  $V$  tome un valor menor o igual a algún valor  $v$  específico. Para el caso de la distribución de Weibull de dos parámetros se tiene:

$$F(v) = P(V \leq v) = 1 - \exp\left[-\frac{v}{c}\right]^k \quad \text{Ecuación 29: Probabilidad de que la velocidad sea superior a cierto valor. [22]}$$

Asimismo, la probabilidad de que la velocidad del viento sea superior a un cierto valor  $v$  viene dada por (Ecuación 30)

$$P(V \geq v) = \exp\left[-\frac{v}{c}\right]^k \quad \text{Ecuación 30: Probabilidad de que la velocidad sea superior a cierto valor. [22]}$$

Además, la probabilidad de que la velocidad del viento esté comprendida entre dos valores  $v_x$  y  $v_y$  viene dada por (Ecuación 31)

$$P(v_x \leq V \leq v_y) = \exp\left[-\frac{v_x}{c}\right]^k - \exp\left[-\frac{v_y}{c}\right]^k \quad \text{Ecuación 31: Probabilidad de que la velocidad este comprendida entre dos valores. [22]}$$

La estimación de los parámetros  $k$  y  $c$  involucra el uso de los datos muestrales en conjunción con alguna estadística. Uno de los métodos más frecuentemente empleado para la estimación de  $k$  y  $c$  es el método de los momentos. Éste suele utilizarse igualando la media y la desviación típica muestral con los correspondientes valores de la distribución de Weibull. De esta forma se obtiene:

$$k = \left(\frac{S}{\bar{V}}\right)^{-1.086} \quad \text{Ecuación 32: Factor de forma, parámetro de la función de Weibull. [22]}$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}$$

Ecuación 33: Factor de escala, parámetro de la función de Weibull. [22]

Donde  $\Gamma$  es la función gamma de Euler, y además:

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

Ecuación 34: Velocidad promedio. [22]

$$s = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{V})^2 \right]^{1/2}$$

Ecuación 35: Ecuación de desviación típica muestral. [22]

#### 4.2.3 Cuantificación de la energía existente en el viento

La potencia eólica disponible a través de una superficie de sección  $A$  perpendicular al flujo de viento  $v$  viene dada por el flujo de la energía cinética por unidad de tiempo (Ecuación 36).

$$P_d = \frac{1}{2} \dot{m} v^2 = \frac{1}{2} (\rho A v) v^2 = \frac{1}{2} \rho A v^3 \text{ (W)} \quad \text{Ecuación 36: Potencia eólica. [22]}$$

Donde  $\dot{m}$  es el caudal másico del aire y  $\rho$  es la densidad del aire, que varía con la altitud y con las condiciones atmosféricas. Esta variación puede ser del orden del 7% sobre un valor medio que se toma normalmente de 1.225 kg/m<sup>3</sup> (temperatura 15 °C y presión atmosférica normal igual a 1.013 mbar). Por tanto, la potencia del viento (en W) depende

de la densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ ), de la superficie sobre la que incide ( $\text{m}^2$ ) y del cubo de la velocidad del viento ( $\text{m/s}$ ). Puede concluirse con la ecuación 36 que un error cometido en la estimación de la velocidad del viento se triplica en el caso de la potencia.

Un método para caracterizar la potencia eólica disponible en distintos lugares de interés, por medio del cual se pueden comparar éstos, consiste en utilizar la denominada densidad de potencia media, es decir, la potencia eólica media disponible por unidad de superficie barrida (Ecuación 37).

$$\frac{\overline{P_d}}{A} = \frac{1}{2} \rho \overline{v}^3 (\text{Wm}^{-2})$$

Ecuación 37: Densidad de Potencia eólica.  
[22]

$$\overline{v}^3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3 (\text{m}^3 \text{s}^{-3})$$

Ecuación 38: Velocidad promedio elevada al cubo. [22]

### 4.3 DIAGRAMA ELÉCTRICO DEL SISTEMA EÓLICO

El diagrama eléctrico del sistema eólico está compuesto por una serie de diagramas que detallan las conexiones de los equipos de potencia y sensores, el primero está dividido en un diagrama unifilar y en un diagrama de conexión, estos detallan los equipos de protección, almacenamiento de energía y carga conectada, es decir detallan el flujo de potencia que suministra el aerogenerador, el diagrama de los sensores muestra la conexión del Data Logger hacia los sensores detallando el tipo de magnitud física que se mide a través de un canal único e independiente.

#### 4.3.1 Diagrama Unifilar

Es la representación gráfica de la instalación eléctrica. El diagrama unifilar se distingue de otros tipos de diagramas eléctricos, ya que el conjunto de conductores del circuito se

representa mediante una única línea, independientemente de la cantidad de dichos conductores. El diagrama muestra el recorrido de la línea positiva (+) esta tiene mayor prioridad, ya que está conectada a otros dispositivos a los cuales no está conectada la línea negativa (-). En todo caso, en cada conexión de un medidor u otro elemento del circuito se especifica, si interviene la conexión de la línea negativa (-). Es importante estar familiarizado con los símbolos que identifican y representan a los aparatos eléctricos y electrónicos, en un plano eléctrico. El tipo de simbología utilizada para representar el diagrama unifilar está basada en la normativa COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC).

#### 4.3.2 Diagrama de conexión

Estos diagramas son similares a los diagramas unificares, solo que en este caso siempre se hace referencia a el tipo de línea positiva (+) o negativa (-) a las cuales estarán conectados todos los elementos del circuito. Como un agregado a la rápida interpretación la línea positiva tiene un color rojo, y la línea negativa está representada por el color negro. Los diagramas de conexiones son el complemento ideal para los diagramas unificares, con ambos esquemas se puede interpretar más fácilmente como se distribuye la energía eléctrica que provee el aerogenerador. El tipo de simbología utilizada para representar el diagrama de conexión está basada en la normativa COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (IEC).

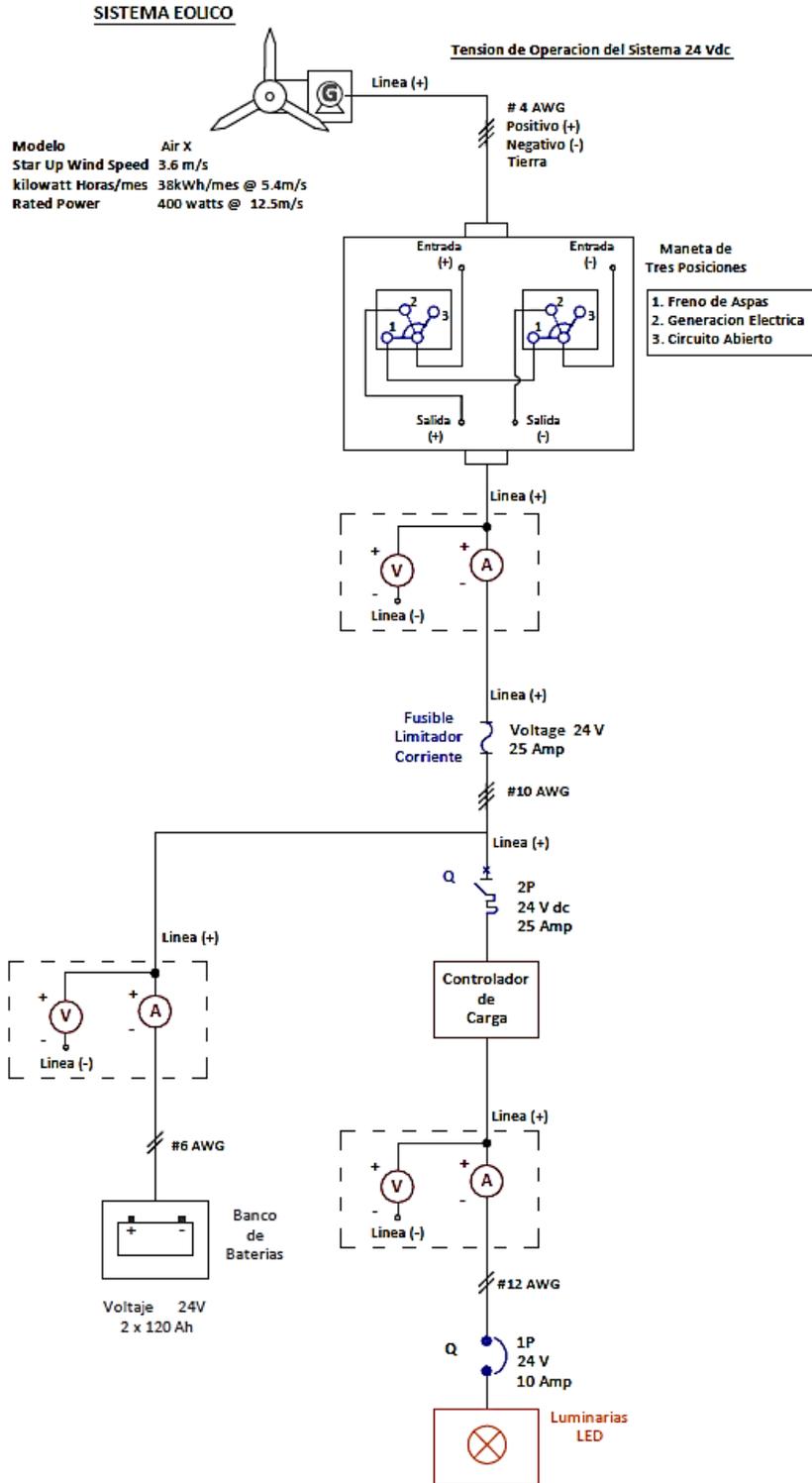


Figura 111: Diagrama unifilar del sistema eólico. [36]

Nota: Este diagrama se puede visualizar mejor en los anexos.

### SISTEMA EOLICO

Tension de Operacion del Sistema 24 Vdc

#### AEROGENERADOR:

Modelo Air X  
Star Up Wind Speed 3.6 m/s  
kilowatt Horas/mes 38kWh/mes @ 5.4m/s  
Rated Power 400 watts @ 12.5m/s

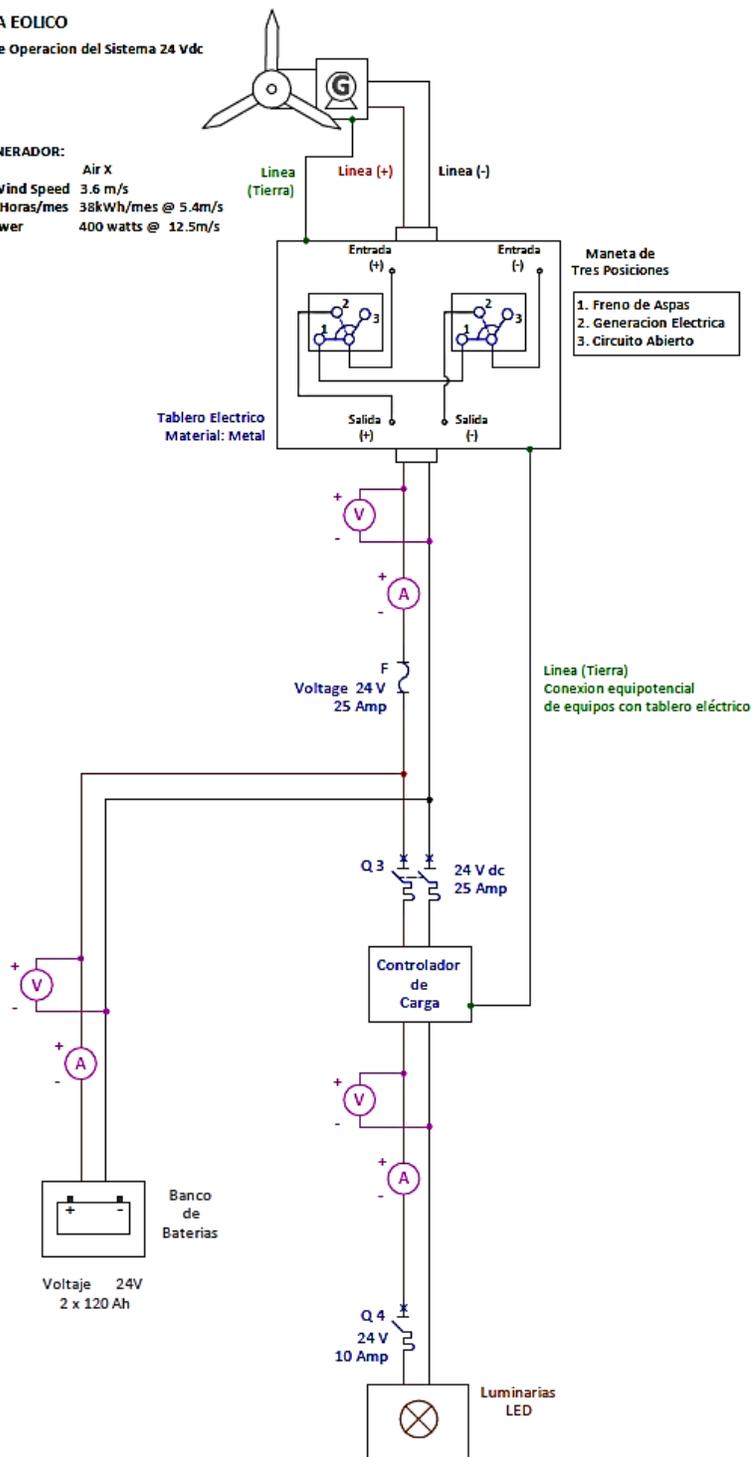


Figura 112: Diagrama de conexión del sistema eólico. [36]

Nota: Este diagrama se puede visualizar mejor en los anexos.

### 4.3.3 Diagrama de conexión de sensores

El anemómetro necesita de un circuito de acople el cual consta de un resistor de  $4.7\text{k}\Omega$  y dos capacitores de  $22\text{nF}$  y  $10\mu\text{F}$ , además de una fuente de alimentación externa de  $+5\text{Vdc}$ , este circuito de acople es necesario y fundamental para obtener las mediciones de las magnitudes físicas de interés. Los canales que se utilizan para el Data Logger marca KEITHLEY son el CH 10-20 y CH 11-20 midiendo frecuencia y voltaje DC respectivamente.

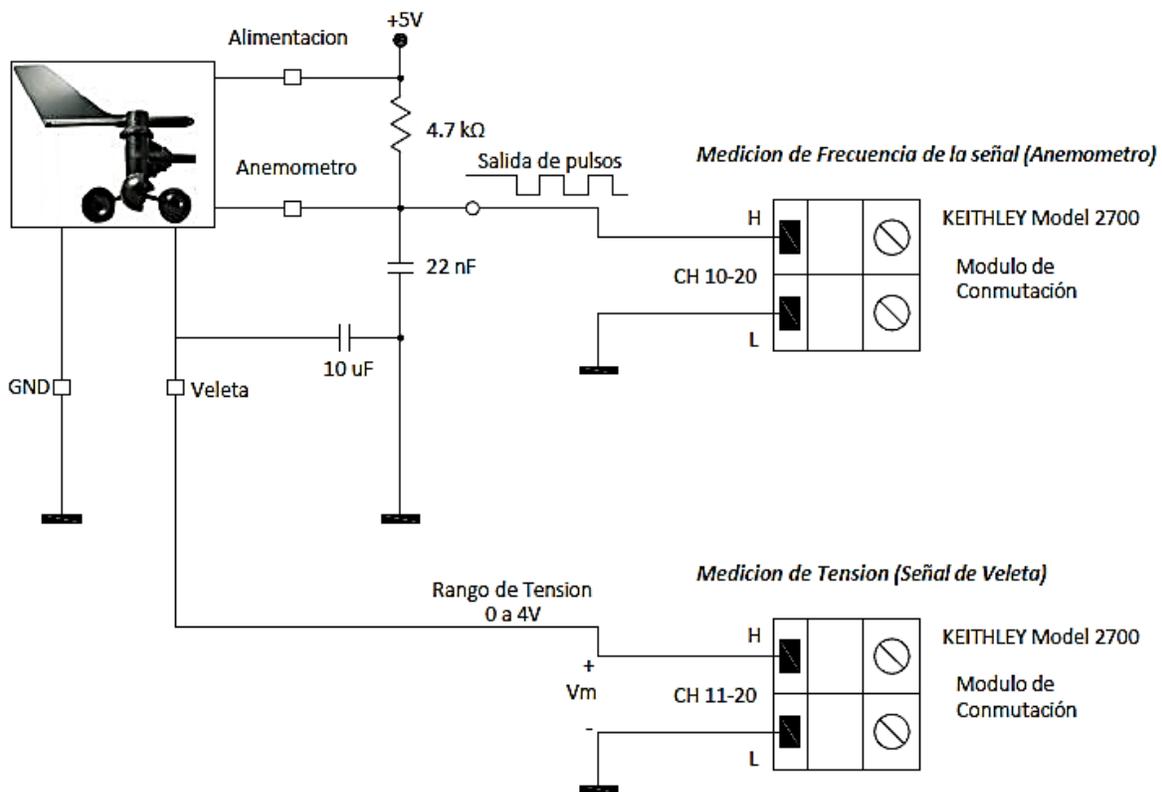
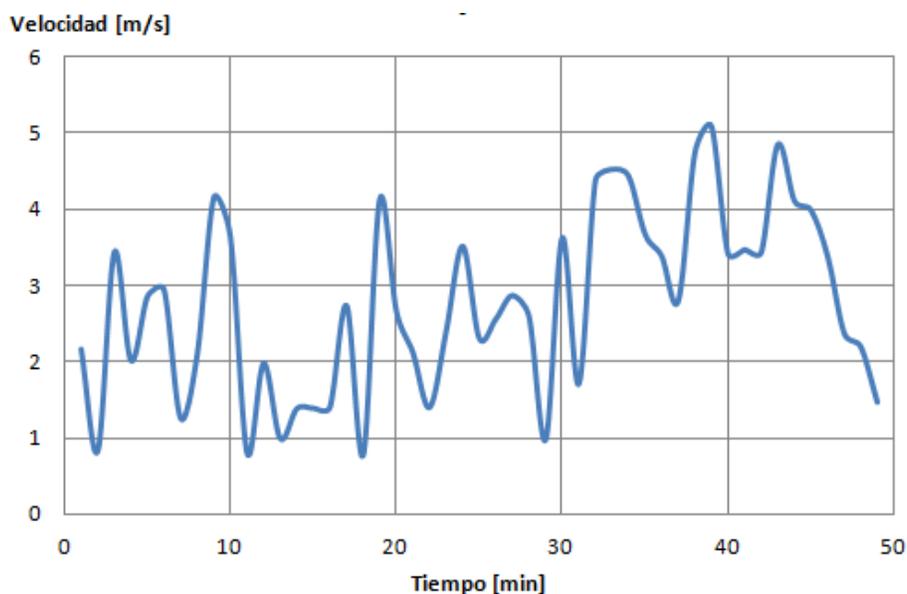


Figura 113: Diagrama de conexión de sensores. [36]

#### 4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

##### 4.4.1 Gráfico de la variación del viento en función del tiempo.

En el periodo de caracterización se han logrado tomar diversas medidas de velocidad del viento por medio del Data Logger, de los cuales se muestra una curva de la evolución temporal del viento, el periodo a mostrar en corto por razones de análisis, dicha curva se presenta a continuación en la Gráfica 26.



Gráfica 26: Variación del viento en función del tiempo. [50]

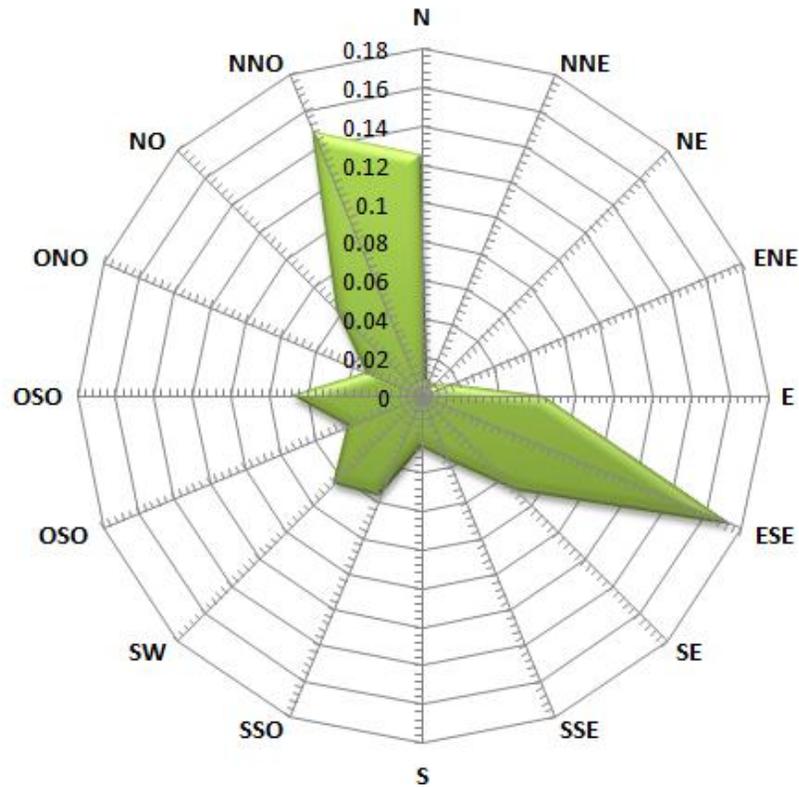
##### 4.4.2 Medición de la orientación del viento.

En el periodo de caracterización, con el uso de la veleta se pueden realizar diversas medidas de la orientación del viento, este sensor se posiciona en una cierta posición angular dependiendo de donde provienen los vientos, se registran una serie de datos, durante un periodo continuo de tiempo, para el práctico manejo y almacenamiento de los datos se hace uso del Data Logger, con el análisis estadístico se interpretan de mejor manera los datos obtenidos, los cuales se pueden mostrar una tabla de frecuencias y

posteriormente generar una curva de la orientación del viento, esta última conocida comúnmente como la rosa de los vientos. La rosa de los vientos es un símbolo en forma de círculo que tiene marcados alrededor los rumbos en que se divide la circunferencia del horizonte, está compuesta por los cuatro puntos cardinales, por lo general se le adiciona los cuatro rumbos laterales y los ocho rumbos colaterales, además posee graduaciones de los diferentes radios que componen el diagrama, los radios son la representación de la frecuencia relativa de cierto rumbo del viento, es decir un valor de radio pequeño representa un flujo de viento pobre de cierto rumbo, y un valor de radio grande representa una gran cantidad de flujo de viento originario de cierto rumbo.

Orientacion	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa (%)
N	273	0.1244
NNE	19	0.0087
NE	17	0.0077
ENE	34	0.0155
E	139	0.0634
ESE	385	0.1755
SE	153	0.0697
SSE	80	0.0365
S	59	0.0269
SSO	124	0.0565
SW	142	0.0647
OSO	91	0.0415
OSO	148	0.0675
ONO	68	0.0310
NO	136	0.0620
NNO	324	0.1477
Tamaño Muestral	2194	

Tabla 25: Frecuencia de Orientaciones del viento.[51]



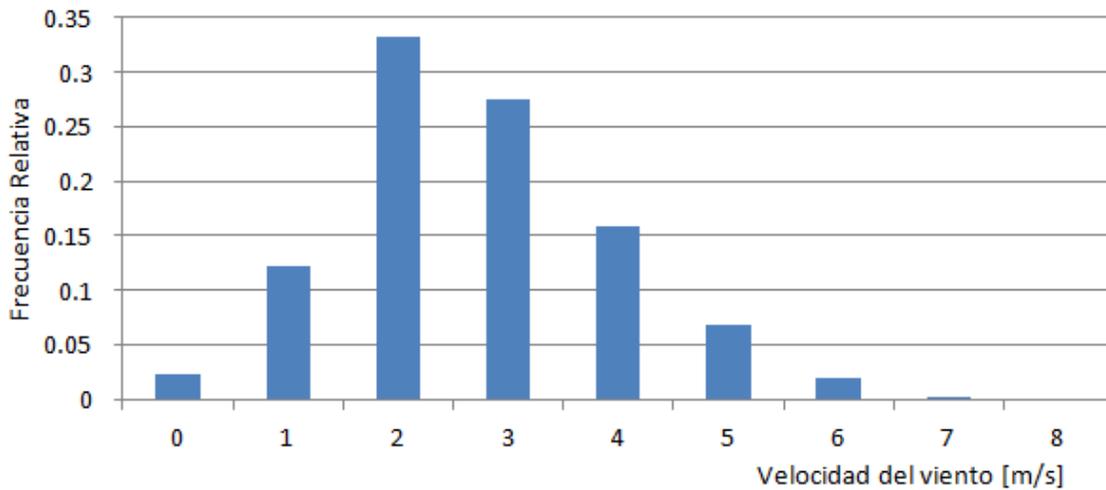
Gráfica 27: Rosa de los vientos.

#### 4.4.3 Medición de la velocidad del viento

En el periodo de caracterización, con el uso del anemómetro se pueden realizar diversas medidas para registrarla velocidad del viento, este sensor genera una serie de pulsos cuadrados cuya frecuencia de señal es directamente proporcional a la velocidad instantánea del viento, se registran una serie de datos, durante un periodo continuo de tiempo. Para el practico manejo y almacenamiento de los datos se hace uso del Data Logger, aplicando un análisis estadístico se interpretan de mejor manera los datos obtenidos, los cuales se pueden mostraren una tabla de frecuencias para finalmente elaborar un histograma de la velocidad del viento, el máximo valor de dicho histograma representa la mayor cantidad de veces que se registró esa velocidad.

Bin Velocidad en m/s	Frecuencia	Frecuencia Relativa (%)
0	36	0.0226
1	195	0.1223
2	531	0.3329
3	438	0.2746
4	252	0.1580
5	109	0.0683
6	31	0.0194
7	3	0.0019
8	0	0.0000
Tamaño Muestral	1595	

Tabla 26: Frecuencia de mediciones de velocidad del viento.[51]



Gráfica 28: Medición de la velocidad del viento. [50]

En base a los datos experimentales se procede a aplicar la fórmula de la distribución de Weibull, la finalidad de esta ecuación es obtener un modelo matemático para describir el comportamiento del viento.

El factor de forma utilizado es  $k = 2$ , con un factor de escala de  $c = 2.56$  y una velocidad promedio según los datos utilizados para este análisis,  $v = 2.71$  m/s.

Para los cálculos se utilizó el valor de densidad del aire de  $1.18^m/v^3$

Bin Velocidad en m/s	Frecuencia	Frecuencia Relativa (%)	Weibull
0	36	0.0226	0
1	195	0.1223	0.261565013
2	531	0.3329	0.331271732
3	438	0.2746	0.232042136
4	252	0.1580	0.106540148
5	109	0.0683	0.033817967
6	31	0.0194	0.007599227
7	3	0.0019	0.001224259
8	0	0.0000	0.000142475
Tamaño Muestral	1595		

Tabla 27: Cálculo de la distribución de Weibull en base a frecuencia de mediciones de velocidad.[51]

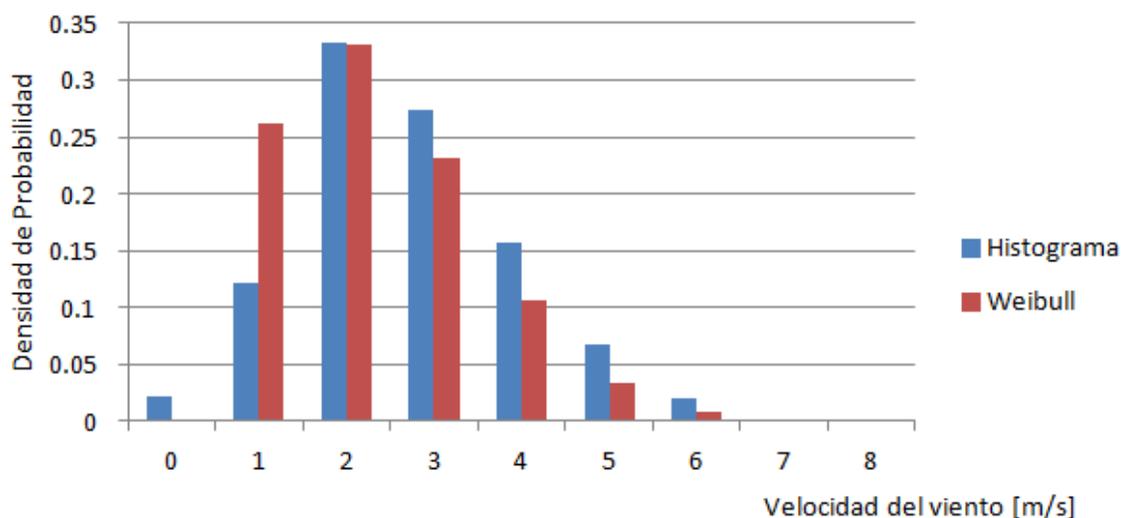
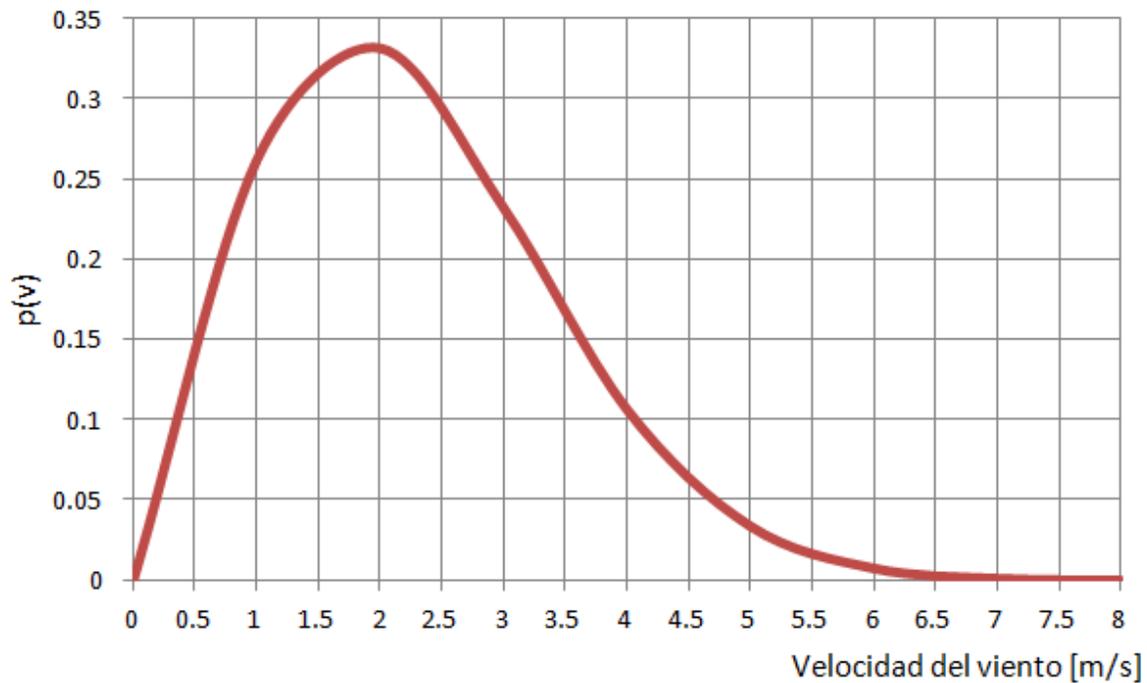


Gráfico 29: Densidad de probabilidad experimental y teórica. [50]

Finalmente al obtener el mejor ajuste de la Distribución de Weibull se está en la capacidad de generar un gráfico continuo el cual facilita su análisis y comprensión.



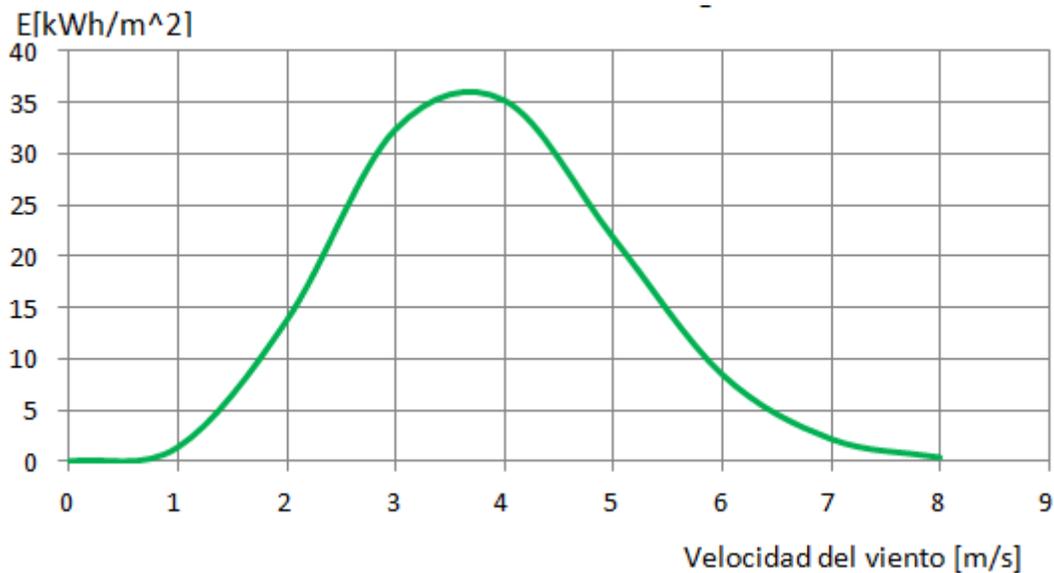
Gráfica 30: Distribución de Weibull. [50]

#### 4.4.4 Estimación de la energía por unidad de área.

Un valor muy importante es poder estimar la capacidad de generación de energía en un punto geográfico y en un periodo de tiempo, es por eso que aplicando la distribución de Weibull se puede obtener la densidad de energía para un año de operación.

$$\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) \cdot 8760 \quad [W/m^2]$$

Ecuación 39: Densidad de Energía eólica. [22]



Gráfica 31: Cuantificación de la energía en un año. [50]

Todos los datos tabulados, y mostrados en las gráficas anteriores, reflejan las distintas velocidades de viento que se pueden tener en el laboratorio de energías renovables, según la Gráfica 30: Distribución de Weibull. la mayor probabilidad de tener velocidades de viento se centra entre 0.5 y 3.5 m/s, estos resultados se pueden comparar con algún otro estudio o institución que se dedique a la cuantificación del recurso eólico, es así como se toma de referencia la Figura 114: Velocidad del viento en la región de El Salvador. , una aplicación web que muestra la dirección y velocidad del viento del sitio web <http://earth.nullschool.net/#current/wind/surface/level/orthographic=-89.88,13.66,600> en la cual se ha navegado para mostrar la dirección del viento en la región centroamericana, esta captura se realizó a las 11:30 am, es importante citar la hora de consulta al sitio web, porque de la hora depende el flujo del viento en cierto punto geográfico de análisis.

El flujo del viento en el mapa se visualiza por medio de vectores de color verde, así la velocidad en cierto punto del mapa es proporcional al tono de color que se detalla, se ha ubicado el puntero para ubicarse exactamente en El Salvador, al observar el mapa se apreciar que los vientos que entran al país, son originarios del Norte y Nor-Este de

Centroamérica, y es por ello que el país que se ve afectado por los vientos alisios. Según los datos mostrados en la Figura 114, en El Salvador, el día viernes 28 de agosto de 2015, a las 11:30 horas, se obtuvo una velocidad del viento promedio que rondan los 2km/h, convertidos a otra unidad de m/s, se tiene una velocidad del viento de 0.56 m/s, un valor que tiene una gran probabilidad de que pueda ocurrir, según la distribución de Weibull que se obtuvo del análisis de los datos experimentales mostrada en la Gráfica 30: Distribución de Weibull.

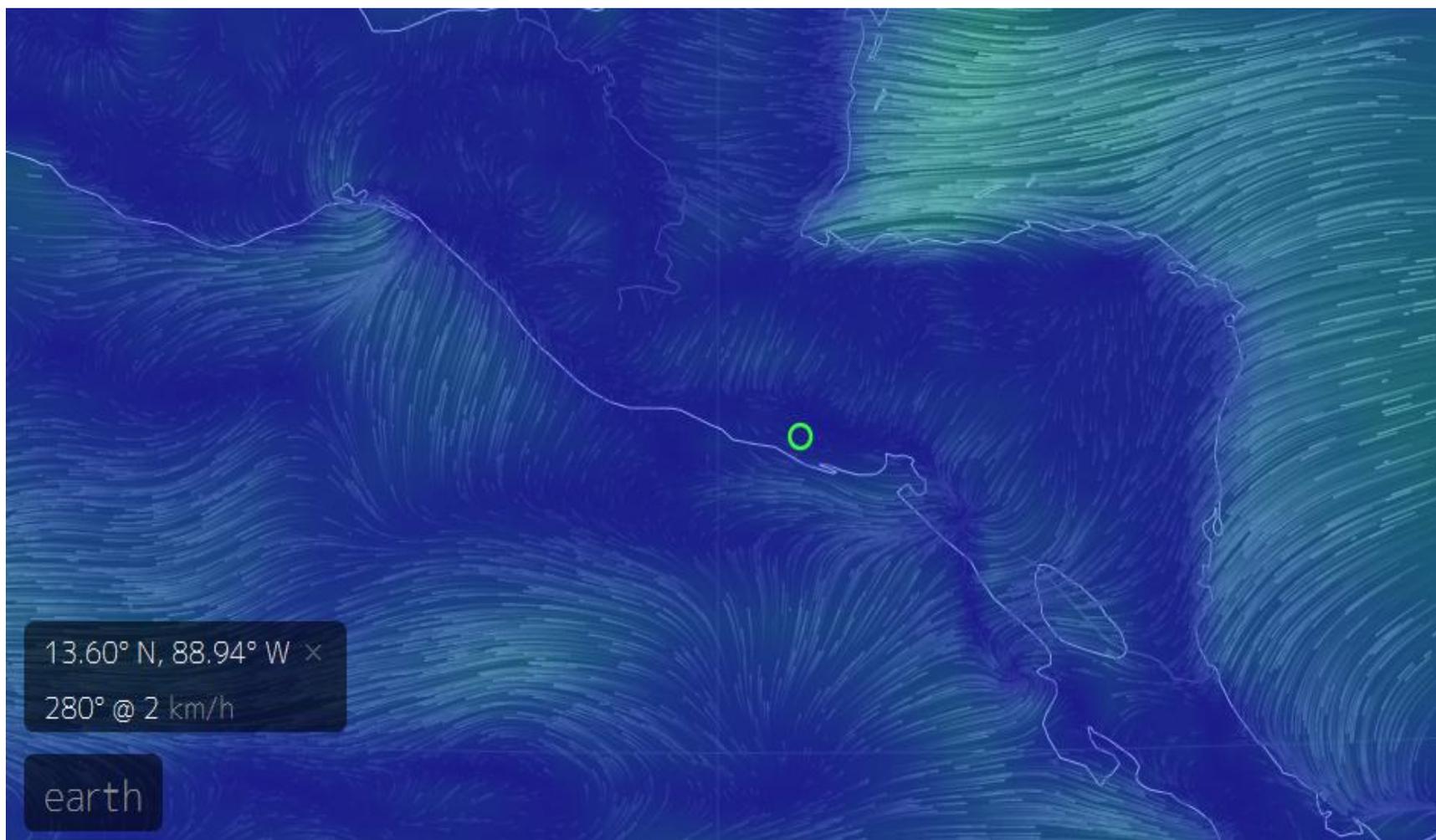


Figura 114: Velocidad del viento en la región de El Salvador. [52]

## CONCLUSIONES.

- ✓ El laboratorio de energías renovables, tiene su espacio provisto en la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, su interior fue acomodado para la realización de prácticas de laboratorio, cuenta con el mobiliario y equipo adecuado para realizar adquisiciones de datos como temperatura, irradiación solar, velocidad y dirección del viento. Se puede realizar la puesta en marcha del sistema fotovoltaico y eólico, a través de accionamientos eléctricos, la puesta en marcha del sistema solar térmico se realiza a través de la apertura de válvulas de paso, esto en lo que respecta al interior del laboratorio, al mismo nivel de la edificación donde se encuentra el laboratorio, se encuentra un área al aire libre donde se encuentra instalado el sistema solar térmico, aerogenerador instalado sobre un mástil, y dos paneles fotovoltaicos instalados sobre una estructura móvil, la cual tiene la cualidad de poder inclinarse en un rango desde  $0^\circ$  (Plano Horizontal) hasta los  $90^\circ$  (Plano vertical), esta cualidad permite buscar la inclinación donde los paneles puedan recibir la mayor cantidad de irradiación solar, este valor en teoría corresponde a la latitud de donde se encuentren instalados los mismos, otra cualidad de la estructura descrita, es el giro sobre su propio eje, desde  $0^\circ$  hasta  $180^\circ$ , buscando con este giro el azimut con respecto al Sur. Finalmente el laboratorio posee una capacidad de albergar en su interior a doce estudiantes
- ✓ El laboratorio posee un equipo especial, para la adquisición de datos de sensores, censando variables como temperatura, irradiación solar, velocidad y dirección del viento, así también realizando muestreos de voltaje y corriente en diferentes ubicaciones estratégicas del diagrama eléctrico, como la salida de los paneles fotovoltaicos y aerogenerador, salida del controlador de carga y salida del inversor. El equipo que hace posible el tratamiento de los datos es un Data Logger 2700

KEITHLEY, de dichos datos se realizaron trazos de curvas de operación de los diferentes sistemas de energías renovables.

Al observar los datos tomados en el sistema fotovoltaico, se puede concluir que: La irradiación promedio registrada del Piranómetro horizontal es de  $711.23 \text{ W/m}^2$  y la irradiación promedio registrada por el Piranómetro inclinado  $30^\circ$  al sur es de  $771.66 \text{ W/m}^2$ , existiendo una diferencia de  $60.44 \text{ W/m}^2$ , mostrando un porcentaje de error del 8.5%, con este último valor se puede corroborar como se expresa en la teoría, que un sistema fotovoltaico inclinado está expuesto a una mayor irradiación.

Además observando los datos de la Gráfica 14 se puede apreciar que el valor de tensión promedio en un día, de los paneles fotovoltaicos es de 17.69 V, dicho valor es muy cercano a su dato de placa el cual es de 17 V.

Como se puede apreciar en la Gráfica 20, el controlador de carga funciona utilizando el modelo de carga de 3 etapas explicado en el Capítulo I, ya que la gráfica mostrada posee claramente las características citadas en el Capítulo I, las cuales son: etapa de corriente constante, etapa de voltaje constante y la etapa de flotación o pulso, las cuales están presentes en la Gráfica 20.

Como se puede apreciar en la Gráfica 20, el sistema en vacío tiene un consumo interno (inversor, bobina de contactores, controlador de carga, etc.) de 5.59 W, si analizamos la capacidad máxima del sistema de acumuladores el cual es de 200Ah y si consideramos utilizar 200A en una hora la potencia máxima que el sistema puede proporcionar es de: 2400 W entonces: Tiempo de descarga=  $(2400 \text{ Wh} / 5.911 \text{ W}) / 24 \text{ h} = 16.9 \text{ días}$

En los cuales la batería poseerá cierto nivel de carga.

- ✓ Al observar los datos tomados en el sistema fotovoltaico, se puede concluir que al realizar la comparación de los datos con los datos mostrados por las diversas fuentes consultadas (FIA Clima, Mapas de Irradiancia del documento de Tesis

“Actualización del Mapa de Radiación Solar de El Salvador” y los mapas presentados por el plan maestro del CNE y proyecto SWERA-UCA, se observa que los datos obtenidos por los equipos de medición instalados en el Laboratorio de Energías Renovables son confiables ya que sus valores son muy similares con los mencionados anteriormente.

- ✓ Después de analizar y aplicar un estudio estadístico de distribuciones de frecuencia aplicado a los datos obtenidos del sistema eólico instalado en el laboratorio de energías renovables, se afirma que es posible obtener un modelo matemático que permita obtener la probabilidad de que ocurra un suceso, para este estudio de energía eólica, este suceso es el de poder obtener vientos a una cierta velocidad, la función más frecuentemente utilizada es la función de Weibull de dos parámetros, Ecuación 28, la estimación correcta de los parámetros k y c es de mucha importancia para obtener un buen modelo matemático, por lo que involucra el uso de los datos muestrales de la velocidad del viento en conjunto con alguna estadística. Uno de los métodos más frecuentemente empleado para la estimación de k y c es el método de los momentos. Este suele utilizarse igualando la media y la desviación típica muestral con los correspondientes valores de la distribución de Weibull. Aplicando la Ecuación 34 y Ecuación 35 respectivamente.

La importancia de obtener esta distribución de Weibull, es para aplicar esta función en el cálculo de la densidad de energía, es decir, estimar el recurso eólico a través de la energía disponible por unidad de área, este cálculo se puede desarrollar al hacer uso de la Ecuación 39, modificando su expresión de la variable tiempo se puede escribir de la siguiente manera,  $\frac{E}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 f(v) \cdot h \quad \left[ \frac{Wh}{m^2} \right]$

Donde h representa el tiempo en horas, del periodo donde se aplicara el estudio, así, para estimar la densidad de energía disponible en un año se sustituye h por el valor de 8760. Por lo que las unidades serán Watts-hora por metro cuadrado de

área, el área utilizada para este estudio, es la que describe el movimiento de las palas del aerogenerador, perpendicular al flujo de viento.

- ✓ Con respecto a los datos mostrados en la Figura 114 que dice que el día lunes 31 de agosto de 2015, a las 11:30 horas, se obtuvo una velocidad del viento promedio que rondan los  $4km/h$ , o lo mismo que es  $1.1m/s$ , con esos valores de velocidad de viento se concluye que no es conveniente realizar estudios de generación eólica en la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, ya que según datos técnicos del aerogenerador Air X instalado, éste necesita por lo menos una velocidad inicial de  $3.2m/s$  para comenzar a generar. Es por esta razón que se dice que el aerogenerador se encuentra subutilizado, ya que no está trabajando en las condiciones óptimas.
  
- ✓ Con respecto a los valores de densidades de potencia del viento que se encuentran en el mapa de potencial eólico de El Salvador, que se encuentra en la Figura 58, y cuyo mapa ha sido creado por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de los Estados Unidos (NREL, por sus siglas en inglés), quien ha comprobado que el área donde la densidad de energía eólica se convierte en más de  $320 W/m^2$  a 30 metros sobre el nivel del suelo, y más de  $400 W/m^2$  a 50 metros sobre el nivel del suelo; es suficiente para desarrollar proyectos que utilicen el viento como fuente para producción de energía eléctrica, con los datos anteriores, se concluye que en el área de San Salvador, no es un terreno que cumpla con las condiciones idóneas para desarrollar proyectos que utilicen el viento como fuente de generación, ya que en la mayor parte del departamento, la densidad de energía eólica ronda valores menores a  $200 W/m^2$  a 30 metros sobre el nivel del suelo, mientras que en el área cercana, donde se encuentra ubicada la Universidad de El Salvador, los valores de densidad de energía eólica rondan los valores entre  $200 W/m^2$  a  $300 W/m^2$  a 30 metros sobre el nivel del suelo.

- ✓ Por medio de los termopar colocados en la tubería CPVC para el monitoreo del termotanque, se obtuvieron datos experimentales los cuales se utilizaron para realizar un trazo y análisis de curvas de temperatura, estas curvas reflejan pérdidas del termotanque alrededor de 20°C, esta pérdida se calcula comparando dichos datos en base a las especificaciones de temperatura máxima dadas por el fabricante, en promedio el termotanque mantiene en su interior el fluido a una temperatura de 40°C durante todo un día. Las pérdidas y variaciones de temperatura analizadas en la instalación del sistema solar térmico, indican que se tiene excedentes de sarro o incrustaciones del tipo calcárea dentro de la tubería colectora, este problema se da en la entrada del sistema, con la transferencia de energía radiante solar hacia el fluido, por otra parte analizando el almacenamiento del fluido caliente, existen pérdidas en el termotanque del sistema.

## RECOMENDACIONES.

- ✓ El sistema solar fotovoltaico instalado en el laboratorio de energías renovables está subutilizado, para lograr el máximo aprovechamiento del mismo se recomienda realizar una conexión del sistema a cargas presentes en el edificio de la Biblioteca de la FIA, especialmente luminarias que representen un bajo consumo.
- ✓ Por motivos de seguridad, tanto del equipo como de las personas que manipulan del mismo, se necesita un sistema de pararrayos con el fin de minimizar los riesgos por descargas atmosféricas. El diseño de la misma debe tener en consideración toda la normativa eléctrica existente sobre el tema, así como también considerar el espacio con el que se cuenta para la elaboración de la respectiva red de tierra.
- ✓ Se recomienda un estudio más completo sobre las posibles alternativas de generación eólica a una altura superior a la del sistema actual, con el fin de lograr mayor eficiencia en el aerogenerador.
- ✓ Al haber incrustaciones del tipo calcárea en la tubería del colector solar térmico se debería de realizar una limpieza de los tubos de cobre colectores, y un drenaje de la demás tuberías y al realizar una limpieza general, es decir a todo el sistema de colección se deberá de estar haciendo un mantenimiento preventivo de la tubería con un drenaje mensual, para una mayor eficiencia del equipo.
- ✓ El sistema solar térmico del laboratorio de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, no posee una carga diaria por lo cual, se recomienda hacer uso del sistema de calentamiento de agua sanitaria y ampliar su carga en las instalaciones de la biblioteca como en los demás baños, para uso de limpieza.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] SIGET, "Boletín Estadísticas de Electricidad," SIGET, San Salvador, Informe Anual 2013.
- [2] Pablo Galimberti, "DISEÑO DE LABORATORIO DE ENSAYOS FOTOVOLTAICOS," Universidad Internacional de Andalucía, Tesis Maestral 2, 2009.
- [3] John A. Duffie and William A. Beckman, Solar Engineering of thermal processes. E.E.U.U.: UES, 2013.
- [4] Ing. Jorge Alberto Zetino, "Capítulo 4 Guión de clases SFV 115," Universidad de El Salvador, San Salvador, Guión de Clases SFV 115 2012.
- [5] S.L. SITIOSOLAR. (2013) SITIOSOLAR,S.L. [Online].<http://www.sitiosolar.com/los-paneles-solares-fotovoltaicos>
- [6] Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables - CIFES. [Online]. <http://cifes.gob.cl/tecnologias/solar/fotovoltaica-pv/silicio-amorfo-a-si/>.
- [7] Prueba y Error. (2010) Prueba y Error. [Online]. <http://www.pruebayerror.net/>
- [8] Arturo Andres. (2014) Krannich Solar. [Online]. <http://es.slideshare.net/KrannichPortugal/instalaes-fotovoltaicas-isoladas>.
- [9] TFV - Solar. TFV - Solar. [Online]. <http://www.tiendafotovoltaica.es/>
- [10] SCHNEIDER. Techno Sun. [Online]. <http://www.technosun.com/es/productos/regulador-de-carga-XANTREX-C60.php>
- [11] Renobat. Renobat. [Online]. <http://www.renobat.eu/>
- [12] la Universidad de Jaén. la Universidad de Jaén. [Online]. <http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/>
- [13] Universidad Veracruzana. Universidad Veracruzana. [Online]. <https://www.cdigital.uv.mx>
- [14] Ing. Jorge Alberto Zetino, "Capítulo 6 Guión de Clases SFV 115," Universidad de El Salvador, San Salvador, Guión de Clases SFV 115 2012.
- [15] Pedro Fernández Díez, "PROCESOS TERMOSOLARES EN BAJA, MEDIA Y ALTA TEMPERATURA," UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, Informe descriptivo.
- [16] José Manuel López-Cózar, "Energía solar térmica," Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, Manual de Energías Renovables 2006.
- [17] Rafael Antonio Godoy Anzueto, "FUNDAMENTOS PARA EL DISEÑO DE UNA CENTRAL DE POTENCIA MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA TERMOSOLAR," Universidad de San Carlos de Guatemala, Tesis de pregrado 2012.
- [18] Biomass Users Network BUN-CA, "Manuales sobre energía renovable," Biomass Users Network BUN-CA, Manuales sobre energía renovable 2002.
- [19] Ismael Sánchez, Arturo Escalante, Willian Marroquín Mauricio Ayala, "Determinación del potencial solar y eólico en El Salvador," SWERA-UCA, Informe

- de Investigación 2014.
- [20] J. A. De Toro Grupo G9 de Universidades, "Física Ambiental Aplicada," Resumen.
  - [21] Roque Calero Pérez, Antonio Colmenar Santos, Manuel-Alonso Castro Gil José Antonio Carta González, Centrales de Energías Renovables: Generación Eléctrica con Energías Renovables, Miguel Martín-Romo, Ed.: Prentice Hall.
  - [22] J.L. Rodríguez Ameneo, J.C. Burgos Díaz, and S. Arnalte Gómez, "Sistemas Eólicos de Producción de Energía Eléctrica," Texto.
  - [23] Fernando Tilca. Héctor Fernando Mattio, "Recomendaciones para Mediciones de Velocidad y Dirección de Viento con Fines de Generación Eléctrica y Medición de Potencia Eléctrica Generada por Aerogeneradores," Documento resumen.
  - [24] Google Maps. (2015, Julio ) Google Maps. [Online].  
<https://www.google.com.gt/maps/@13.7204668,-89.2020701,20z>
  - [25] Consejo Nacional de Energía CNE. (2013) Consejo Nacional de Energía CNE.  
[http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com\\_phoca\\_download&view=sections&Itemid=63](http://www.cne.gob.sv/index.php?option=com_phoca_download&view=sections&Itemid=63)
  - [26] Consejo Nacional de Energía (CNE), "Plan Maestro para el desarrollo de la Energía Renovable en El Salvador," Resumen 2014.
  - [27] Jorge Zetino, "Notas de clase de SFV 115, Facultad de ingeniería y arquitectura , " Universidad de El Salvador ,
  - [28] Montelec, "Manual de usuario," Montelec, hoja de datos tecnicos.
  - [29] schneider electric, "Manual de usuario Xantrex C60," manual técnico.
  - [30] Top Sales. sitio Web de top sales depot. [Online].  
<http://www.topsalesdepot.com/750wapoin15w.html>
  - [31] VECTOR, "Manual de usuario de inversor VECO49D," manual de usuario.
  - [32] David Ernesto Preza Hernandez, Datos Analizados, 2015.
  - [33] Jonathan Fong autor de fotografía 2015
  - [34] Hoja tecnica, "hoja tecnica contactor CHINT,".
  - [35] Hoja Técnica LITTELFUSE 157.5701.5501, 2015.
  - [36] Edwin Cruz Dubon, diagrama electrico, 2015.
  - [37] KEITHLEY, Manual de usuario de Keithley 2700.
  - [38] FIA CLIMA. clima fia. [Online]. <http://clima.fia.ues.edu.sv>
  - [39] MARN. (2015) Ministerio de medio ambiente de El Salvador. [Online].  
<http://www.marn.gob.sv/>
  - [40] S.A. de C.V. Desarrollo de Productos, "Manual Calentador Solar , " Kalotron Solar , Guadalajara, Ficha tecnica.
  - [41] Jonathan Fong, "Condensado de resumen," Universidad de El Salvador, San Salvador, 2015.
  - [42] Calor aplicado. (2013) Calor aplicado. [Online].

- <http://caloraplicado.com/productos/termopares-rtds/>
- [43] Instrumentos RG. (2015) Instrumentos RG. [Online].  
<http://www.instrumentacionrg.com/shop/medidor-volumetrico-bronce/>
- [44] Jonathan Fong, "Datos graficados de las mediciones obtenidas," Universidad de El Salvador, San Salvador, 2015.
- [45] Air X, "Manual de instalación del aerogenerador Modelo Air X," Manual.
- [46] Edwin Dubon, Jonathan Fong, David Preza Juan Albiñana, "Construcción e Implementación del Laboratorio de Energías Renovables de la FIA," Documento 2015
- [47] SIEMENS, "Especificaciones tecnicas," 2014.
- [48] SCHNEIDER, "Especificaciones Técnicas Circuit Breakers," 2014.
- [49] Daviss Instruments, "Anemometer," 2013.
- [50] Albiñana Juan Dubon Edwin, "Trazo de mediciones de la dirección y velocidad de viento," UES, S.S., Julio-2015.
- [51] Dubon Edwin Albiñana Juan, "Tabulacion de datos de dirección y velocidad de viento," UES, S.S., 2015.
- [52] Earth Google. (2015, Agosto) Google. [Online].  
<http://earth.nullschool.net/#current/wind/surface/level/>

## ANEXOS.

### Construcción de Laboratorio de Energías Renovables.

Para llevar a cabo este proyecto que lleva por nombre “Diseño e implementación del laboratorio de energías renovables para la Facultad de Ingeniería y Arquitectura” se necesita de un espacio físico, el cual sirva y cumpla con las condiciones necesarias para el equipamiento de las instalaciones, entre lo que se puede mencionar, equipos eléctricos y electrónicos, instrumentos de medición, así como tuberías de agua fría y caliente, en resumen todo lo necesario para el correcto análisis e investigación de las energías renovables en estudio.

Para eso, se ha asignado un local que está ubicado en la terraza de la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad de El Salvador.

### Condiciones Iniciales del Laboratorio.

Al realizar la primera visita se encontró un local con unas condiciones deplorables, con mucho material inservible en el interior, además de ello, se encontró que existía un hueco en la parte superior en una de las paredes, tampoco existía una puerta que diera seguridad al local, por lo que el agua proveniente de lluvias entraba con facilidad al local.

En ese momento, con lo único que contaba el local, era con techo, ventanas, a las cuales le hacían falta las defensas, contaba con una instalación eléctrica que no cumplía con ninguna norma, solo se encontraban instalados dos tomacorrientes a 120VAC y uno a 240VAC, pero no se contaba con ninguna luminaria en el lugar.

En una de las paredes del local, también había instalado una tabla de plywood, pero a simple vista se observaba que una parte estaba en mal estado, ya que en el local existían filtraciones de agua en el techo.

Además de todo lo anterior mencionado, en la parte exterior del local, se encontró instalado un aerogenerador, también se pudo observar que existía una estructura metálica para colocar dos paneles solares fotovoltaicos, pero éstos tampoco cumplían con las condiciones necesarias para su uso. También se encontraron dos paneles solares fotovoltaicos desconectados, y dos baterías, que según su apariencia, estaban completamente obsoletas, y, una estructura metálica, cuyo destino es ser utilizada como caseta para las baterías, con su respectivo techo de duralita, ésta también requería de mantenimiento para que pueda ser utilizada para dicho fin.

Además, se cuenta con la instalación de dos colectores solares, los cuales, tienen la finalidad de ser utilizados para trabajar con la Energía Solar Térmica, pero uno de ellos, a simple vista se observa que está dañado, ya que en la parte trasera presenta una abertura debido al abandono y falta de mantenimiento de éste.

Posteriormente, se comenzó con la revisión de cada uno de los elementos que ahí se encontraron, para poder definir qué es lo que realmente estaba en buen estado y lo que estaba obsoleto, y así fue como se definió por donde se podía empezar para ir trabajando en el laboratorio.

Con respecto a la instalación eléctrica del local, solamente existía una caja térmica con dos circuitos. Además, en la parte superior de una de las paredes, existía un hueco, donde claramente se podía observar un filtro de agua hacia el local, el cual produjo el deterioro del plywood donde se encuentran instalados los tomacorrientes y la caja térmica que ahí se encontraban.

Con respecto a la estructura metálica que deberá sostener a los paneles solares, al inicio era una estructura oxidada, la cual necesita un buen mantenimiento de lijado y pintura anticorrosiva, ya que estará expuesta todo el tiempo a la intemperie, finalmente, en el local también habían dos paneles fotovoltaicos de 100W cada uno, los cuales serán utilizados para el sistema solar fotovoltaico.

Los colectores solares que se utilizarán para el desarrollo de este proyecto, se encuentran al lado de afuera del local del laboratorio, un colector solar es un dispositivo diseñado para recoger la energía radiada por el sol y convertirla en energía térmica, se analizó el uso que éstos tendrán en el proyecto, así como también, se programó el mantenimiento que se les debe dar, uno de los colectores se encontró con una grieta en la parte trasera, quedando inservible para ser usado en el sistema solar térmico, es por eso que se definió que solamente se trabajará con uno de ellos, específicamente el de la marca KALOTRON, el cual es un colector plano protegido que posee un vidrio que limita las pérdidas de calor y aumenta la captación solar por efecto invernadero.

En lo que se refiere a las instalaciones eléctricas al inicio de este proyecto, se podía observar que existían cables colgando, sin ningún tipo de soporte y protección, esto puede causar algún accidente a toda aquella persona que no se percate del estado del cable y tenga contacto físico con éste, en la pared se podía observar un controlador de carga, pero del cual se desconocía su estado de funcionamiento.

Así como también se encontraron cajas de registro sin su respectiva tapadera, y oxidadas, otro factor más para que pueda ocurrir un accidente.

Posterior a la primera visita al laboratorio se siguió una serie de fases para la remodelación del mismo.

## Remodelación y Mantenimiento del Laboratorio.

### Primera Fase

Como primera fase se trabajó en la limpieza general del local, tanto en su interior como en su exterior, ir recolectando todo lo que se encontraba disperso por el suelo, los accesorios en buen estado se fueron guardando ordenadamente en un lugar seguro, para ello, se muestran las siguientes imágenes, para dar prueba de cómo se remodeló y como fue cambiando durante las diferentes fases en la remodelación de éste.



Figura A. 1: Obras de limpieza en el laboratorio. [46]

Para ir mejorando la apariencia del laboratorio, se limpió el piso con agua y detergente, ya que éste se encontraba manchado por la cantidad de agua que se empoza en el interior, debido a las lluvias, fue una tarea ardua, ya que el piso estaba demasiado sucio, pero se logró despercudir y dejar un piso limpio.

Las obras de limpieza se realizaron durante una semana, para acceder al laboratorio se obtuvo una copia de la llave que permite el acceso a la terraza de la Biblioteca, lo que se logró con esto, es tener acceso libre al lugar de trabajo, realizando una serie de actividades de remodelación.

### Segunda Fase

Luego de terminada la primera fase de medida se inició con la segunda fase, la cual fue tomar medidas del local para ver cuáles eran las dimensiones de éste, ya que se planeaba ingresar dos mesas de trabajo, estas serán parte del mobiliario disponible para realizar pruebas con el equipo a instalar, las dimensiones que se obtuvieron fueron de 5.30m de

largo por 3.23m de ancho, uno de los detalles que tiene la infraestructura es que cuenta con una grada en el contorno del local, dicha grada tiene un ancho de 0.30m.

De las medidas más importantes que se tomaron, fue el de las dimensiones para iniciar la construcción de la puerta, ya que como se mencionó anteriormente, el local no contaba con nada de seguridad ni privacidad, es decir, no se podía dejar ningún equipo conectado y/o funcionando, porque cualquier persona ajena al grupo de trabajo que llegase a la terraza de la Biblioteca, tenía libre acceso al laboratorio.

Otra medida importante que se tomó fue el del agujero que en ese momento existía en la pared, ya que se diseñó la forma de poder sellarlo con tabla yeso para mayor seguridad del local y del equipo que ahí se instalará.

A través del asesor del proyecto, se gestionó el permiso para conseguir a través de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, material de trabajo para la elaboración de la puerta, así como para las defensas de las ventanas y la estructura de tabla yeso para tapar el hueco de la pared, las pláticas tuvieron sus frutos, luego de la gestión, los trabajados mecánicos dieron inicio con ayuda por parte de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Después de obtener toda la información anterior, se realizaron medidas del mástil, donde se encuentra instalado actualmente el aerogenerador, esto se hizo con el fin de planear como se armaría la estructura donde se colocará el anemómetro con la veleta, para poder realizar las pruebas que sean necesarias y poder generar electricidad con la Energía Eólica.



Figura A. 2: a) Sellado completo de una pared con tabla roca. b) Colocación de puerta de acceso al Laboratorio [46]





Figura A. 4: Parte de la instalación eléctrica realizada en el laboratorio. [46]

#### Cuarta Fase

Como cuarta fase se inició con el lijado y pintado del marco donde se colocará la puerta del laboratorio, también se lijó y pintó la puerta, que da acceso a la terraza de la Biblioteca, otra de las estructuras que también se le dio mantenimiento con la pintura, fueron las escaleras metálicas que hay afuera del local, para poder tener acceso a los colectores solares.

Continuando con los trabajos de mantenimiento del laboratorio, se lijaron y pintaron los polines del techo, para darle un mejor realce al lugar, también se comenzó con el lijado en las paredes de tabla yeso, ya que inicialmente se encontraron demasiado sucias.

Otra de las tareas de mantenimiento fue la limpieza de sedimentos que había en la estructura metálica para los Paneles Solares, además, éstos presentaban óxido en el metal, por lo tanto se le dio mantenimiento de pintura y se lubricó esta estructura.

#### Quinta Fase

La quinta fase consistió en la acomodación de mobiliario, se subieron dos mesas de trabajo y se colocaron en una posición estratégica donde quedarán para realizar las pruebas en el laboratorio, a una de estas mesas se le instaló un grifo para trabajar con agua fría y caliente proveniente de los colectores solares.



Figura A. 5: Mobiliario instalado en el laboratorio. [46]

#### Sexta Fase

Se planeó el diseño e instalación de tubería de agua caliente y fría para el sistema solar térmico, se realizó la instalación de tubería CPVC de 1/2", por donde fluiría agua caliente que viene del colector solar, se instaló la tubería de PVC de 3/4" de agua potable que también llegará al colector, toda esta tubería se montó en una posición adecuada al laboratorio a fin de mantener la continuidad del fluido de entrada y salida al sistema solar térmico, así también se instaló un grifo para agua caliente en uno de los servicios sanitarios ubicados en la tercera planta de la Biblioteca de la FIA, como parte de la continuidad del servicio de agua caliente del sistema solar térmico.



Figura A. 6: Colocación de la Tubería para el paso de agua en el Laboratorio. [46]

## Sétima Fase

Finalmente se procedió al alambrado del equipo eléctrico de los sistemas solar fotovoltaico y sistema eólico, cabe mencionar que todo el equipo fue colocado en el interior de una caja metálica, cuya norma de seguridad está basada en las normas IP, ésta caja cuenta con un código IP54 que quiere decir que tiene protección contra el polvo, y ligeramente contra el agua, pero no es una caja que puede quedar absolutamente en la intemperie, es por ello que se colocó en el interior del laboratorio, a continuación se muestra una imagen del gabinete utilizado y de la conexión del equipo a utilizar.

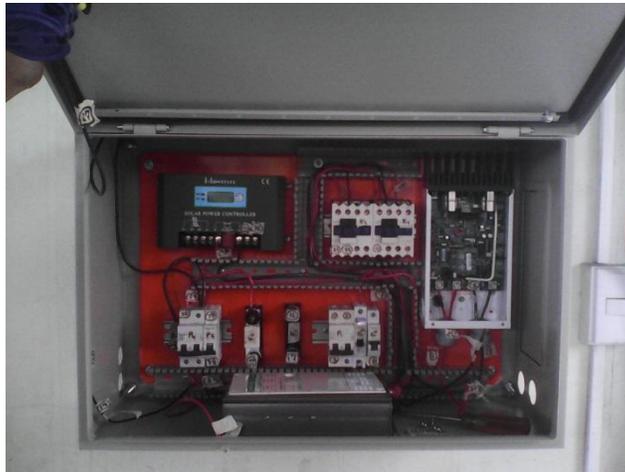
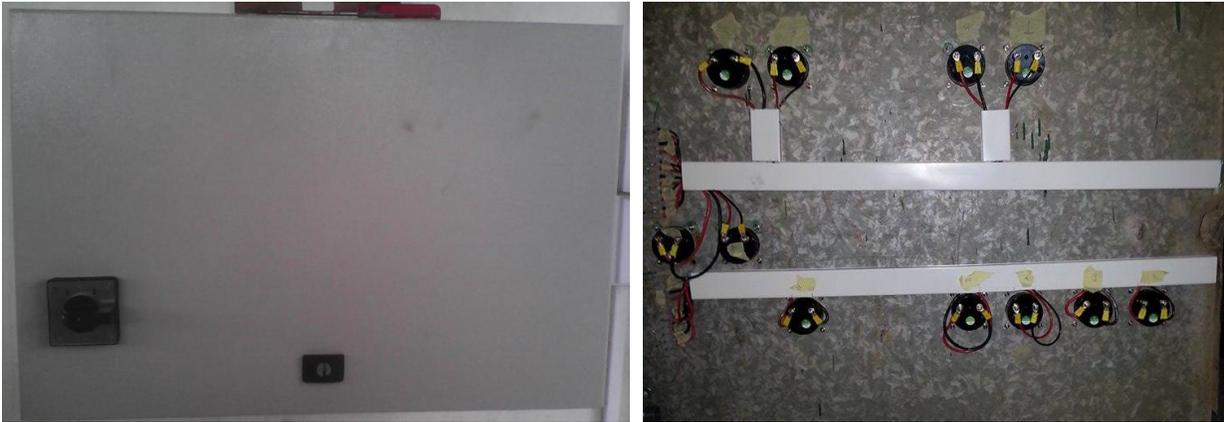


Figura A. 7: Instalación del equipo eléctrico a utilizar. [46]



# SISTEMA FOTOVOLTAICO

Tension de Operacion del Sistema 12 Vdc

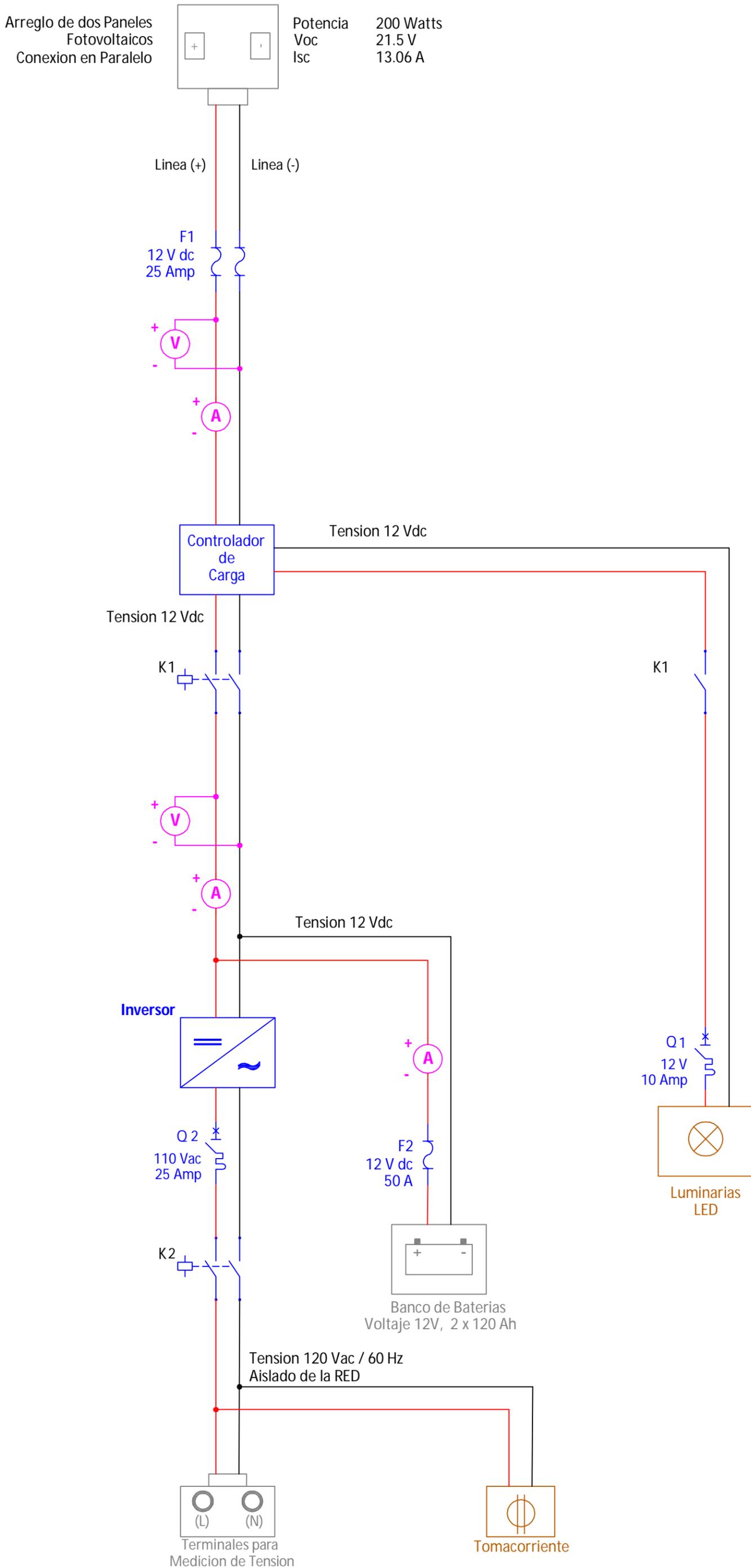
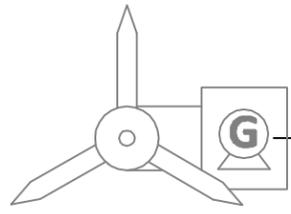


Diagrama de Conexión

# SISTEMA EOLICO

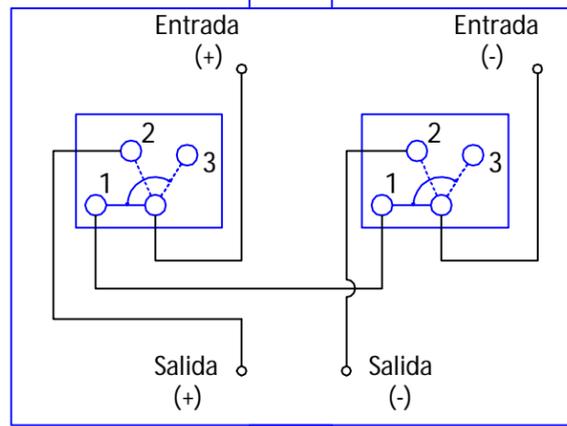
## Tension de Operacion del Sistema 24 Vdc

**Modelo** Air X  
**Star Up Wind Speed** 3.6 m/s  
**kilowatt Horas/mes** 38kWh/mes @ 5.4m/s  
**Rated Power** 400 watts @ 12.5m/s



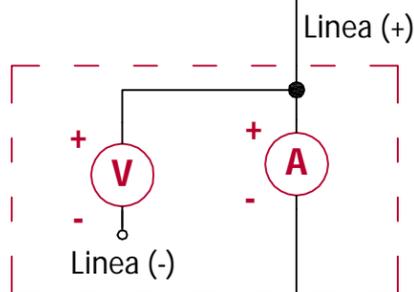
Linea (+)

# 4 AWG  
 Positivo (+)  
 Negativo (-)  
 Tierra



Maneta de Tres Posiciones

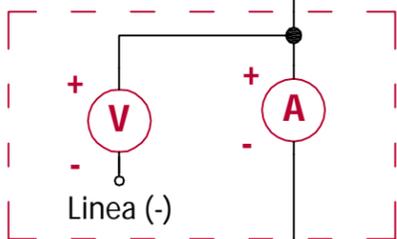
- 1. Freno de Aspas
- 2. Generacion Electrica
- 3. Circuito Abierto



Linea (+)  
 Fusible Limitador Corriente  
 Voltage 24 V  
 25 Amp  
 #10 AWG

Linea (+)  
 Q  
 2P  
 24 V dc  
 25 Amp

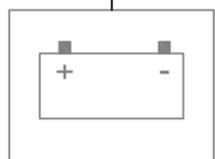
Controlador de Carga



Linea (+)

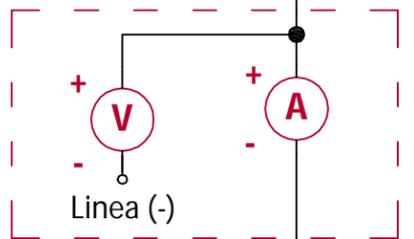
Linea (-)

#6 AWG



Banco de Baterias

Voltaje 24V  
 2 x 120 Ah

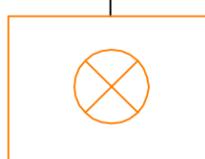


Linea (+)

Linea (-)

#12 AWG

Q  
 1P  
 24 V  
 10 Amp



Luminarias LED

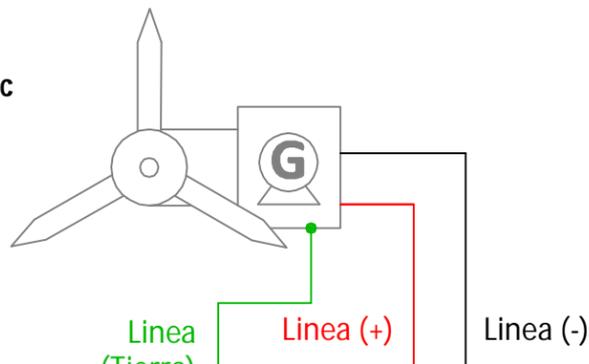
Diagrama Unifilar

# SISTEMA EOLICO

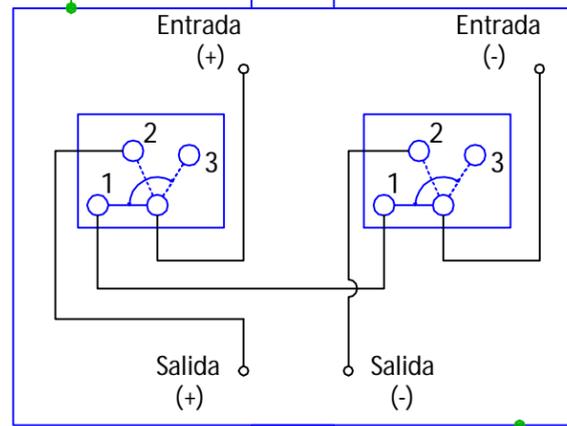
Tension de Operacion del Sistema 24 Vdc

## AEROGENERADOR:

**Modelo** Air X  
**Star Up Wind Speed** 3.6 m/s  
**kilowatt Horas/mes** 38kWh/mes @ 5.4m/s  
**Rated Power** 400 watts @ 12.5m/s



Tablero Electrico  
Material: Metal



Maneta de  
Tres Posiciones

- 1. Freno de Aspas
- 2. Generacion Electrica
- 3. Circuito Abierto

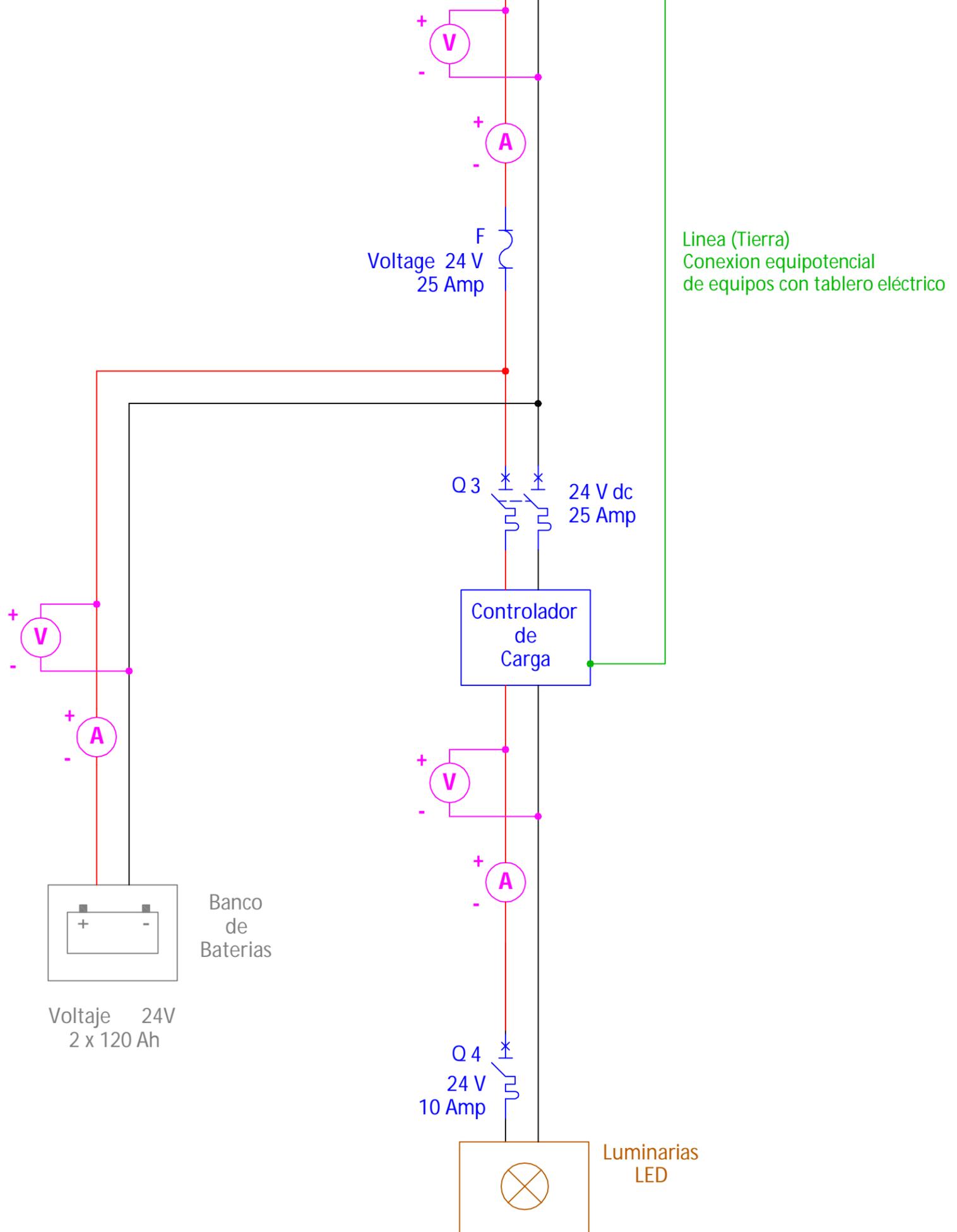


Diagrama de Conexión