UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE

"DISEÑO E INSTALACIÓN DE EQUIPO DIDÁCTICO Y SISTEMA DE MEDICIÓN PARA ENSAYOS DE PANELES FOTOVOLTAICOS"

KAREN ALEXANDRA CASTILLO MARTINEZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO T.
PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. ALEJANDRO SÁEZ C.

ABRIL - 2014

DEDICATORIA

Dedico esta memoria a mi familia,

mi padre, madre y hermanas,

que son mi raíz y motivación diaria,

que día a día me devuelven a lo que soy

y de dónde vengo.

RESUMEN

Este documento se realiza a partir del resultado de una investigación orientada al diseño del Laboratorio de Ensayos de Paneles Fotovoltaicos en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Técnica Federico Santa María. Este laboratorio será parte del Laboratorio de Energías Renovables implementado en dicha sede.

El proyecto se encuentra enmarcado en la actividad que se desarrolla en el ramo de Laboratorio de Procesos Energéticos, ésta es una de las ocho experiencias que se desarrollan en este ramo, cursado por los alumnos de Ingeniería Civil Mecánica, mención Energía.

El contenido de esta memoria se divide en cuatro capítulos: en el capítulo 1 se hace una introducción del tema a tratar, se plantean los objetivos generales y específicos. En el capítulo 2 aparece una descripción de la historia de las celdas fotovoltaicas, posteriormente se describen los distintos tipos de radiación, su principio de funcionamiento y los tipos de paneles solares según su materialidad y según su forma. Se incorpora una sección para describir los sistemas de seguimiento solar, describiendo en el mismo capítulo las variadas aplicaciones de los paneles fotovoltaicos y el costo de implementar un sistema fotovoltaico en Chile. El capítulo 3 se limita a hacer mención a la normativa nacional e internacional para sistemas solares fotovoltaicos, donde tiene lugar el procedimiento de corrección de la influencia de la temperatura del panel en la medición de su rendimiento.

En el cuarto y último capítulo se desarrolla el diseño del laboratorio de ensayos de Paneles Fotovoltaicos como tal, la realización del ensayo con la implementación de útiles tecnologías, en cuanto a equipo y software.

ABSTRACT

This document was done based on the result of a research for the Photovoltaic Panels Testing Laboratory on the Jose Miguel Carrera headquarters of the Universidad Técnica Federico Santa María. This laboratory will be part of Renewable Energy Laboratory that will be installed in that place.

The project is defined for an activity developed in the Energetic Processes Laboratory subject. It is a one of the eight experiences put into practice in this subject, covered by Mechanical Engineering students with specialization in Energy.

The contents on this thesis are divided in four chapters: Chapter one refers to the introduction of the topic to be covered, general and specific objectives are formulated. In chapter two, there will be a description of photovoltaic panel history followed by a description about types of radiation, its functioning principles and types of solar panels depending on their material and shape. A section is incorporated describing solar monitoring system. In the same chapter, applications of photovoltaic panels and cost of installing of photovoltaic system in Chile are described.

In chapter three, local and international regulations for solar photovoltaic systems are mentioned concerning the correction procedure of panel temperature influence on performance measures.

Finally, in chapter four, the design of Photovoltaic Panels Testing Laboratory is completely developed, taking into consideration useful technology implementing concerning software and equipment.

ÍNDICE

DEDICATORIA ii

RESUMEN iii

ABSTRACT iv

ÍNDICE v

ÍNDICE DE TABLAS vii

ÍNDICE DE FIGURAS viii

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 1

1.1 Introducción general 1

1.2 Objetivo general 3

1.3 Objetivos específicos 3

2 MARCO TEÓRICO 4

2.1 Historia de las celdas fotovoltaicas 4

2.2 La radiación solar en la tierra 7

2.2.1 Radiación solar en la superficie terrestre 8

2.3 Principio de funcionamiento de las celdas solares 9

2.4 Tipos de paneles 11

2.4.1 Según su materialidad 11

2.4.2 Según su forma 14

2.5 Orientación 16

2.6 Tipos de soporte para paneles solares 19

2.7 Aplicaciones paneles fotovoltaicos 20

2.7.1 Aplicaciones estacionarias 20

2.7.2 Aplicaciones móviles 21

2.1 Factores que afectan a la característica I-V del panel fotovoltaico 24
2.1.1 Efecto de la intensidad de iluminación (Irradiancia) 24
2.1.2 Efecto de la temperatura 26
2.2 Contexto nacional 28
3 Normas técnicas de la energía solar fotovoltaica 31
3.1 Condiciones de referencia 34
3.1.1 Condiciones estándar de medida (CEM o STC) 34
3.1.2 Extrapolación a condiciones estándar de medida (CEM) 35
4 Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica 37
4.1 Descripción del laboratorio 37
4.2 Descripción del ensayo y teoría 37
4.3 Equipos y Software 40
4.4 Estructura de soporte 53
4.5 Procedimientos 55
4.6 Experiencias realizadas 62
CONCLUSIONES 72
REFERENCIAS 74
ANEXOS 76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Ángulos de inclinación para sistemas fijos. [1] 18
Tabla 3.1 Normativa Chilena para Sistemas Solares Fotovoltaicos 33
Tabla 4.1 Parámetros máximos paneles solares fotovoltaicos. 40
Tabla 4.2 Parámetros mínimos paneles solares fotovoltaicos..... 41
Tabla 4.3 Requerimiento de Windows para Labview 42
Tabla 4.4 Adquisidor de datos NI 9211. 43
Tabla 4.5 Adquisidor de datos NI USB-6009 43
Tabla 4.6 Muestra de puntas de voltaje y sus rangos en el mercado internacional..... 45
Tabla 4.7 Especificaciones técnicas de punta de voltaje N2862B 46
Tabla 4.8 Muestra de puntas de corriente y sus rangos en el mercado internacional . 47
Tabla 4.9 Especificaciones técnicas puntas de corriente. 48
Tabla 4.10 Rangos de escalas de puntas de corrientes propuestas por AVANTEC ... 48
Tabla 4.11 Datos panel fotovoltaico monocristalino Siemens 100Wp 52
Tabla 4.12 Datos panel fotovoltaico amorfo 20 Wp 53
Tabla 4.13 Conexiones de instrumentos en adquisidor de datos 58
Tabla 4.14 Datos registrados por cada medición. 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1 Funcionamiento celda fotovoltaica. 10
Fig. 2.2 Panel solar con reflectantes. 14
Fig. 2.3 Panel solar formato teja. 15
Fig. 2.4 Panel bifacial. 15
Fig. 2.5 Relación entre ángulos trayectoria luz solar. 17
Fig. 2.6 Trayectorias del sol según estación del año. 17
Fig. 2.7 Ángulo de inclinación. 18
Fig. 2.8 Satélite 'Vanguard I'. 22
Fig. 2.9 Ergón, auto solar creado por equipo USM. 23
Fig. 2.10 Variación característica I-V al variar la irradiancia. 25
Fig. 2.11 Variación característica P-V al variar la irradiancia. 25
Fig. 2.12 Variación característica I-V al variar la temperatura de trabajo. 27
Fig. 2.13 Variación característica P-V al variar la temperatura de trabajo. 27
Fig. 2.14 Proyección de la capacidad instalada en SIC + SING al 2035. 29
Fig. 2.15 Potencial de energía solar en Sud-América. 31
Fig. 4.1 Curva característica (I-V) y curva de voltaje v/s potencia (P-V) de un módulo de silicio monocristalino con 130 W de potencia. 38
Fig. 4.2 Curva corriente V/S voltaje. 39
Fig. 4.3 Circuito de panel solar e instrumentos para realizar ensayo. 41
Fig. 4.4 Adquisidor de datos NI USB-6009 44
Fig. 4.5 Punta de Voltaje N2862B 46
Fig. 4.6 Reóstato SN 350 49
Fig. 4.7 Piranómetro se silicio disponible en Laboratorio de Energías Renovables.. 50
Fig. 4.8 Panel fotovoltaico monocristalino Siemens 100 Wp. 51
Fig. 4.9 Panel fotovoltaico amorfo Siemens 20 Wp 52
Fig. 4.10 Vista en perspectiva estructura de soporte. 54
Fig. 4.11 Vista elevación lateral de estructura de soporte. 54
Fig. 4.12 Adquisidor de datos NI USB-6009 disponible en LER. 57

Fig. 4.13 Entradas analógicas del adquisidor de datos..... 57
Fig. 4.14 Piranómetro coplanar a panel fotovoltaico y radiación medida. 58
Fig. 4.15 Posición de reóstato y valores medidos en 0% circuito abierto..... 60
Fig. 4.16 Posición de reóstato y valores medidos en 100% circuito abierto..... 60
Fig. 4.17 Mediciones variando posición de reóstato..... 61
Fig. 4.18 Curvas I-V y P-V, tablas de datos..... 62
Fig. 4.19 Equipamiento utilizado en experiencia realizada 63
Fig. 4.20 Conexión de panel solar a reóstato y conexión de punta de voltaje a panel solar. 65
Fig. 4.21 Conexión punta de corriente a panel solar..... 65
Fig. 4.22 Conexión de puntas de corriente y voltaje para adquisidor de datos..... 66
Fig. 4.24 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 10:30. 66
Fig. 4.25 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 12:00. 67
Fig. 4.26 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 13:00. 67
Fig. 4.27 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 14:00. 67
Fig. 4.28 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 15:00. 68
Fig. 4.29 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 16:00. 68
Fig. 4.30 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 17:00. 68
Fig. 4.30 Gráfico Irradiancia - Temperatura - Eficiencia..... 70

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción general

Durante los últimos años se ha acentuado en el mundo la búsqueda de energías alternativas a las fuentes tradicionales, debido principalmente a factores económicos (alza en los precios del petróleo a nivel mundial) y al impacto de éstas en el aumento de las concentraciones de CO_2 en la atmósfera. Una de las fuentes más abundantes de energía disponibles en la Tierra y que responde a esta problemática es la energía solar, lo cual ha hecho que, junto a lo mencionado anteriormente y una naciente conciencia ambiental, esté tomando cada día más fuerza como un complemento a las fuentes de energía tradicionales, e incluso como una alternativa en aplicaciones donde, ya sea por razones económicas, de disponibilidad o de logística, sea conveniente utilizarla. Es por esta razón, que el estudio de las fuentes de energía renovables no convencionales es una temática debe estar presente dentro de la formación del ingeniero mecánico; las energías renovables requieren de investigación y desarrollo para permitir que su participación en la matriz sea cada vez más relevante.

En el ramo de Laboratorio de Procesos Energéticos se realiza la experiencia práctica llamada Laboratorio de Ensayos de Paneles Fotovoltaicos, que hasta el año 2011 se realizaba en el Laboratorio de Evaluación Solar de la Casa Central de la UTFSM. En dicho lugar no se hayan la condiciones de espacio y de seguridad para realizar esta experiencia, además el laboratorio no es exclusivo para este ensayo; en él se encuentran otros implementos e instrumentos que pertenecen a otras actividades que disminuyen el espacio disponible. Es por esto que se ha creado el proyecto del Laboratorio de Energías Renovables, LER desde acá en adelante, ubicado en la Sede José Miguel Carrera, en donde además se incorporan otros tipos de energías de este tipo, la cuales también se estudian y practican en el ramo de Laboratorio de Procesos

Energéticos. Esta unificación facilitará la optimización de recursos, de espacios y de tiempos, puesto que se pretende desarrollar en él distintas experiencias simultáneamente.

En particular, el laboratorio de Paneles Solares Fotovoltaicos apoyará al desarrollo de habilidades y destrezas adquiridas del estudio de la energía solar dentro del aula, como una de las fuentes principales de energías renovables para el desarrollo sustentable.

El sistema didáctico diseñado y el sistema de medición propuestos en esta memoria, consiste en un método de medición y corrección de los parámetros característicos de los paneles fotovoltaicos obtenidos en la experiencia mediante el programa Labview y un equipamiento práctico y transportable. Dicho método se realiza de acuerdo a la Nch.2903.

1.2 Objetivo general

Diseño e instalación de equipo didáctico y sistema de medición para ensayos de Paneles Fotovoltaicos.

1.3 Objetivos específicos

- Estudio acerca del estado del sistema de paneles solares en Chile, tipos, aplicaciones, instalaciones, usos, potencias, evolución y proveedores.
- Definición de equipos e instrumentos a utilizar en la experiencia de medición de rendimiento de paneles fotovoltaicos.
- Propuesta de implementación de laboratorio, equipamiento, software y procedimiento.
- Análisis de resultados y conclusiones.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Historia de las celdas fotovoltaicas

En 1839 el físico experimental francés Edmund Becquerel, descubrió el efecto fotovoltaico mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica de dos electrodos sumergidos en una sustancia electrolítica. Esta pila aumentó su generación de electricidad al ser expuesta a la luz. A fines del siglo XIX científicos tales como W. Smith, W Adas y R. Day descubren la fotoconductividad del selenio y construyen la primera celda experimental hecha de una oblea de selenio. En 1904 Albert Einsten publica su *paper* acerca del efecto fotovoltaico (junto con su paper de la teoría de la relatividad), por este documento es galardonado en 1921 con el Premio Nobel. Recién en 1941 se construye un dispositivo que puede ser llamado "celda solar", la que fue fabricada de selenio y tenía una eficiencia del 1 %.

La compañía Western Electric fue la primera en comercializar las celdas solares en 1955. Mientras tanto, científicos de diversas partes del mundo realizaban experimentos en combinaciones como el cobre y óxido cuproso, en Silicio Monocristalino, en Cadmio, etc. En ese mismo año a la U.S. Signal Corps le fue asignada la tarea de construir fuentes de poder para satélites espaciales. Los estudios de esta compañía comenzaron con celdas de una eficiencia de un 4,5 %, y en tres años lograron que esta eficiencia subiera hasta un 9 %. Fue entonces cuando en 1958 fue lanzado al espacio el primer satélite que utilizaba celdas fotovoltaicas, el Vanguard I. Éste tenía un sistema de poder de 0.1 W, en aproximadamente 100 cm^2 y estuvo operativo por 8 años. Ese mismo año se lanzaron 3 satélites con esta misma tecnología, el Explorer III, el Vanguard II y el 8 Sputnik-3. Desde este año las celdas solares aumentaron su utilización en naves espaciales, y el aumento de eficiencia seguía subiendo a pasos agigantados. Fue así como en 1960 Hoffman Electronics consiguió fabricar una celda con un 14 % de eficiencia. Para la NASA era más importante la seguridad que el costo en sus naves espaciales, por lo cual se utilizaban

celdas solares, pero en la tierra la energía fotovoltaica era 50 veces más cara que cualquier fuente convencional de generación, por lo que fue excluida para el uso terrestre.

En la década de los sesenta, la potencia instalada de las celdas solares de las naves espaciales y satélites alcanzaba a 1 kW. En 1973 se produjo el embargo de petróleo impuesto por la OPEC, con lo cual se inició una política de investigación del uso de celdas solares en la Tierra, se destinaron fondos por sobre los 300 millones de dólares por año, y se comenzaron a investigar nuevos materiales para la construcción de las celdas, tales como el silicio policristalino, las celdas de película delgada, combinaciones CdS/Cu_2 y Silicio amorfo, con el fin de abaratar los costos de éstas.

A principios de los años 80´, la compañía ARCO Solar fabricaba más de 1 MW de celdas solares por año y se comienzan a masificar los módulos de 1,4 a 6 kW. En 1985 se alcanzaba un 20 % de eficiencia en celdas fotovoltaicas, y existían módulos en todas partes del mundo: E.E.U.U., Australia, España, Kenya, Alemania, Ecuador, Japón por nombrar algunos. En Chile se instalaron los primeros módulos en la década de los setenta, principalmente en lugares rurales con módulos de 50 W y baterías de 150 Ah suministrando energía a artefactos de 12 V. Ya en los noventa ARCO Solar fue comprada por Siemens, formando Siemens Solar Industries, una da las firmas de mayor producción de celdas solares a nivel mundial. A fines del siglo pasado en Grecia se aprueba la instalación de una planta de 5 MW en Creta, de un proyecto de 50 MW de la empresa Enron Solar. Aún cuando este proyecto era magno, ya estaba en funcionamiento en California una planta de 6,5 MW produciendo alrededor de 12 millones de kWh por año, suministrando energía a cerca de 2.500 hogares como promedio. Hoy en día las celdas fotovoltaicas son utilizadas en prácticamente todo el mundo, generan el 2,1 % de la energía necesaria para moverlo. Hoy es una industria que en 25 años pasó de producir muy poco a fabricar 70 - 80 MW anuales y con un costo por W que bajó desde los US$50 hasta los 5 US$/W, con alrededor de 40 MW conectados a la red eléctrica. [1]

En lo que a Chile respecta, desde 1914 comenzaron las aplicaciones de la energía solar, cuando se instaló la primera destiladora solar del mundo, aunque ésta y las siguientes incursiones en la tecnología solar se relacionaron con el sistema térmico. En cuanto a energía fotovoltaica, en 1957, la Universidad Católica del Norte, crea el centro de investigación de Energía Solar Aplicada, CIESA, cuyo director fue el Profesor Carlos Espinoza.

Desde 1957, a la fecha, la Universidad Católica del Norte, junto a la Universidad de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad del Estado, hoy USACH, principalmente, acogidos en la Asociación Chilena de Energía Solar Aplicada, (ACHESA) han trabajado, semestralmente, alternando en sus instituciones el servicio de anfitriones, produciendo cientos de artículos de interés científicos y tecnológicos para Chile. Un poco más tarde se incorporaron las Universidades de Concepción, de Tarapacá, la Frontera y finalmente más tarde se incorporaron otras Universidades de las tradicionales.

Hacia 1960 las mediciones de radiación solar en Chile eran más bien esporádicas en diversas regiones del país y sin estar relacionadas sistemáticamente. Sin embargo, al crearse en 1961 el Laboratorio de Energía Solar de la Universidad Santa María, se comenzaron a realizar en dicho Laboratorio no solo mediciones simultáneas comparativas entre diferentes tipos de instrumentos para medir la radiación solar, sino que inmediatamente se tomó contacto con todas aquellas instituciones que ya realizaban este tipo de mediciones y que en ese momento eran: Dirección Meteorológica de Chile, Empresa Nacional de Electricidad (Departamento de Hidrología), Ministerio de Obras Públicas (Departamento de Hidrología), Universidad de Chile, Universidad Católica de Chile, Universidad de Concepción, Universidad Técnica del Estado y Universidad del Norte.

Como se pudo comprobar con el transcurso de los años, Chile no poseía ningún libro que contuviera los registros solarimétricos por lo que suscribió en el año 2007, un contrato con el Departamento de Mecánica de la Universidad Técnica Federico

Santa María, con el objeto de preparar y disponer de un manual que contenga información de irradiancia solar en diversos territorios de la República de Chile. Contar con esta información en la modalidad escrita y digitalizada permitiría hacer una acertada difusión de estos antecedentes técnicos tan necesarios y útiles para el diseño de sistemas solares térmicos y/o fotovoltaicos por parte de profesionales y técnicos del país. Hoy por hoy este manual es de vital importancia a la hora de realizar cualquier estimación referente a un sistema fotovoltaico. Los datos presentados se originan en el Laboratorio de Energía y Evaluación Solar de la Universidad Técnica Federico Santa María, creado, como se mencionó anteriormente, en el año 1960 por el profesor de la Facultad de Mecánica de entonces, Julio Hirschmann R. posteriormente a cargo de los profesores Adolfo Arata A., Pedro Roth U., por el profesor del Departamento de Mecánica, Pedro Sarmiento M, luego por el profesor Andrés Olivares y actualmente por el profesor Rafael Bolocco. [2].

2.2 La radiación solar en la tierra

La radiación solar que llega a la Tierra se ve afectada por un conjunto de factores agrupados en dos tipos: geométricos (astronómicos y geográficos), y atmosféricos. Los primeros inciden sólo en la radiación que se tiene en el tope de la atmósfera, mientras que los segundos afectan a los rayos incidentes provenientes del Sol que la traspasan y llegan a la superficie terrestre.

Es necesario comentar que la radiación a medir en este ensayo no corresponde a las que se describen a continuación, pues éstas son medidas de forma horizontal, mientras que la radiación que se medirá en esta experiencia es **coplanar al panel fotovoltaico,** según se describe posteriormente.

De igual forma se describen las radiaciones incidentes en la Tierra.

2.2.1 Radiación solar en la superficie terrestre

Una vez que los rayos solares penetran la atmósfera, se distinguen los siguientes tipos de radiación.

2.2.1.1 Radiación directa I_B

Es aquella que llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

2.2.1.2 Radiación difusa I_D

Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta es la denominada radiación difusa. Ella va en todas direcciones como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes, sino que de las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc.

Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que ven toda la bóveda celeste, mientras que las verticales reciben menos porque sólo ven la mitad.

2.2.1.3 Radiación reflejada I_R

La radiación reflejada es, como su nombre indica, aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, conocido como albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, porque no ven ninguna superficie terrestre y las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben. Las superficies oblicuas reciben una cantidad intermedia entre los dos casos anteriores.

2.2.1.4 Radiación global I_G

Ella corresponde simplemente a la suma de las tres radiaciones anteriores:

$$I_G = I_B + I_D + I_R \quad (1)$$

En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado casi no existe radiación directa y casi la totalidad de la radiación que incide es difusa. [2]

2.3 Principio de funcionamiento de las celdas solares

El principio por el cual una celda fotoeléctrica es capaz de convertir la energía lumínica del sol en energía eléctrica es el llamado efecto fotoeléctrico. Dicho efecto consiste en un fenómeno cuántico en el cual electrones son emitidos por un material después de haber absorbido energía proveniente desde una fuente de radiación electromagnética como luz visible o rayos X entre otros.

Los fotones de un rayo de luz tienen una energía característica determinada por su frecuencia. En el proceso de fotoemisión, si un electrón absorbe la energía de un fotón y éste último tiene más energía que su función trabajo φ, la cual corresponde a la energía mínima necesaria para mover un electrón de un sólido a un punto fuera de su superficie, el electrón es arrancado del material. Si la energía del fotón es demasiado baja, el electrón no puede escapar de la superficie del material. El aumentar la energía del rayo no cambia la energía de sus fotones constituyentes, sólo cambia el número de fotones. En consecuencia, la energía de los fotones emitidos no depende de la intensidad de la luz, sino de la energía de los fotones individuales.

Los electrones pueden absorber energía de los fotones cuando son irradiados, pero siguiendo un principio de "todo o nada". Toda la energía de un fotón debe ser absorbida y utilizada para liberar un electrón de un enlace atómico, o sino la energía es reemitida. Si la energía del fotón es absorbida, una parte libera al electrón del átomo y el resto contribuye a la energía cinética del electrón como una partícula libre.

Cada vez que un fotón logre remover un electrón fuera de su órbita, se creará un par electrón hueco. El hueco corresponde a un átomo que carece de un electrón. De esta forma la energía absorbida es transmitida a un electrón en un átomo del material semiconductor como se muestra en la figura 2.1, causando el desplazamiento de este y de muchos otros que sucesivamente forman una corriente eléctrica. [3]

Para producir esta diferencia de potencial se crea un campo eléctrico permanente a través de una unión P-N mediante dos capas dopadas que componen la celda: La capa superior se compone de silicio dopado de tipo n. En esta capa, hay un número de electrones libres mayor que una capa de silicio puro, como carga negativa (electrones). El material permanece eléctricamente neutro, pero es la red cristalina quien tiene globalmente una carga negativa. La capa inferior de la celda se compone de silicio dopado de tipo p. Esta capa tiene una cantidad media de electrones libres menor que una capa de silicio puro, los electrones están ligados a la red cristalina que, en consecuencia, está cargada positivamente. La conducción eléctrica está asegurada por los *huecos*, positivos.

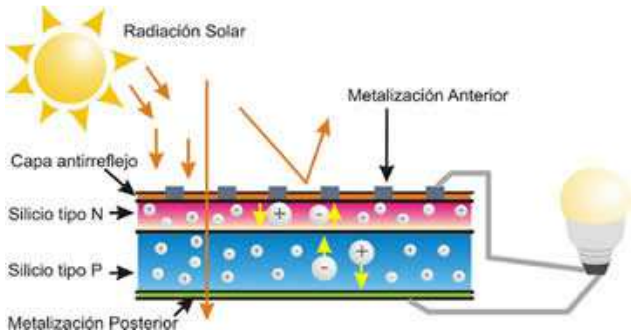


Fig. 2.1 Funcionamiento celda fotovoltaica.

El flujo de electrones es una corriente continua que no cambia de sentido, pero su intensidad es proporcional a la frecuencia de color de la luz incidente y es función de la energía de unión de un electrón a su red atómica, siendo este último un parámetro característico del material.

2.4 Tipos de paneles

2.4.1 Según su materialidad

2.4.1.1 Paneles de silicio monocristalino

El silicio es un material muy abundante y las celdas construidas con este material han demostrado su fiabilidad tanto en aplicaciones espaciales como terrestres. Las celdas de silicio han evolucionado desde la convencional unión P-N hacia diseños y estructuras más complicadas siempre persiguiendo el mejorar la eficiencia al tratar de captar la mayor cantidad de fotones incidentes. Con lo anterior se han conseguido eficiencias superiores al 24% en celdas de silicio monocristalino. El Si se purifica, se funde y se cristaliza en lingotes redondos. Una vez redondeado se corta en finas obleas, las que son de un color uniforme, generalmente azul o negro. Se les denomina células cSi.

En laboratorio se han alcanzado rendimientos máximos del 24,7% para éste tipo de paneles siendo en los comercializados del 16%.

2.4.1.2 Paneles de silicio policristalino

Estas celdas son fabricadas con Si de menor pureza y su costo es menor a las celdas monocristalinas. Su rendimiento es ligeramente menor que las anteriores, pero las ventajas del costo compensan las pérdidas de la eficacia. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado.

Se caracterizan por poseer zonas de colores diferentes o imperfectos a gran diferencia de las celdas monocristalinas que son de un color notoriamente uniforme. Se les denomina células pSi.

Se obtiene con ellos un rendimiento inferior que con los monocristalinos (en laboratorio del 19.8% y en los módulos comerciales del 14%).

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:

2.4.1.3 Películas policristalina delgada

Las láminas delgadas son de (1[μm] a 10[μm] de grosor, absorben 90% de luz) son hechas de arseniuro de galio (GaAs, uno de los materiales más eficientes, presenta unos rendimientos en laboratorio del 25,7% siendo los comerciales del 20%) o de teluro de cadmio (CdTe, rendimiento en laboratorio 16% y en módulos comerciales 8%). Éstas son más eficientes que las de silicio de junturas múltiples debido a que poseen bandas prohibidas más grandes.

Una ventaja adicional del silicio policristalino es la facilidad con la que grandes estructuras pueden ser hechas.

2.4.1.4 Celdas de simple o múltiple juntura

La mayoría de los materiales fotovoltaicos son hechos de una sola capa de material fonoabsorbente. Sin embargo puede ser ventajoso “apilarlas” en capas. Las celdas de distintas bandas prohibidas apiladas unas sobre otras se conocen como celdas de múltiple juntura.

Dado que la luz azul tiene una mayor energía que la luz roja, la primera capa remueve la energía de la luz azul mayoritariamente, y correspondientemente la luz menos azulada (o más enrojecida) es removida mientras ella desciende a través de la secuencia de capas formando la celda solar de múltiple juntura. Una celda de doble juntura de GaInP sobre GaAs puede llegar a tener una eficiencia sobre el 30%.

2.4.1.5 Amorfas

Las células amorfas, como su nombre lo indica (a=sin; morfo=forma), no poseen una estructura cristalina. Está formada por capas delgadas sucesivas depositadas al vacío sobre un cristal, plástico o metal, el proceso es muy similar al de un pintado. Precisamente esa simplificación en la estructura conduce a un abaratamiento drástico de las celdas. Es un hecho que cuando más se aleja la técnica de fabricación de una célula fotovoltaica de la estructura cristalina pura, más defectos estructurales aparecerán en la substancia semiconductora, disminuyendo la eficiencia de conversión. Para reducir este efecto, el espesor del material activo en estas células es diez veces menor que el de una célula de Silicio Monocristalina. Esto, a su vez, contribuye a bajar el costo. Se producen en una variedad de colores y se consiguen rendimientos del 11,5% en laboratorios y hasta un 8% en plena producción. Algunos inconvenientes se refieren a la degradación o disminución de su eficiencia tras una prolongada exposición solar.

2.4.1.6 Paneles Tándem

Combinan dos tipos de materiales semiconductores distintos. Debido a que cada tipo de material aprovecha sólo una parte del espectro electromagnético de la radiación solar, mediante la combinación de dos o tres tipos de materiales es posible aprovechar una mayor parte del mismo. Con este tipo de paneles se ha llegado a lograr rendimientos del 35%.

La mayoría de los módulos comercializados actualmente están fabricados de silicio monocristalino, policristalino y amorfo. El resto de materiales se emplean para aplicaciones más específicas y son más difíciles de encontrar en el mercado.

Actualmente se está estudiando nueva tecnología, es un tipo de panel solar muy fino, muy barato de producir y que según dicen sus desarrolladores presenta el mayor nivel de eficiencia de todos los materiales. Este tipo de panel está basado en el Cobre Indio Galio Diselenido (CIGS) y se pronostica que en un futuro no muy lejano,

debido a su competitiva relación entre producción de energía/costo pueda llegar a sustituir a los combustibles fósiles en la producción de energía.

2.4.2 Según su forma

Empleándose cualquiera de los materiales antes comentados se fabrican paneles en distintos formatos para adaptarse a una aplicación en particular o bien para lograr un mayor rendimiento. Algunos ejemplos de formas de paneles distintos del clásico plano son:

2.4.2.1 Paneles con sistemas de concentración

Un ejemplo de ellos es el modelo desarrollado por una marca española, el cual mediante una serie de superficies reflectantes 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. Actualmente se investigan sistemas que concentran la radiación solar por medio de lentes. La concentración de la luz sobre los paneles solares es una de las vías que están desarrollando los fabricantes para lograr aumentar la efectividad de las células fotovoltaicas y bajar los costos.

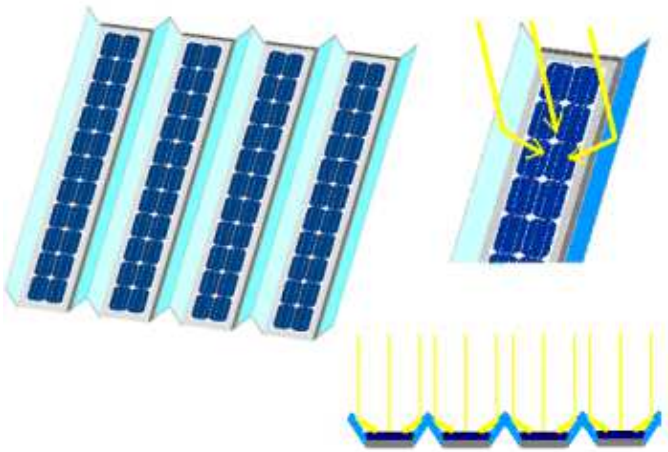


Fig. 2.2 Panel solar con reflectantes.

2.4.2.2 Paneles de formato 'teja' o 'baldosa'

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. Son aptos para cubrir grandes demandas energéticas en los que se necesita una elevada superficie de captación.

Fig. 2.3 Panel solar formato teja.

2.4.2.3 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. [4]

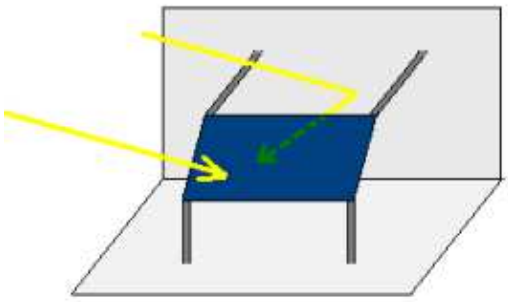


Fig. 2.4 Panel bifacial.

2.5 Orientación

Para los objetivos de esta memoria, no es necesaria la aplicación de un sistema de seguimiento solar demasiado sofisticado. Los sistemas de seguimiento solar tienen por objetivo aumentar la potencia entregada para su aplicación y así conseguir óptimos resultados.

La potencia entregada por una celda solar se puede aumentar con bastante eficacia empleando un mecanismo de seguimiento para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al sol, o concentrando la luz del sol usando lentes o espejos. Sin embargo, hay límites a este proceso, debido a la complejidad de los mecanismos y de la necesidad de refrescar las celdas, pues como se menciona posteriormente, la eficiencia de las celdas disminuye con la temperatura. La corriente es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la celda.

La posición del Sol en cualquier lugar se determina mediante los ángulos de elevación, zenit y azimut. El ángulo de elevación del sol $\theta_{elevación\ sol}$ es expresado en grados sobre el horizonte. El ángulo azimut $\theta_{azimut\ sol}$ se expresa en grados desde el norte. Por tanto el ángulo zenit $\theta_{zenit\ sol}$ es igual a:

$$\theta_{zenit\ sol} = 90° - \theta_{elevación\ sol} \tag{2}$$

La forma en que están relacionados los ángulos se puede apreciar mejor en la figura 2.5.

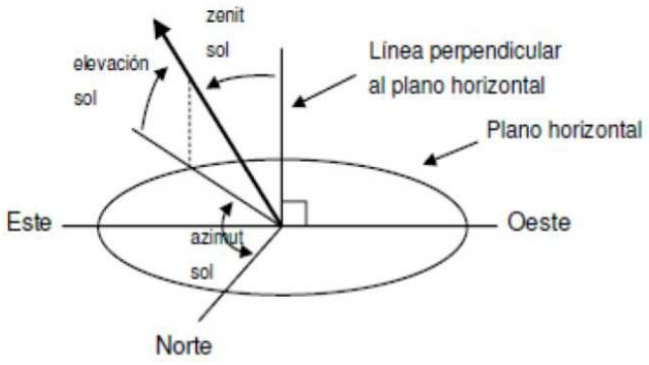


Fig. 2.5 Relación entre ángulos trayectoria luz solar.

Se debe tener presente que el sol no tiene una trayectoria fija durante todo el año, es por esto que se muestra a continuación la posición del sol según las estaciones del año, en la figura 2.6:

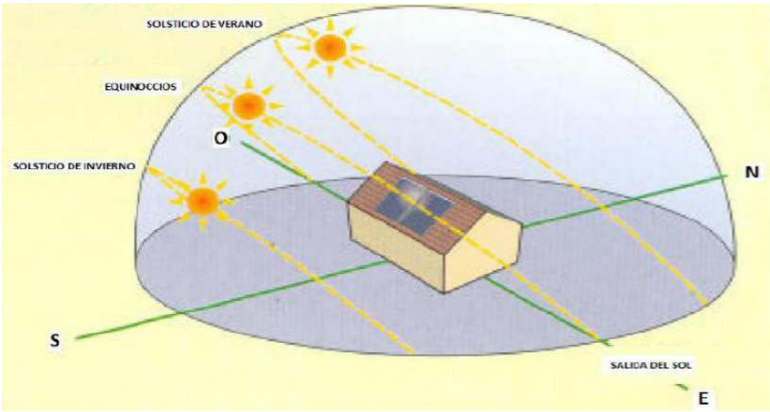


Fig. 2.6 Trayectorias del sol según estación del año.

Al emplear sistemas de seguimiento en los sistemas fotovoltaicos se logra favorecer y aumentar la captación de radiación solar.

Los distribuidores en Chile recomiendan 15° más la latitud correspondiente como norma para todo el territorio. Ligeras desviaciones de unos 5 grados con respecto del ángulo de inclinación óptimo tienen sólo un efecto menor, las diferencias

a causa de las condiciones climáticas son más importantes en la producción de energía. [1]

En la figura 2.7 se muestra donde se encuentra el ángulo de inclinación de un panel fotovoltaico.

Fig. 2.7 Ángulo de inclinación.

Una tabla con ángulos de inclinación recomendados lo muestra la tabla 2.1

Tabla 2.1 Ángulos de inclinación para sistemas fijos. [1]

Latitud del lugar (en grados)	**Ángulo de inclinación fijo**
0º a 15º	15º
15º a 25º	La misma latitud
25º a 30º	Latitud más 5º
30º a 35º	Latitud más 10º
35º a 40º	Latitud más 15º
40º o más	Latitud más 20º

Fuente: http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/La_energ%C3%ADa_proveniente_del_sol [4]

La ubicación de la ciudad de Viña del Mar es 33º latitud sur, 71º longitud oeste, por tanto, según la tabla mostrada el ángulo de inclinación adecuado es de 43º.

2.6 Tipos de soporte para paneles solares

2.6.1.1 Colocación sobre soportes estáticos:

Soporte sencillo sin movimiento. La inclinación que se le da al sistema para captar la mayor radiación solar posible depende de la latitud de la instalación y de la aplicación del sistema. Este es el tipo de soporte más habitual y económico.

2.6.1.2 Sistema de seguimiento solar de 1 eje:

La rotación del soporte se hace por medio de un solo eje, ya sea horizontal, vertical u oblicuo. Este tipo de seguimiento es el segundo más económico y sencillo, aunque incompleto, pues puede seguir la elevación o el azimut del sol, pero no ambas a la vez.

2.6.1.3 Sistemas de seguimiento solar de dos ejes:

Con este sistema es posible realizar un seguimiento total del sol en elevación y en azimut. Siempre se conseguirá que la radiación solar incida perpendicularmente obteniéndose la mayor captación posible. Existen tres sistemas básicos de regulación del seguimiento del sol por dos ejes:

- Sistemas mecánicos: El seguimiento se realiza por medio de un motor y de un sistema de engranajes. Dado que la inclinación del sol varía a lo largo del año es necesario realizar ajustes periódicos, para adaptar el movimiento del soporte.

- Mediante dispositivos de ajuste automático: El ajuste se realiza por medio de sensores que detectan cuando la radiación no incide perpendicular al panel corrigiéndose la posición por medio de motores.

- Dispositivos sin motor: Sistemas que mediante la dilatación de determinados gases, su evaporación y el juego de equilibrios logran un seguimiento del Sol. [5]

2.7 Aplicaciones paneles fotovoltaicos

2.7.1 Aplicaciones estacionarias

- Centrales eléctricas fotovoltaicas: Europa es quien lleva la delantera en estas centrales, siendo España y Alemania los países en donde ubican el 90% de las 50 mayores instalaciones de este tipo en el mundo, siendo la más grande de ellas la Central Hoya de los Vicentes, ubicada en Murcia, España con una potencia instalada de 23 [MW], construida en Enero de 2008.

- Net Metering.: En algunos países se utiliza este sistema, el cual básicamente consiste en permitir a los usuarios recibir alguna compensación económica por cualquier energía extra que incorporen a la red. Por lo general, se trata de inyecciones de energía a la red provenientes de energías renovables no convencionales, en particular de energía eléctrica fotovoltaica. Este tipo de venta de energía debe encontrarse regulado por ley para poder ser utilizado. Algunos de los países que permiten este sistema son Australia, Bélgica, México, Nueva Zelanda, Portugal, Singapur, Estados Unidos, España y Alemania. En los últimos dos países hay un fuerte incentivo hacia este sistema.

Las siguientes aplicaciones se caracterizan por encontrarse en lugares donde llevar energía vía tendido eléctrico es muy caro y complicado, debido a la lejanía y la complejidad de los terrenos o su geografía.

- Estaciones repetidoras de microondas y de radio: Presentes en lugares distantes de abastecimiento eléctrico y terrenos de difícil acceso como cerros escarpados.

- Electrificación de pueblos en áreas remotas (electrificación rural): De alta importancia social ya que permite llevar energía a lugares en donde realizar la electrificación mediante instalaciones tradicionales es demasiado complicado.

- Sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua: Muchas veces ellos se instalan lugares alejados de la civilización como curso de los ríos, glaciares y otros.

- Bombeo de agua: El bombeo de agua ya sea para consumo humano, animal o para regadío en áreas rurales es una importante aplicación de paneles fotovoltaicos. Estos sistemas funcionan ya sea mediante el uso de motores AC o DC, los cuales tienen la ventaja que pueden ser conectados directamente a los paneles fotovoltaicos sin la necesidad de un inversor u otro dispositivo adicional. Esta aplicación es de vital importancia en donde el agua es escasa y además no existen fuentes de energía de fácil acceso como electricidad, combustibles fósiles, etc.

2.7.2 Aplicaciones móviles

En este tipo de aplicaciones los paneles de celdas fotovoltaicas se desplazan mientras están funcionando, lo que hace que la radiación solar que reciben varíe de forma distinta al compararlas con las aplicaciones estacionarias. [6]

2.7.2.1 Aplicaciones espaciales

Las celdas solares deben su aparición a la industria aeroespacial, y se han convertido en el medio más fiable de suministrar energía eléctrica a un satélite o a una sonda en las órbitas interiores del Sistema Solar. Esto es gracias a la mayor irradiación solar sin el impedimento de la atmósfera y a su bajo peso. El primer

satélite en utilizar celdas fotovoltaicas fue lanzado el 17 de marzo de 1958 por los Estados Unidos y es el que se muestra en la figura 2.8. Dicho satélite fue el Vanguard 1 y corresponde al cuarto satélite puesto en órbita de manera exitosa por el hombre, y el más antiguo que aún se encuentra orbitando la Tierra.

Fig. 2.8 Satélite 'Vanguard I'.

En la actualidad, la mayoría de los satélites que orbitan la Tierra utilizan celdas solares. Las naves espaciales son construidas de forma tal que sus paneles puedan pivotear mientras ellas se mueven, por lo que los paneles pueden permanecer perpendiculares a los rayos de luz sin importar la dirección de la nave.

2.7.2.2 Aplicaciones terrestres

En la actualidad, la mayoría de las aplicaciones móviles de tracción eléctrica terrestre que utilizan energía solar corresponden a automóviles solares.

Un automóvil solar es un automóvil propulsado por un motor eléctrico alimentado por energía solar obtenida mediante paneles ubicados sobre su superficie, la que puede ser almacenada en baterías eléctricas o utilizada directamente por el motor. En la actualidad estos vehículos no son una forma de transporte práctica debido, principalmente, a los grandes costos que tiene un vehículo de este tipo.

En la figura 2.9 se muestra el auto solar creado por un equipo multidisciplinario de la Universidad Técnica Federico Santa María, el cual fue presentado en la Feria Internacional del Aire y el Espacio el año 2012.

Fig. 2.9 Ergón, auto solar creado por equipo USM.

2.7.2.3 Aplicaciones aéreas

Una aeronave eléctrica, como su nombre lo indica, corresponde a una aeronave que utiliza motores eléctricos en vez de los clásicos motores de combustión interna.

Hoy en día existe un gran interés militar en los vehículos aéreos no tripulados. La energía solar les permitiría a éstos permanecer en el aire por meses, convirtiéndose en un medio mucho más barato para realizar labores que hoy son llevadas a cabo por satélites.

2.7.2.4 Aplicaciones marítimas

Si las embarcaciones, cualquiera sea su capacidad, utilizan como fuente de energía celdas solares fotovoltaicas, entonces se está hablando de un barco solar. Generalmente cruceros, submarinos y torpedos usan motores eléctricos para su propulsión, pues esto favorece la ausencia de ruido y oscilaciones, pero generan la electricidad necesaria a través del uso de muchos generadores Diesel pequeños. En 1995 se construyó el primer barco solar y hoy en día existe una cantidad considerable de ellos. [7]

2.1 Factores que afectan a la característica I-V del panel fotovoltaico

La curva característica corriente tensión, llamada desde ahora curva I-V, del generador fotovoltaico se ve afectada por factores ambientales tales como la intensidad de iluminación (irradiancia), la temperatura y la distribución espectral de la luz.

2.1.1 Efecto de la intensidad de iluminación (Irradiancia)

En general la irradiancia afecta principalmente a la corriente, de forma que se puede considerar que la corriente de cortocircuito del panel fotovoltaico es proporcional a la irradiancia:

$$I_{sc}(E_b) = I_{sc}(E_a)\frac{E_b}{E_a} \tag{3}$$

Donde: I_{sc} (E_b) es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia E_b .

I_{sc} (E_a) es la corriente de cortocircuito para un nivel de irradiancia E_a.

La tensión de circuito abierto (V_{oc}) varía gradualmente con la irradiancia incidente dentro de un amplio rango de niveles, pero cuando el nivel de irradiancia es muy bajo se tiene que la tensión de circuito abierto cae muy bruscamente. A su vez, se tiene que la corriente de corto circuito (I_{sc}) y de máxima potencia de la celda varían casi linealmente con la variación del nivel de irradiancia. Los dos efectos anteriores hacen que la potencia generada por la celda solar varíe de forma casi linealmente proporcional con el nivel de irradiancia [3].

En la Figura 2.11 y en la Figura 2.12 se aprecian los efectos descritos.

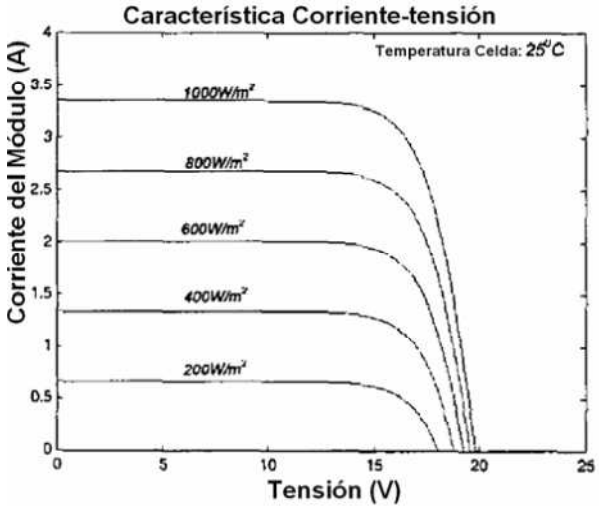


Fig. 2.10 Variación característica I-V al variar la irradiancia.

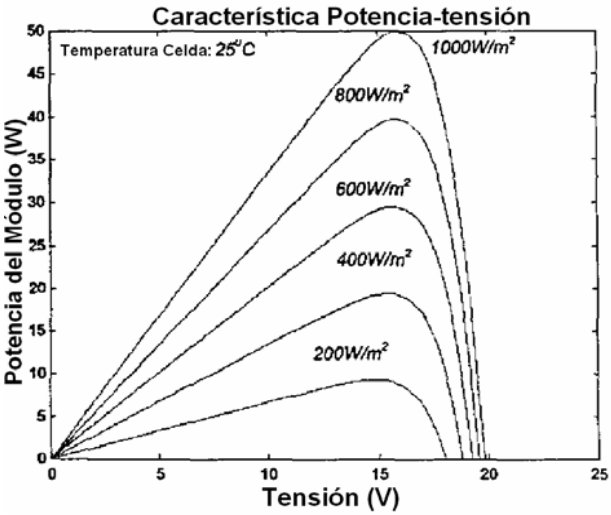


Fig. 2.11 Variación característica P-V al variar la irradiancia.

En las figuras anteriores se aprecia que para una irradiancia del orden de 300-400 [W/m^2] se tiene el punto límite de diferenciación de los dos comportamientos de la tensión de circuito abierto V_{oc}. Para valores mayores, ella varía gradualmente, pero para valores menores, ella varía de forma muy brusca. En particular, se aprecia que para 200 [W/m^2], el V_{oc} se aleja mucho del resto de los valores de tensión con irradiancias mayores.

2.1.2 Efecto de la temperatura

La temperatura afecta principalmente a los valores de voltaje de la característica I-V, y tiene su mayor influencia en el voltaje de circuito abierto (V_{oc}), aunque también modifica los valores del punto de máxima potencia y el valor de Isc (éste muy ligeramente).

Los organismos de energía solar han establecido por convección que se pueden obtener del orden de 1000 watt por metro cuadrado de superficie expuesta directamente al sol, sin embrago, los paneles fotovoltaicos tienen una eficiencia energética del orden del 14 al 18% a 25º C, lo que significa que por cada un metro cuadrado de panel se pueden obtener cerca de 180 watt, pero ¿qué ocurre con los 820 watt restantes?, lo que ocurre es que se encuentran presentes en forma de energía térmica. La superficie de un panel solar se puede calentar alcanzando temperaturas de hasta 60ºC, lo que al mismo tiempo disminuye el rendimiento del panel en un 15 %, ya que la resistividad eléctrica de un conductor aumenta gradualmente a medida que se eleva la temperatura. Por el contrario, si la temperatura disminuye por debajo de los 0º C el conductor reduce su resistencia aumentando su conductividad.

Las pruebas realizadas por los fabricantes de paneles solares se realizan en laboratorios bajo condiciones ideales a temperaturas de 25º C, lo que significa que a partir de aquel umbral, si se eleva la temperatura el panel reduce su eficiencia 0,44% por cada 1ºC, disminuyendo su rendimiento en a un 15,4% a 60ºC, es decir, si por cada 1 m^2 de panel, con una eficiencia de 18% se obtienen 180 watt a 25ºC, al aumentar la temperatura a 60ºC se obtendrán cerca de 152 watt/m^2, equivalente a una eficiencia cercana al 15%. Dicha diferencia de 27 watt no es menos, por lo que el fenómeno de temperatura no puede considerarse despreciable si se trata de eficiencia energética. [3]

Las siguientes figuras muestran gráficamente lo descrito anteriormente.

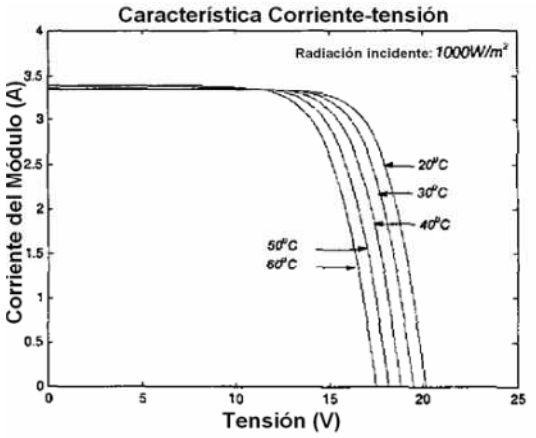


Fig. 2.12 Variación característica I-V al variar la temperatura de trabajo.

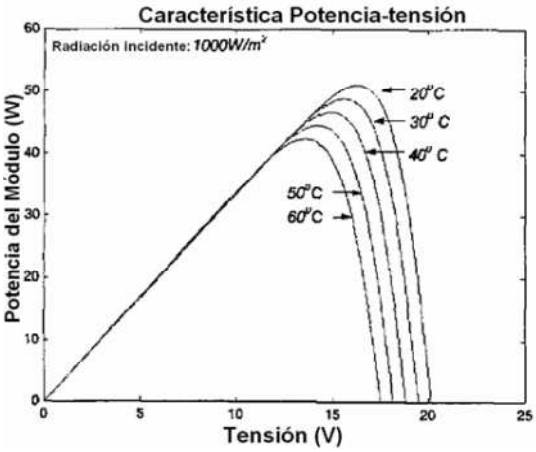


Fig. 2.13 Variación característica P-V al variar la temperatura de trabajo.

Existen tres coeficientes α, β y γ que representan la variación de los parámetros fundamentales de la curva característica I-V del panel fotovoltaico con la temperatura. Así, α expresa la variación de la corriente de cortocircuito con la temperatura, β la variación del voltaje de circuito abierto y γ la variación de la potencia máxima. En general, los fabricantes de módulos fotovoltaicos incluyen en sus hojas de características técnicas los valores de estos tres coeficientes:

$$\alpha \approx 1.5\ mA/°C$$

$$\beta \approx -2.3\, mV/°C$$

$$\frac{1}{P_{máx}}\gamma = -0.0044\,\frac{1}{°c} \tag{4}$$

2.2 Contexto nacional

En el desierto más árido del mundo la electricidad es escasa. Es una de las zonas del planeta en la que más horas al año brilla el sol. Y sin embargo, allí donde casi nunca llueve se prefiere generar energía usando el agua.

Chile tiene un problema energético que se creyó solucionado gracias a una serie de acuerdos firmados con Argentina por los cuales el Estado vecino debía ayudar a compensar la carencia de recursos energéticos propios de Chile. Pero el gas argentino se está agotando. Chile es un país en vías de desarrollo, lo que se ve reflejado en los índices de crecimiento mantenidos en el tiempo. Además, junto con el crecimiento de la economía aumenta la demanda de recursos energéticos, en particular de energía eléctrica. En los últimos años, las tasas de crecimiento de la demanda de energía primaria han sido cercanas al 5% y se espera que se mantengan cercanas a ese valor.

Además, cerca de un 70% del consumo bruto de energía primaria corresponde a combustibles importados. Frente a esta situación, la investigación y producción de energías renovables no sólo ofrece la oportunidad de generar independencia energética, sino también diversificación de la matriz y sustentabilidad ambiental.

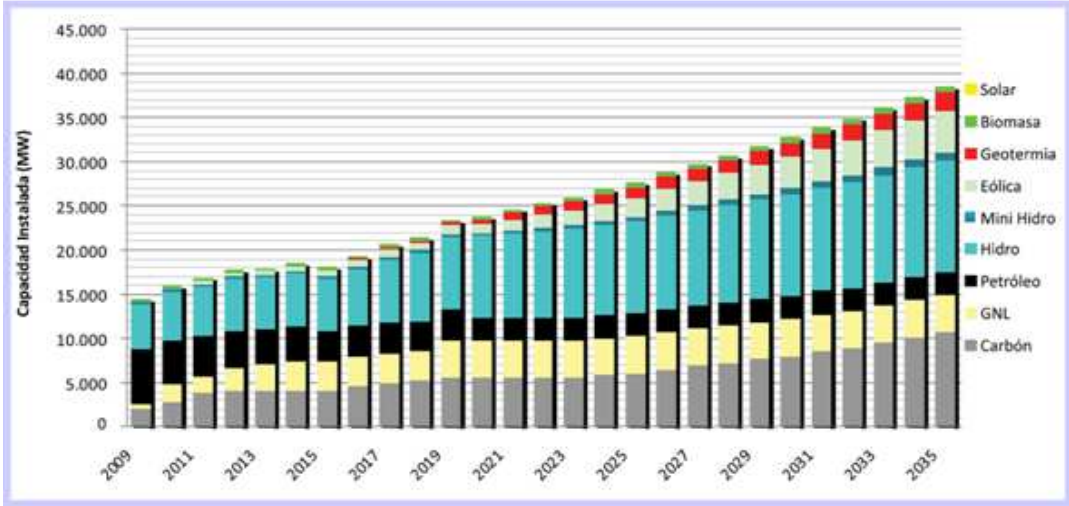


Fig. 2.14 Proyección de la capacidad instalada en SIC + SING al 2035.

En la figura 2.14 se presenta el escenario proyectado a futuro, el cual impone la necesidad de una preocupación real por el estado actual y futuro del medioambiente y sobretodo, de nuestra matriz energética. [8]

Históricamente la matriz energética de Chile ha contado con una participación importante de energías renovables, en particular de la energía hidráulica convencional utilizada para generación eléctrica. Esta participación ha disminuido en los últimos años producto del crecimiento de sectores que tienen un consumo intensivo de derivados del petróleo, como el transporte, y del aumento de la capacidad de generación eléctrica térmica a partir de gas natural. Sin perjuicio de ello, la participación de las energías renovables sigue siendo significativa en el abastecimiento energético nacional.

De acuerdo a la información del Centro de Energías Renovables del Ministerio de Energía de diciembre de 2012, existen 10.531 MW (10,531 GW) en el Sistema de Evaluación Ambiental entre proyectos aprobados y en evaluación sin construir de ERNC. El 51% de las iniciativas corresponde a proyectos solares, el 47% a parques eólicos y el 2% restante, a proyectos mini hidráulicos y uno geotérmico.

En cuanto a la situación nacional de la energía solar fotovoltaica, los costos de la generación eléctrica solar se encuentran en torno a los US$10.000 por kW instalado, lo que se ha constituido en su principal freno para su integración masiva en la zona norte de nuestro país.

Chile cuenta con limitados recursos energéticos propios, de modo que tiene una alta dependencia externa en materia de energéticos, que se espera se mantenga en el futuro. Salvo que se descubran o se desarrollen nuevas fuentes de energía en el territorio, la dependencia energética de Chile seguirá siendo un rasgo estructural de su economía. Hoy el país importa casi dos tercios de su matriz energética primaria, proporción que llega a 98% del consumo en el caso del petróleo, 75% en gas natural y 96% en el caso del carbón (CNE, 2006).

En Chile el potencial de energía solar se estima en torno a los 228.000 MW eléctricos. Las áreas de mayor potencial han sido identificadas por el Ministerio de Energía y dadas a conocer a través del Explorador Eólico-Solar de Chile, que entrega un panorama general mediante un modelo de mesoescala e imágenes satelitales.

Fig. 2.15 Potencial de energía solar en Sud-América.

Un estudio realizado por el Ministerio de Energía y GIZ (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit – Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional) en 2011, permitió identificar los suelos disponibles para la ubicación de proyectos de generación solar.

Los resultados indican que la potencia instalable de tecnología CSP (Concentrated solar power – centrales solares termoeléctricas) total en el país es de 2.637 GW. Esta tecnología consiste en la generación de energía mediante el uso de espejos que concentran la energía solar. La potencia instalable para la tecnología fotovoltaica es de 1.318 GW. En ambas destaca la Región de Antofagasta, que representa el 50% de la superficie favorable a nivel nacional.

Los proyectos más avanzados son: Planta solar Fotovoltaica Calama I y Planta solar Fotovoltaica Calama II, cuyo EIA fue aprobado durante el año 2009 y a principios del 2010 respectivamente. Ambas plantas se ubicarían en la región de Antofagasta, conectándose al SING, tendrían una potencia instalada de 9 MW y una inversión estimada de 40 MMUS$ cada una. [9]

3 Normas técnicas de la energía solar fotovoltaica

La International Electrotechnical Commission (IEC) es el organismo internacional que se encarga de la estandarización en energía solar fotovoltaica. Las tareas de la IEC se estructuran mediante comités técnicos (Technical Committee - TC) abocados al tratamiento de las normas sobre temas específicos. El TC82 está dedicado a sistemas de conversión fotovoltaica. Las tareas de normalización del

TC82 se coordinan con otros TC como el TC47 - Dispositivos semiconductores y el TC21 – Baterías y celdas secundarias.

Las actividades dentro de los comités técnicos se organizan en distintos grupos de trabajo (Working Group - WG) que se encargan de la elaboración primaria de los documentos que luego se convertirán en normas.

Los WG que actualmente están desarrollando actividades son:

• WG 1 – Nomenclatura,

• WG 2 – Módulos – No concentradores,

• WG 3 – Sistemas,

• WG 4 – Sistemas de almacenamiento de energía,

• WG 5 – Calidad y Certificación (Disuelto),

• WG 6 – Otros componentes del sistema FV,

• WG 7 – Módulos concentradores.

En el Anexo B se presenta un listado con la totalidad de las normas aprobadas por el comité técnico 82 de IEC a Enero de 2004. Algunas de las mismas están relacionadas con el comportamiento de las celdas y módulos fotovoltaicos, otras establecen el proceso de medición y comprobación de dicho comportamiento. Es de destacar que se encuentran en proceso de discusión una veintena de normas lo que expresa claramente el esfuerzo existente para mejorar el marco normativo de esta actividad en pleno desarrollo. [10]

En Chile, la normativa que se adopta para la conversión de Energía Solar Fotovoltaica se llama Normativa Chilena para Sistemas Solares Fotovoltaicos y se presenta en la tabla 3.1:

Tabla 3.1 Normativa Chilena para Sistemas Solares Fotovoltaicos

NCh2970.Of2005 IEC 61683:1999	Energía fotovoltaica - Sistemas fotovoltaicos Acondicionadores de potencia – Procedimiento para la medición de rendimiento
NCh2976.Of2005	Energía fotovoltaica - Módulos fotovoltaicos de silicio cristalino para aplicaciones terrestres – Calificación del diseño y aprobación de tipo
NCh2922.Of2005	Energía fotovoltaica - Susceptibilidad de un módulo fotovoltaico al daño por impacto accidental
NCh2927.Of2005	Energía fotovoltaica – Sistemas generadores fotovoltaicos terrestres – Generalidades y guía
NCh2896.Of2004	Energía fotovoltaica – Especificaciones generales para sistemas fotovoltaicos domésticos de 12 V corriente continua - Requisitos
NCh2902.Of2004 IEC 61836:1997	Energía fotovoltaica – Sistemas de energía solar fotovoltaica – Términos y símbolos
NCh2956.Of2005 IEC 61646:1996	Energía fotovoltaica - Módulos fotovoltaicos de lámina delgada para aplicaciones terrestres - Calificación del diseño y aprobación de tipo
NCh2925.Of2005	Energía fotovoltaica - Ensayo de corrosión en módulos fotovoltaicos - Método de niebla salina
NCh2903/1.Of2004 IEC 60904-1:1987	**Energía fotovoltaica - Dispositivos fotovoltaicos - Parte 1: Medición de las características corriente-tensión fotovoltaicas**
NCh2898.Of2004	Energía fotovoltaica - Parámetros característicos de sistemas fotovoltaicos autónomos
NCh2903/3.Of2004 IEC 60904-3:1989	Energía fotovoltaica - Dispositivos fotovoltaicos - Parte 3: Principios de medición de dispositivos solares fotovoltaicos terrestres con datos de irradiancia espectral de referencia
NCh2903/2.Of2004	Energía fotovoltaica - Dispositivos fotovoltaicos - Parte 2: Requisitos de las celdas solares de referencia
NCh2903/10.Of2004 IEC 60904-10:1998	Energía fotovoltaica - Dispositivos fotovoltaicos - Parte 10: Métodos de medición de la linealidad
NCh2940.Of2005 IEC 61173:1992	Energía fotovoltaica - Protección contra las sobretensiones de los sistemas generadores fotovoltaicos - Guía

Fuente: Catálogo Normas Chilenas Vigentes 2013 [11]

Para el objetivo de esta memoria, la norma aplicable es la ‘’**Nch 2903/1.Of2004 ‘’Energía fotovoltaica – Dispositivos fotovoltaicos - Parte 1:**

Medición de las características corriente-tensión fotovoltaicas'', cuyos aspectos relevantes aplicables a esta memoria se resumen a continuación:

- El campo de aplicación de la norma es de dispositivos de silicio cristalino, para una celda, subconjunto de celdas o módulo.
- Se describe, como requisito, un dispositivo de referencia, de la misma respuesta espectral que el panel, es decir, un piranómetro de silicio.
- Cuando las mediciones se destinan a servir de referencia para condiciones de ensayo normalizadas, la irradiancia debe ser por lo menos de 800 W/m^2.
- Se debe instalar el piranómetro lo más cerca posible del panel y coplanar con este. Los dos deben estar normales al haz de sol directo dentro de ±10º.
- Se deben corregir las características corriente-tensión medida para las condiciones de irradiancia y temperatura deseadas de acuerdo con IEC 60891 (este procedimiento se explica en la sección 3.1.2).

3.1 Condiciones de referencia

Dado que la curva característica del módulo fotovoltaico cambia con las condiciones ambientales, es necesario definir una serie de condiciones de operación para poder contrastar los valores de distintos fabricantes y extrapolar a partir de ellas a otras condiciones deseadas.

3.1.1 Condiciones estándar de medida (CEM o STC)

Son en las de uso más generalizado y universal, y vienen definidas por:

Irradiancia = 1000W/m^2

Distribución espectral = AM 1.5G

Incidencia = Normal

Temperatura de la célula = 25ºC

Normalmente los parámetros característicos de los módulos o células incluidos en las hojas de especificaciones técnicas de los fabricantes vienen definidos en estas condiciones. Sin embargo la experiencia muestra que pocas veces los módulos fotovoltaicos alcanzan estas condiciones, ya que un nivel de irradiancia de 1000W/m^2 que puede alcanzarse al mediodía, los módulos adquieren temperaturas de más de 25ºC, a no ser que sea un día claro de invierno.

3.1.2 Extrapolación a condiciones estándar de medida (CEM)

El método consiste en corregir los valores de I_{sc} y V_{oc} a los niveles de irradiancia y temperatura de la célula deseados, y posteriormente trasladar toda la curva I-V hasta la I_{sc} y V_{oc} corregidas. Los valores de I_{sc} y V_{oc} en las condiciones deseadas se obtienen según las ecuaciones:

$$I_{sc,2} = I_{sc,1}\frac{E_2}{E_1} + \alpha\,(T_2 - T_1) \tag{5}$$

$$V_{oc,2} = V_{oc,1} + m * \frac{kT}{e} * Ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right) + \beta(T_2 - T_1) \tag{6}$$

donde $I_{sc,1}$, $V_{oc,1}$, T_1 y E_1 son la corriente de cortocircuito, voltaje de circuito abierto, temperatura e irradiancia respectivamente en las condiciones experimentales, $I_{sc,2}$, $V_{oc,2}$, T_2 y E_2 son estos mismos parámetros en las condiciones a las que se desea corregir la curva; m es el factor de idealidad del diodo; α y β son los coeficientes de temperatura mencionados anteriormente.

k es la constante de Bolztman ($1.38\cdot 10^{-23}$J/K) , e la carga del electrón ($1.602\cdot 10^{-19}$ C) y T es T_1 en Kelvin.

Una vez corregidos los valores de I_{sc} y V_{oc} cada punto de la curva I-V se traslada la cantidad necesaria hasta alcanzar los valores corregidos de I_{sc} y V_{oc}, es decir:

$$I_2 = I_1 + \Delta I_{sc} \tag{7}$$

$$V_2 = V_1 + \Delta V_{oc} \tag{8}$$

$$\Delta I_{sc} = I_{sc,2} - I_{sc,1} \tag{9}$$

$$\Delta V_{oc} = V_{oc,2} - V_{oc,1} \tag{10}$$

El valor de m se puede fijar entre 1 y 1.2 que es un valor típico para células de silicio cristalino.

Las condiciones estándar de medida vienen definidas por los siguientes valores de irradiancia y temperatura:

E_2=1000 W/m2

T_2=25ºC

4 Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica

4.1 Descripción del laboratorio

El Laboratorio de Paneles Fotovoltaicos del ramo de Laboratorio de Procesos Energéticos se ha venido desarrollado en el Laboratorio de Evaluación Solar en la Casa Central de UTFSM. Como se mencionó anteriormente, este espacio no es el ideal para realizar la experiencia debido a que no se encuentran las condiciones de espacio y de seguridad. El proyecto de Laboratorio de Energías Renovables, ubicado en la Sede José Miguel Carrera, además incluye otros ensayos de energía renovables también estudiadas en el ramo de Laboratorio de Procesos Energéticos, con lo que se podrán realizar varias experiencias simultáneamente.

4.2 Descripción del ensayo y teoría

El objetivo general de la experiencia en el laboratorio de paneles fotovoltaicos está la obtención del rendimiento de los paneles disponibles. Para ello es necesario obtener también la curva de corriente v/s voltaje del panel (I-V) denominada curva característica. A través de esta curva es posible obtener importantes informaciones sobre las características eléctricas del generador fotovoltaico como la corriente de corto circuito (I_{sc}), el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y el punto de máxima potencia (P_M).

Corriente de corto circuito (I_{sc}): Se trata de la intensidad máxima que proporciona el panel bajo condiciones normalizadas. Para una celda ideal, corresponde a la corriente total producida en la celda mediante irradiación solar, es decir, cuando la celda recibe mayor excitación de fotones en su estructura interna.

La corriente eléctrica de corto circuito aumenta ligeramente con la temperatura, para módulos de silicio cristalino.

Voltaje en circuito abierto (V_{oc}): Se trata del voltaje máximo que proporciona la célula y se podría sin permitir que circule corriente alguna por el panel.

Punto de máxima potencia (P_M): Decimos que un panel trabaja en condiciones de máxima potencia cuando la resistencia del circuito externo es tal que determina uno valores de intensidad máxima y potencia máxima tales que su producto es máximo. [12]

En la figura 4.1, como ejemplo, se presenta una curva I-V y la curva P-V, en donde están indicados los parámetros anteriores.

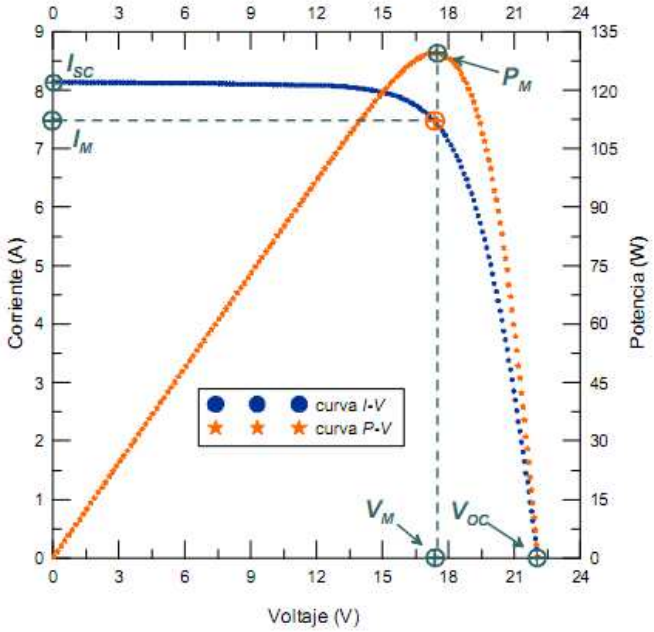


Fig. 4.1 Curva característica (I-V) y curva de voltaje v/s potencia (P-V) de un módulo de silicio monocristalino con 130 W de potencia.

Para medir la curva característica de un módulo fotovoltaico es necesario usar una carga eléctrica. Para módulos de alta potencia se utilizan capacitores o transistores de potencia. Para módulos y arreglos fotovoltaicos pequeños, se usa una resistencia

variable o reóstato, como es en este caso. La corriente nominal de la resistencia debe ser mayor que la corriente de corto circuito (I_{sc}) del módulo fotovoltaico.

La figura 4.2 muestra las líneas de carga para diferentes valores de resistencia. Se observa como la línea de carga sigue la relación lineal de la Ley de Ohm: R = V/I.

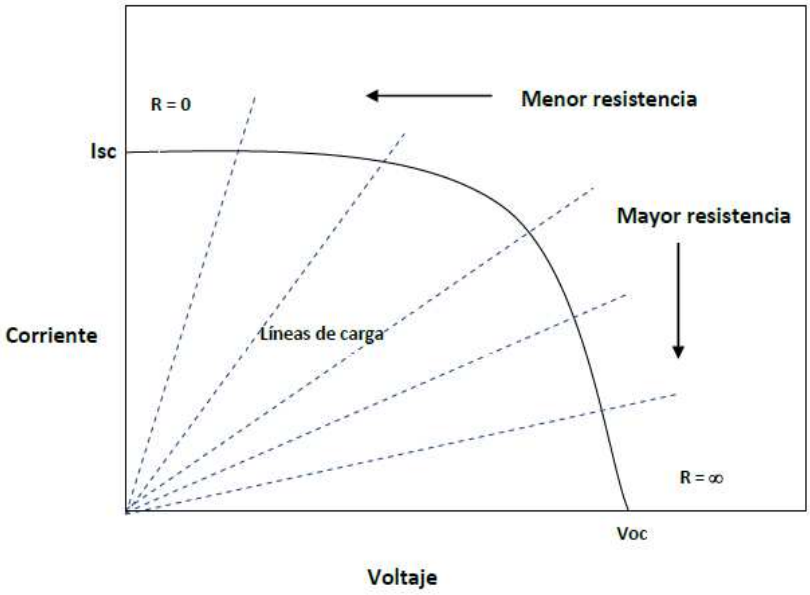


Fig. 4.2 Curva corriente V/S voltaje.

De acuerdo a la Nch 2903/1, Estos parámetros deben ser medidos en las 'Condiciones Estándar de Medida' (CEM), estas condiciones son imposibles de conseguir en el entorno a desarrollar la experiencia, por lo que, como se explica posteriormente, se realiza una extrapolación a las condiciones estándar. Con esta extrapolación se consigue el punto de máxima potencia llamada 'Potencia máxima corregida' o potencia pico. Conociendo también el área total del módulo, podemos obtener la eficiencia del módulo en las condiciones estándar de medida.

$$Eficiencia\ pico = \frac{Potencia\ máxima}{G_{CEM} * Área\ del\ módulo} * 100 \qquad (11)$$

A continuación se describe a instrumentación y software para la obtención de los parámetros anteriores.

4.3 Equipos y Software

Antes de dar a conocer la instrumentación requerida, es necesario conocer datos importantes utilizados para su selección, además del circuito para realizar la experiencia.

- **Variables a medir:** Las variables que se requieren medir para la construcción de las curva I-V y P-V y para la obtención del rendimiento de los paneles fotovoltaicos son las siguientes.

  Corriente

  Voltaje

  Temperatura

  Radiación

- **Parámetros a considerar para selección de instrumentos:** El equipo didáctico y sistema de medición para ensayo de paneles fotovoltaicos es un sistema estándar, que permite ser utilizado para la medición de un amplio rango de paneles solares, por lo que se ha escogido una muestra de 30 paneles disponibles en el mercado nacional, dentro de un rango de potencia de 20 a 300 W.

Tabla 4.1 Parámetros máximos paneles solares fotovoltaicos.

	Marca	Tipo	Potencia [W]	Voc [V]	Isc [A]
Mayor Potencia	LG	Monocristalino	300	39,3	9,91
Mayor Voc	Panasonic	Monocristalino	235	51,8	5,84
Mayor Isc	LG	Monocristalino	300	39,3	9,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2 Parámetros mínimos paneles solares fotovoltaicos.

	Marca	Tipo	Potencia [W]	Voc [V]	Isc [A]
Menor Potencia	IMO Solar	Monocristalino	20	21,5	1,24
Menor Voc	Kyocera	Policristalino	140	20,1	7,03
Menor Isc	IMO Solar	Monocristalino	20	21,5	1,24

Fuente: Elaboración propia.

- **Conexiones para la experiencia:** La figura 4.3 muestra el circuito del panel solar y los respectivos instrumentos.

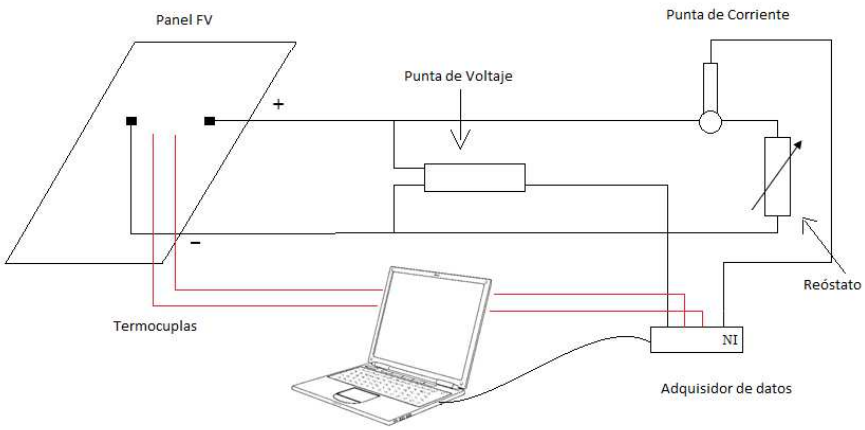


Fig. 4.3 Circuito de panel solar e instrumentos para realizar ensayo.

Este circuito incluye el piranómetro de silicio, el cual debe estar posicionado coplanar al panel solar.

A continuación se dan a conocer el equipo y software requeridos.

Software LabVIEW:

LabVIEW es un programa creado por National Instrument para adquisición de datos, control de instrumentos, análisis de mediciones y presentaciones de datos, que tiene un lenguaje de programación gráfico.

Este programa permite mostrar en pantalla las variables a medir en el mismo instante (corriente, voltaje, temperatura y radiación) y realizar los gráficos I-V y P-V.

La versión disponible en el Laboratorio de Energías Renovables, es el LabVIEW 2012, el cual es completamente compatible con el adquisidor de datos a utilizar, descrito posteriormente.

En la tabla 4.4 se muestran los requerimientos del sistema operativo Windows para el uso de LabVIEW:

Tabla 4.3 Requerimiento de Windows para Labview

	Run-Time Engine	Entorno de Desarrollo
Procesador	Pentium III/Celeron 866 MHz o equivalente	Pentium 4/M o equivalente
RAM	256 MB	1 GB
Resolución de Pantalla	1024 x 768 píxeles	1024 x 768 píxeles
Sistema Operativo	Windows 8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)	Windows 8/7/Vista (32 bits y 64 bits) Windows XP SP3 (32 bits) Windows Server 2003 R2 (32 bits) Windows Server 2008 R2 (64 bits)
Espacio en Disco	353 MB	3.67 GB (Incluye controladores predeterminados del DVD de Controladores de Dispositivos de NI)

Fuente: http://www.ni.com/labview/esa/requirements [13]

Adquisidor de datos:

La adquisición de datos consiste en la toma de muestras analógicas para mostrarlas y manipularlas a través de un software en un computador. Los adquisidores de datos son dispositivos de alto costo, por lo que es conveniente trabajar con los disponibles en el Laboratorio de Energía Renovable, los cuales son:

Tabla 4.4 Adquisidor de datos NI 9211.

Marca	National Instrument
Modelo	NI 9211
Cantidad	3
Resolución	24 bits
Rango de voltaje	±80 mV
Número de canales	4 entradas analógicas

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.5 Adquisidor de datos NI USB-6009

Marca	National Instrument
Modelo	NI USB-6009
Cantidad	1
Resolución	14 bits
Rango de voltaje	± 10 V
Número de canales	8 entradas analógicas

Fuente: Elaboración propia

Ambos modelos son de la marca National Instrument, creadores del software LabVIEW, por tanto son completamente compatibles.

El modelo NI 9211 tiene muy buena resolución de medición, pero admite un rango de voltaje demasiado pequeño, muy por debajo de lo necesario. El modelo NI USB-6009 (figura 4.4) tiene una resolución bastante menor, pero admite un rango de voltaje adecuado, según se explica más adelante, con la selección de las puntas de voltaje y de corriente.

Fig. 4.4 Adquisidor de datos NI USB-6009

A continuación se describen las puntas de corriente y voltaje, dispositivos utilizados en reemplazo de los multitester usados en años anteriores. El uso de multitester no permite el uso o conexión de programas como LabVIEW, que, como mencionamos anteriormente permite realizar y mostrar los parámetros medidos y, a su vez, realizar las tablas y gráficos pertinentes.

Las puntas de corriente y voltaje permiten la medición de dichos parámetros, manteniendo computador y adquisidor seguros de cualquier sobrevoltaje proveniente del panel fotovoltaico, debido a que permiten seleccionar la escala en la cual la señal de salida llegará al adquisidor.

La selección de estos instrumentos se realizó mediante consulta a la empresa AVANTEC, que cuenta con 23 años de comercialización de instrumentación y sistema de medida en las áreas de electricidad, electrónica y comunicaciones.

Punta de voltaje:

Una punta de prueba permite realizar una conexión física entre una fuente de señal y un instrumento de medición electrónico. Es óptimo el uso de este instrumento a plena escala, pues de lo contrario se pierde resolución en su medición.

Si bien el rango de voltaje qua abarca el espectro de paneles estudiados en el mercado nacional es de 0 a 52 volt, se toma como voltaje máximo 60 volt.

En el mercado nacional no existe gran oferta de estos instrumentos, en la tabla 4.7 se muestran algunos ejemplos de ellos y los respectivos rangos disponibles en el mercado internacional.

En la última columna se aprecia el voltaje que el instrumento entregaría para 60 Volt de entrada.

Tabla 4.6 Muestra de puntas de voltaje y sus rangos en el mercado internacional

Nombre Producto	Rango		Para 60 V
Differential Probe DP30-HS	X1	≤6,5V	
	X2	≤13V	
	X10	≤65V	6 V
High-Voltage Differential Probe TMDP 5202A	X20	± 64 V	3 V
	X200	± 640 V	
Differential Probe DP40-LV	X10	≤65V	6 V
	X20	≤130V	
	X100	≤650V	
High-Voltage Differential Probe TMDP 0200	x25	± 75 V	2,4 V
	x250	± 750 V	
High-Voltage Differential Probe TMDP 5200A	X50	± 130 V	
	X500	± 1300 V	
High-Voltage Differential Probe TMDP 0200	X50	± 150 V	
	X500	± 1500 V	
Passive 1X/10X Voltage Probe	X1	150V máx	
	X10	300V máx	
Differential Probe DP35	X10	≤160V	
	X100	≤1600V	
Differential Probe DP35	X100	≤650V	
	X200	≤300V	
	X500	≤3250V	
	X1000	≤6500V	
High-Voltage Differential Probe TMDP 0200	X100	± 600 V	
	X1000	± 6000 V	

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la oferta de AVANTEC, se encuentra la punta de voltaje N2862B (figura 4.5), la cual es una punta pasiva que tiene una única atenuación por 10, es decir, para los 60 V máximos establecidos para esta selección, el voltaje suministrado a la salida es de 6 V. Ésta es la recomendada por dicha empresa:

Fig. 4.5 Punta de Voltaje N2862B

Tabla 4.7 Especificaciones técnicas de punta de voltaje N2862B

Probe characteristics	N2862B
Bandwidth (-3 dB)	150 MHz
Rise time (10% - 90%)	2.33 nsec
Attenuation ratio	10:1
Input resistance (when terminated into 1 MΩ)	10 MΩ
Maximum input voltage	300 V RMS (or >400Vpk) CAT I and CAT II
Scope compensation range	5-30 pF
Probe ID	Yes
Cable length	1.2 m
Safety	
Operating Temperature	
Storage Temperature	

Fuente: Data sheet N2862B/N2863B/N2889A/N2890A Passive Probes. [14]

Punta de corriente:

La señal de entrega de esta punta de prueba es voltaje y, al igual que la punta de corriente, es óptimo usarlo a plena escala. Se considera voltaje máximo a medir, 10 A.

En la tabla 4.9 se muestran algunos ejemplos de puntas de corriente y los respectivos rangos disponibles en el mercado internacional.

Tabla 4.8 Muestra de puntas de corriente y sus rangos en el mercado internacional

Nombre Producto	Rango		Para 10 A
Current Probe A621	1 mV/A	2000 A peak	
	10 mV/A		
	100 mV/A		
Current Probe A622	10 mV/A	100 A peak	
	100 mV/A		
	1 mV/A	1A - 1000 A	0,01 V
	10 mV/A	100 mA - 100 A	
	100 mV/A	100 mA - 10 A	
Current Probe PT-701	10 mV/A	1A - 100 A peak	0,1 V
	100 mV/A	50 mA - 10 A peak	1 V
Current Probe PT-701A	10 mV/A	400 mA - 40 A peak	
	100 mV/A	50 mA - 10 A peak	1 V
Current Probe PT-710B	20 mV/A	300 mA - 20 A peak	
	200 mV/A	30 mA - 5 A peak	
Current Probe PT-710C	50 mV/A	200 mA - 100 A peak	
	500 mV/A	20 mA - 14 A peak	5 V
Current Probe PT-710D	0,1 V/A	100 mA - 80 A	
	1 V/A	10 mA - 8 A	

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de la oferta de AVANTEC, se encuentran dos modelos recomendados por la empresa, descritos en la figura 4.10:

Tabla 4.9 Especificaciones técnicas puntas de corriente.

Serie	Modelo	Relación	Escala de Medida		Señal de Salida		Tamaño Máximo de Conductor		Conección de Salida	Núm. Catálogo
			CA	CC	Corriente	Voltaje	Ø Cable	Barra Bus		
	SL201	–	50mA a 1.5A 500mA a 120A	50mA a 2A 500mA a 150A	–	1mV/mACA/CC 1mV/ACA/CC	0.46" (11.8mm)	N/A	Cable	1201.40
	SL206	–	10mA a 1.5A 50mA a 60A	10mA a 2A 50mA a 80A	–	1mV/mACA/CC 10mV/ACA/CC			Cable	1201.45
	SL261	–	100mA a 10A pk 1A a 100A pk	100mA a 10A 1A a 100A	–	100mV/ACA/CC 10mV/ACA/CC	0.46" (11.8mm)	N/A	Lead w/BNC	1201.51

Fuente: http://www.aemc.com/products/Spanish%20PDFs/2110.71-SP.pdf [15]

Sus rangos y escalas están descritos en la tabla 4.11.

Tabla 4.10 Rangos de escalas de puntas de corrientes propuestas por AVANTEC

Modelo	Escalas		Para 10 A
SL 206	1 mV/mA	10 mA - 2 A	
	10 mV/A	50 mA - 80 A	0,1 V
SL 261	100 mV/A	100 mA -10 A	1 V
	10 mV/A	1 A - 100 A	0,1 V

Fuente: Elaboración propia.

Dentro de ambos equipos se escoge el modelo SL 261, pues ambas escalas de dicho modelo se acomodan al rango de corriente que se quiere medir.

Reóstato:

El reóstato es un instrumento que regula la intensidad de corriente a través de la carga. La variación se consigue mediante un patín móvil que se desliza a lo largo de una bobina de alambre.

Se selecciona mediante dos valores: resistencia y potencia o voltaje, valores que deben ser adecuados para soportar la corriente que va a circular por él.

La corriente máxima que debe soportar el reóstato es de 10A, la cual se presenta en un panel de aproximadamente 300 W, por tanto

$$P = I^2 * R$$

$$\frac{P}{R} = 10^2$$

$$\frac{P}{R} = 100$$

Luego,

$$V = I * R$$

$$30 = 10 * R$$

$$R = 3\Omega$$

Se selecciona el reóstato de la marca Ohmite (figura 4.6), que tiene los parámetros 5 Ω y 500 W, disponible en RS Componentes, empresa con 75 años de trayectoria en electrónica, mantenimiento industrial, electricidad, automatización y control.

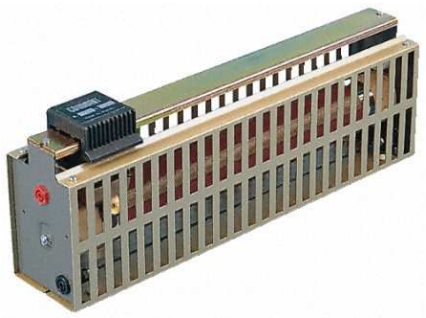


Fig. 4.6 Reóstato Ohmite

Piranómetro:

Un piranómetro es un instrumento metereológico para medir la irradiancia. En este caso se usa un piranómetro de silicio, pues de acuerdo a la Nch 2903, el dispoitivo de referencia debe tener la misma respuesta espectral que el panel solar.

Puesto que el piranómetro es un instrumento independiente del circuito, su selección no depende de los parámetros mencionados. El piranómetro de silicio disponible en el Laboratorio de Energías Renovables es de la marca Kipp & Zonen, modelo SP Lite, con sensibilidad igual a 77 $\mu V/Wm^{-2}$.

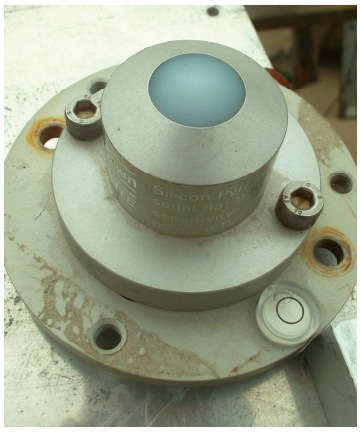


Fig. 4.7 Piranómetro se silicio disponible en Laboratorio de Energías Renovables

Termocuplas:

Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Una termocupla se fabrica con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño del orden de los milivolts el cual aumenta con la temperatura.

Se selecciona la termocupla de tipo K pues tiene el rango de tempraturas más apropiado para este ensayo (-180°C – 750°C). Esta termocupla está conformada por un alamabre de hierro y uno de una aleación de cobre y níquel.

Esta se encuentra disponible en el Laboratorio de Energías Renovables.

Módulos Fotovoltaicos:

Como se ha comentado anteriormente, el equipo didáctico y el sistema de medición están diseñados para la evaluación de cualquier panel solar fotovoltaico cuya potencia alcance como máximo los 300 Wp.

En esta sección se describen los paneles disponibles en el Laboratorio de Energías Renovables, con los cuales se realizan las experiencias descritas más adelante.

En la figuras 4.8 y 4.9 se muestran los paneles disponibles en el LER y en las tablas 4.12 y 4.13 se muestran sus respectivas características.

- **Panel monocristalino Siemens**

Fig. 4.8 Panel fotovoltaico monocristalino Siemens 100 Wp.

Tabla 4.11 Datos panel fotovoltaico monocristalino Siemens 100Wp

Cantidad	2
Potencia Máxima	100 Wp
Tamaño [mm]	1380 x 716
Nro. de celdas	72
Tamaño de celdas [mm]	100 x 100

Fuente: Elaboración propia.

- **Panel Amorfo Siemens**

Fig. 4.9 Panel fotovoltaico amorfo Siemens 20 Wp

Tabla 4.12 Datos panel fotovoltaico amorfo 20 Wp

Cantidad	2
Potencia Máxima	20 Wp
Tensión circuito abierto	23 (V)
Corriente circuito abierto	1,9 (A)
Voltaje máximo	50 (V)
Tamaño [mm]	1315 x 364

Fuente: Elaboración propia.

4.4 Estructura de soporte

Una parte importante del diseño del equipo didáctico es la estructura de soporte de los paneles. Ella asegura que los paneles puedan colocarse con el ángulo de inclinación correcto en dirección al sol y brinden seguridad a la instalación. El conjunto constituido por la estructura de soporte y los paneles deberá ser resistente a la corrosión.

En el caso de esta memoria, la estructura metálica es diseñada en acero inoxidable AISI 304, debido a que tiene buena características para la soldadura y, muy importante, tiene excelente resistencia a la corrosión, tomando en cuenta que la estructura estará en la intemperie tiempo completo. [16]

Sus propiedades mecánicas son:

Resistencia a la fluencia = 310 MPa (45 KSI)

Resistencia máxima = 620 MPa (90 KSI)

Módulo de elasticidad = 200 GPa (29000 KSI)

La estructura está diseñada para instalar 4 paneles que sumen máximo 80 Kg. en total. Los disponibles en este momento en el laboratorio son 2 amorfos y 2 policristalinos.

En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran distintas vistas de la estructura metálica propuesta.

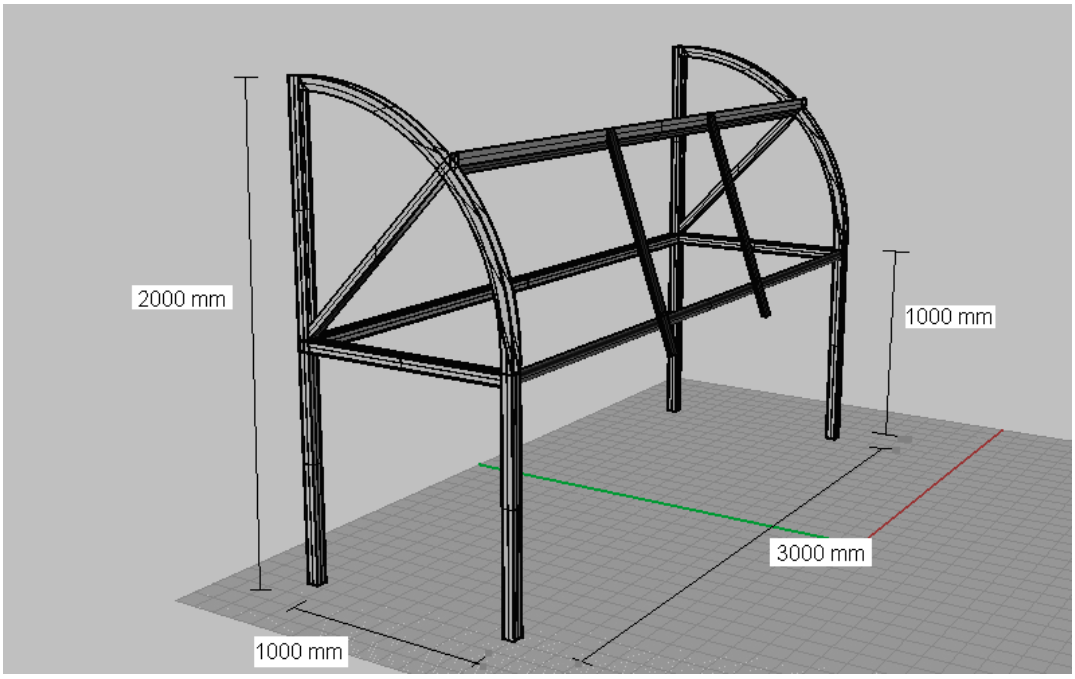


Fig. 4.10 Vista en perspectiva estructura de soporte.

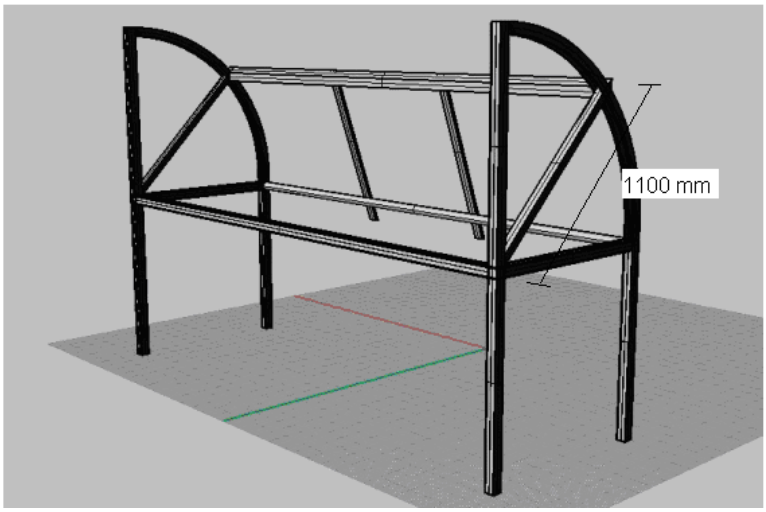


Fig. 4.11 Vista elevación lateral de estructura de soporte.

La estructura tiene dos posiciones, como vimos en la sección 2.5, el ángulo más apropiado para el invierno es de 30º y el más apropiado para el verano, para nuestra latitud, es de 43º.

El perfil utilizado es justificado porque las secciones huecas son más económicas que las secciones macizas. Éstas son más eficientes, pues la mayor parte de su área transversal está lo más alejada posible de los ejes centroidales, así aumenta su momento de inercia.

Las dimensiones de los perfiles son extraídas de tablas de un catálogo técnico de CINTAC, proveedores nacionales de estructuras de acero para construcción.

Las justificaciones que se consideraron más importantes son las siguientes

a) Flexión en viga cuadrada y en viga circular

b) Análisis de pandeo en patas de estructura

c) Esfuerzos cortantes en pasadores

d) Brazos posteriores

e) Esfuerzo cortante en pernos sujeción paneles-rieles

Dichas justificaciones se encuentran en el Anexo E.

4.5 Procedimientos

A considerar según la Nch2903/1 Of2004.

- El modulo de referencia o piranómetro debe ser de silicio, pues debe tener la misma respuesta espectral que los paneles solares.

- La irradiancia debe ser por lo menos de 800 W/m^2.

- Se debe instalar el piranómetro lo más cerca posible del panel y coplanar con este. Los dos deben estar normales al haz de sol directo dentro de ±10º.

Pasos:

1. Reconocer estructura cristalina del panel fotovoltaico y medir el área de cada celda. Multiplicar por el número de celdas para obtener el área total.

2. Reconocer instrumentación:

   - Punta de voltaje
   - Punta de corriente
   - Piranómetro
   - Termocuplas
   - Adquisidor de datos
   - Reóstato

3. Realizar conexiones como se muestra en la figura 4.3. A continuación se muestran las conexiones en adquisidor de datos. Conectar adquisidor al puerto USB del computador.

Fig. 4.12 Adquisidor de datos NI USB-6009 disponible en LER.

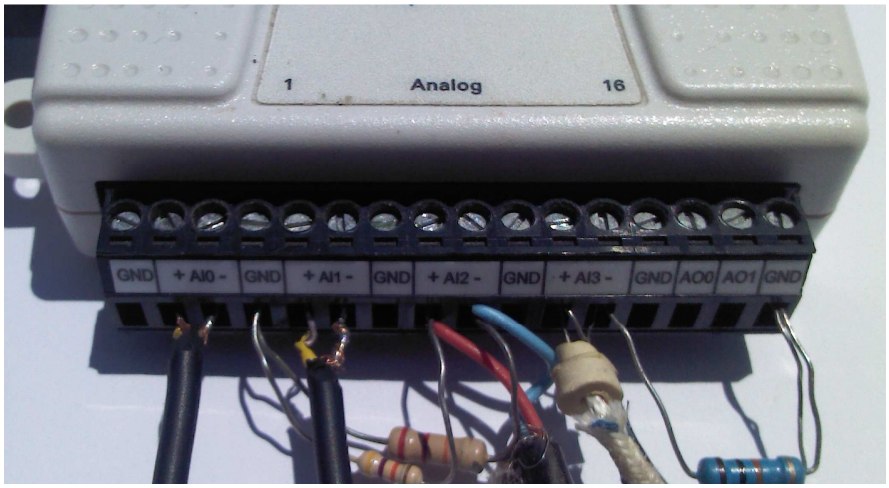


Fig. 4.13 Entradas analógicas del adquisidor de datos

En la tabla 4.14 se muestra qué instrumento se conecta a cada entrada analógica.

Tabla 4.13 Conexiones de instrumentos en adquisidor de datos

Entrada	Instrumento
Entrada +AI0-	Punta de Voltaje
Entrada +AI1-	Punta de corriente
Entrada +AI2-	Piranómetro
Entrada +AI3+	Termocupla

Fuente: Elaboración propia.

4. Comprobar que existe una radiación de, al menos, 800 W/m^2 con el piranómetro coplanar al panel fotovoltaico.

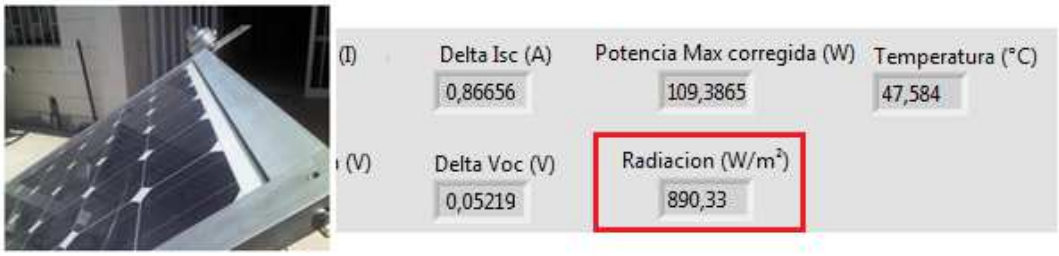
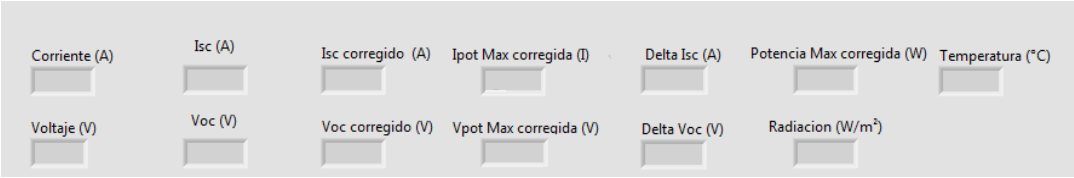


Fig. 4.14 Piranómetro coplanar a panel fotovoltaico y radiación medida.

5. Identificar los siguientes parámetros en Labview.



Corriente (A): Corriente medida por la punta de corriente.

Voltaje (V): Voltaje medido por la punta de voltaje.

I_{sc} (A): Corriente de cortocircuito medida con reóstato en posición 100% circuito abierto.

V_{oc} (V): Voltaje de circuito abierto medida con reóstato en posición 0% circuito abierto.

I_{sc} corregido y V_{oc} corregido: I_{sc} y V_{oc} luego de extrapolación (ecuaciones (5) y (6))

Delta I_{sc} y Delta V_{oc}: Diferencia entre valores de I_{sc} y V_{oc} corregidos y medidos, según ecuaciones (9) y (10).

Ipot Max corregida y Vpot Max corregida: Corresponden a valores de corriente y voltajes en que, luego del ensayo, la potencia resultó máxima, pero aplicadas las ecuaciones (7) y (8).

Potencia Max corregida (W): Corresponde a potencia máxima según valores de voltaje y corriente corregidos luego de extrapolación.

Los alumnos previamente deben conocer el procedimiento de extrapolación a condiciones estándar de medida (CEM) descrita en la sección 3.1.2, puesto que LabView entrega los datos ya calculados.

6. Obtener Isc, posicionando el patín del reóstato en 0 (0% circuito abierto) y registrar datos de corriente y voltaje en primeras casillas de columnas ‘Corriente’ y ‘Voltaje’, como se muestra en la figura 4.15.

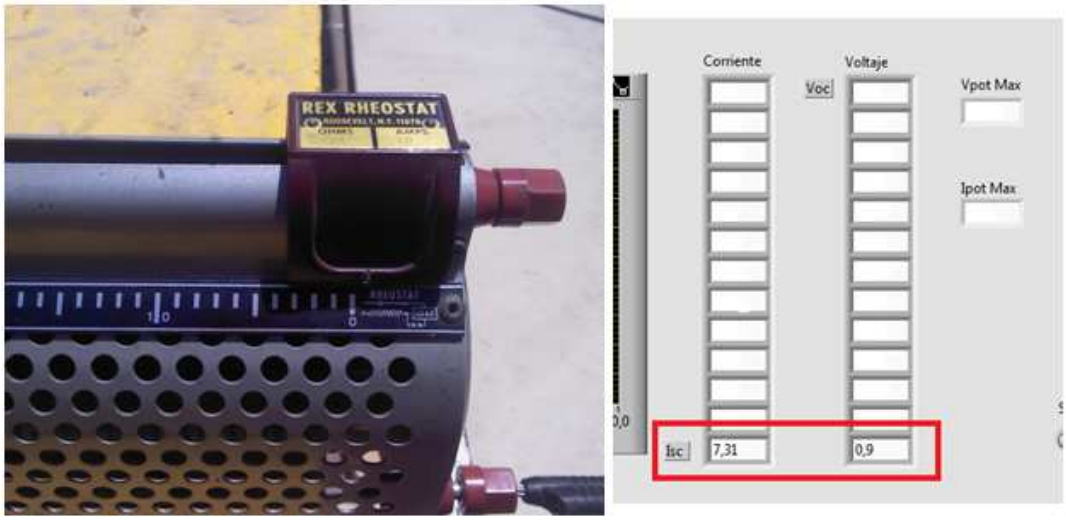


Fig. 4.15 Posición de reóstato y valores medidos en 0% circuito abierto

7. Obtener Voc, posicionando el patín del reóstato en 100 (100% circuito abierto) y registrar datos de corriente y voltaje en últimas casillas de columnas 'Corriente' y 'Voltaje', como se muestra en la figura 4.16.

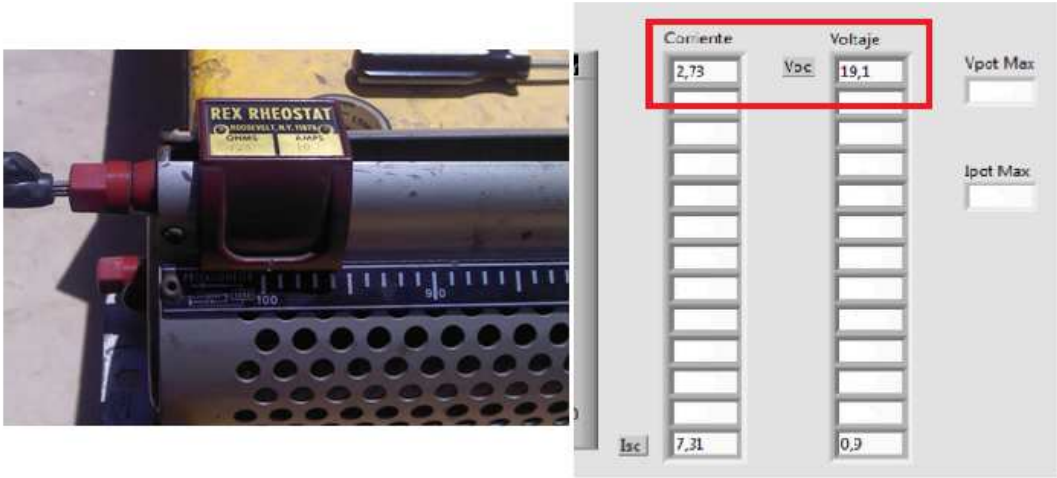


Fig. 4.16 Posición de reóstato y valores medidos en 100% circuito abierto

8. A partir de la posición 100, realizar medición y registro de voltaje y corriente cada 8 divisiones del reóstato, como se muestra en la figura 4.17.

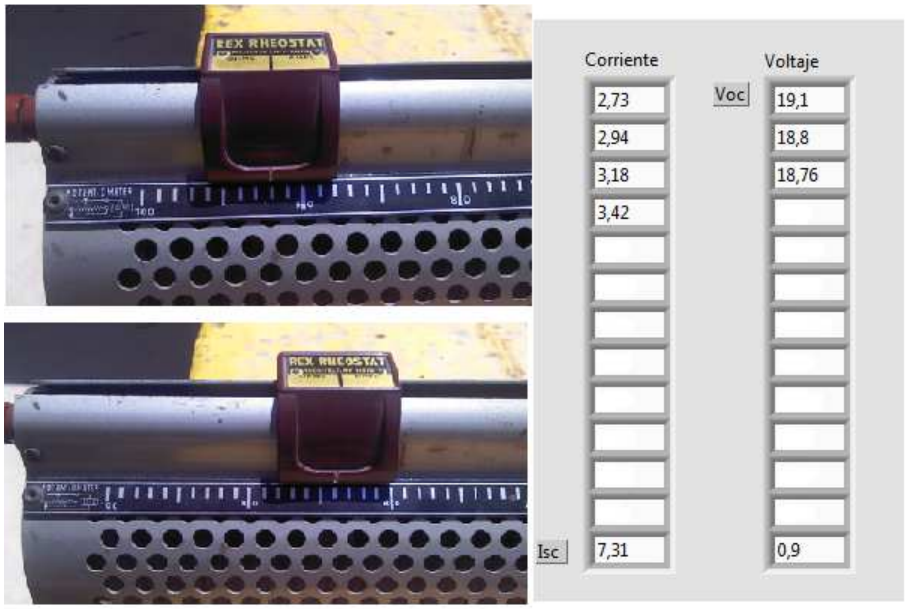


Fig. 4.17 Mediciones variando posición de reóstato

9. Reconocer en 'Gráfico Potencia V/S Voltaje' y en tablas los puntos de voltaje y corriente en que la potencia de la máxima ($V_{pot\ Max}$ y $I_{pot\ Max}$). Transcribir estos datos en casillas 'Vpot Max' e 'Ipot Max'. Automáticamente se obtiene el valor de 'Potencia Maxima Corregida'

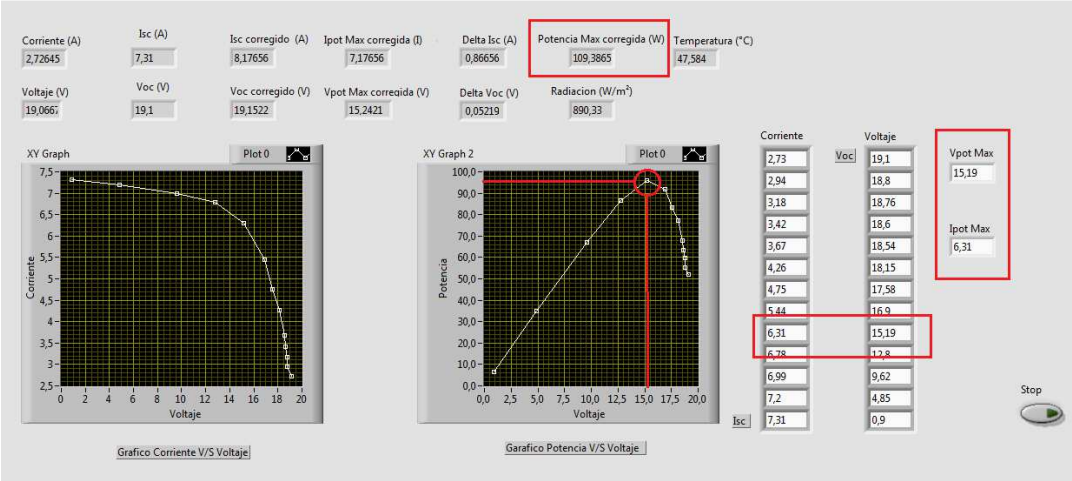


Fig. 4.18 Curvas I-V y P-V, tablas de datos

10. Se obtiene la eficiencia pico del panel rendimiento del panel mediante la siguiente relación (12):

$$Eficiencia\ pico = \frac{Potencia\ máxima\ corregida}{G_{CEM} * Área\ del\ módulo} * 100$$

4.6 Experiencias realizadas

La experiencia realizada se hizo con los siguientes instrumentos:

- Panel solar monocristalino siemens, 100 Wp, disponible en LER, Sede José Miguel Carrera, UTFSM.
- Punta de voltaje AEMC, modelo DP-25, préstamo departamento de electrónica Casa Central, UTFSM.

- Punta de corriente LEM, modelo PR30, préstamo departamento de electrónica Casa Central, UTFSM.
- Piranómetro de silicio Kipp & Zonen, SP Lite, Sensibilidad: 77E-6 V/Wm^{-2}, disponible en LER, sede José Miguel Carrera, UTFSM.
- Reóstato Rex Rehostat, 7,4 Ω, 10 A. préstamo Laboratorio de Termofluídos, Casa Central, UTFM.
- Computador Lenovo X201I, procesador Intel Core, 4 GB memoria RAM.

Fig. 4.19 Equipamiento utilizado en experiencia realizada

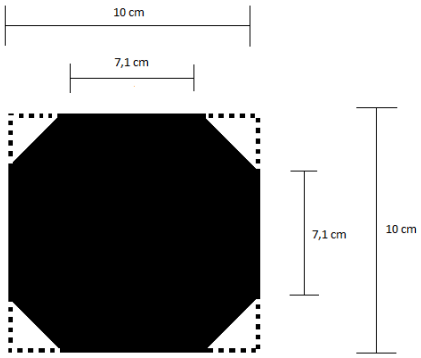
Si bien las puntas de corriente y voltaje no coinciden con las seleccionadas en la sección 4.3, son completamente aplicables al ensayo. En el caso de la punta de corriente ambas poseen la misma escala (100 mV/A) y en el caso de la punta de voltaje utilizada es el doble que la escala de la punta de voltaje seleccionada, pero es el mismo orden de magnitud y adecuada para el voltaje máximo admitido por el adquisidor de datos.

El reóstato utilizado difiere del seleccionado sólo en el valor de resistencia, que es el doble.

La experiencia se realiza según el procedimiento descrito en la sección 4.5.

En primer lugar se mide el área total de las cedas del panel fotovoltaico monocristalino:

$$\text{Área de una celda} = 0{,}01\ m^2 - 4 * 0{,}0004205\ m^2 = 0{,}008318\ m^2$$



$$\text{Área total de las celdas} = 0{,}008318\ m^2 \times 72 \text{ celdas} = 0{,}599\ m^2$$

Luego se instala el piranómetro coplanar al panel y se realizan las conexiones pertinentes de cada instrumento y del adquisidor de datos, como se muestra en las figuras 4.20 y 4.21 :

Fig. 4.20 Conexión de panel solar a reóstato y conexión de punta de voltaje a panel solar.

Fig. 4.21 Conexión punta de corriente a panel solar

Como se describe en la figura 4.3, la punta de voltaje se conecta en paralelo al panel y la punta de corriente, en serie, al conductor de corriente positivo.

Ambas puntas poseen terinal BNC, que es incompatible con las entradas del adquisidor de datos, por lo que se acopló un conector BNC hembra-hembra, BNC MACHO a RCA y un cable RCA, como se muestra en la figura 4.22:

Fig. 4.22 Conexión de puntas de corriente y voltaje para adquisidor de datos.

La termocupla se pega al centro del panel solar (por detrás) con huincha aisladora. Se realiza la conexión a las entradas analógicas del adquisidor de datos como en la figura 4.13.

El día 28 de febrero de 2013 se realiza el ensayo para registrar los datos de cada una hora a lo largo de un día. Los gráficos resultantes se muestran a continuación:

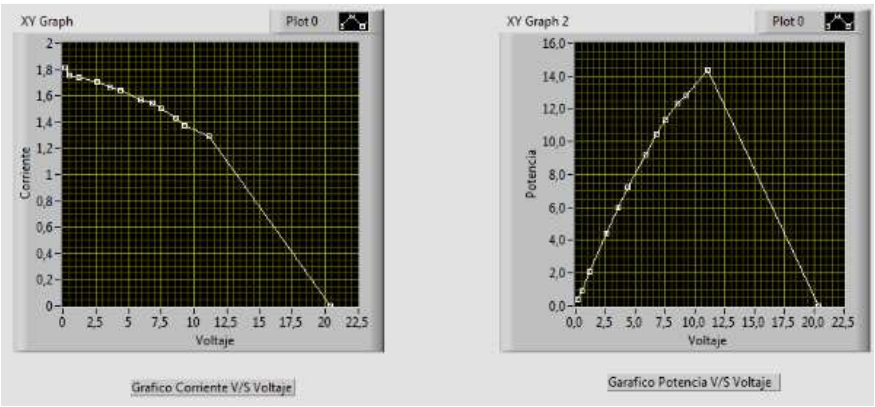


Fig. 4.23 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 10:30.

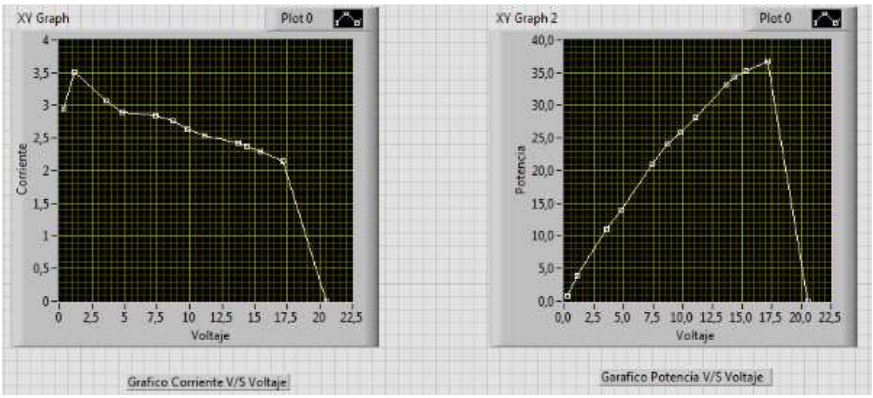


Fig. 4.24 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 12:00.

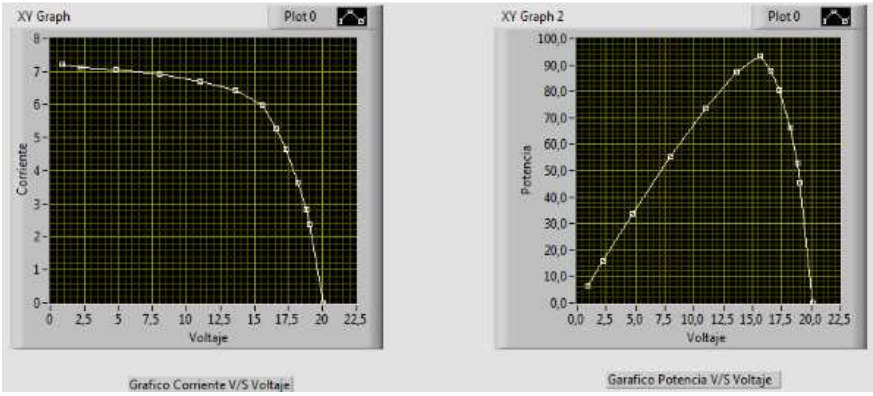


Fig. 4.25 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 13:00.

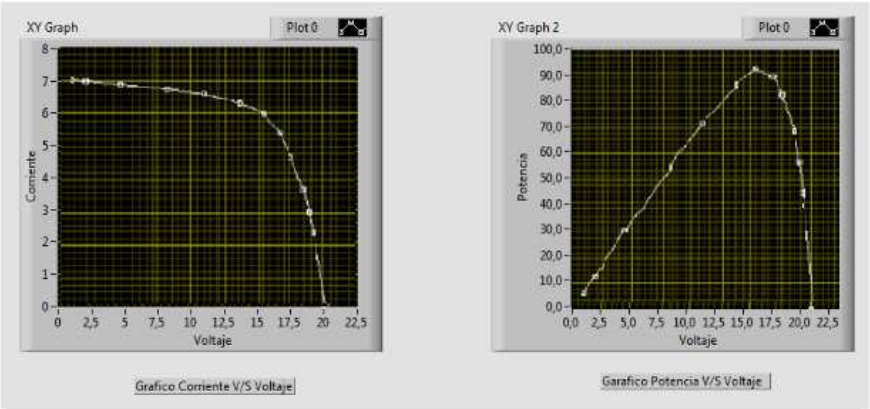


Fig. 4.26 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 14:00.

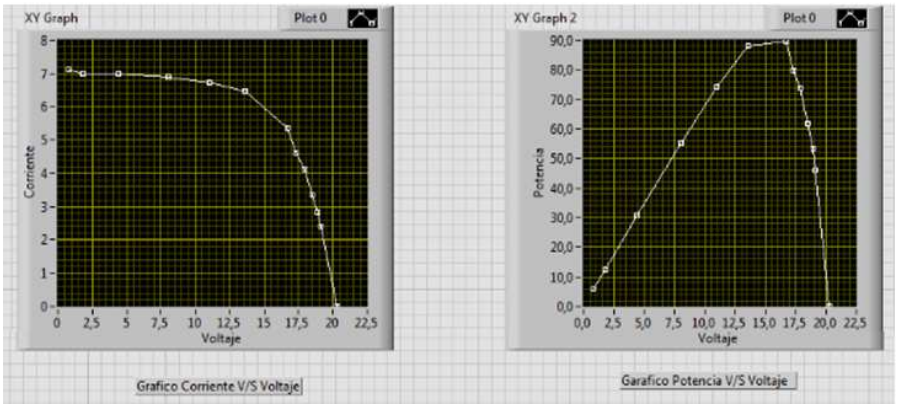


Fig. 4.27 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 15:00.

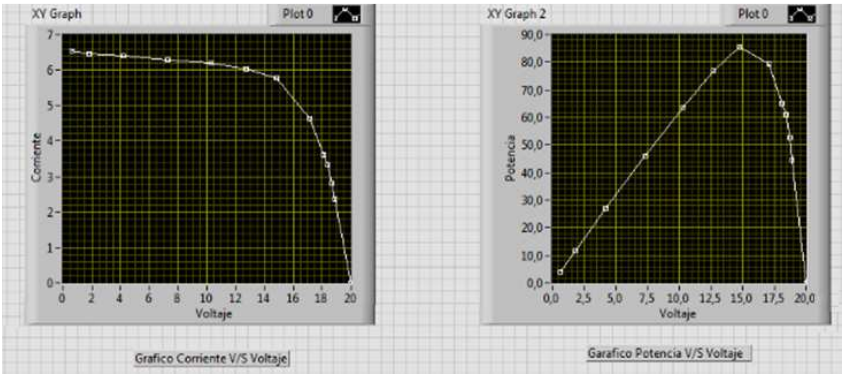


Fig. 4.28 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 16:00.

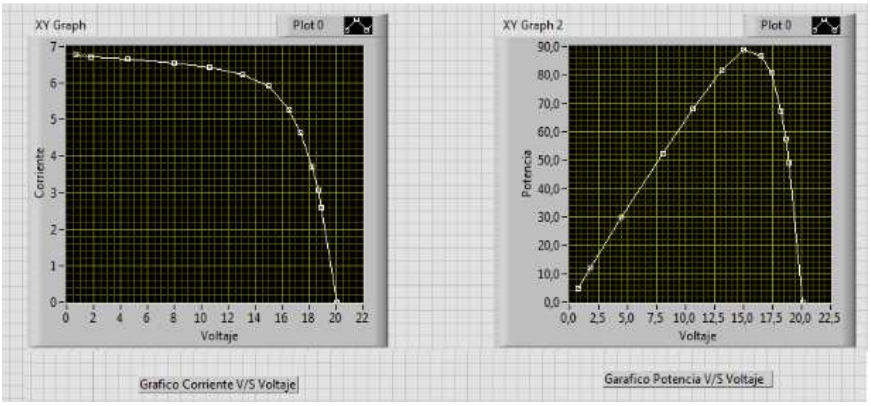


Fig. 4.29 Gráficos correspondientes a datos tomados a las 17:00.

En la tabla 4.15 se presentan los datos registrados en cada medición:

Tabla 4.14 Datos registrados por cada medición.

Hora	Radiacion [W/m²]	Temperatura [°C]	Voc, 1	Voc, 2	Isc, 1	Isc, 2	Pot máx	Pot max corregida [W]	Eficiencia Pico [%]
10:30	212,234	21	20,4	20,950	1,81	8,535	14,40	89,415	14,9273
12:00	530,737	28,4	20,5	20,533	2,95	5,55	36,5	81,4338	13,5950
13:00	1011,2	48,7	20,1	20,154	7,23	7,11	91,9	91,9578	15,3519
14:00	1010	46	20,3	20,348	7,03	6,93	93,5	92,1818	15,3893
15:00	1017,83	46	20,3	20,348	7,12	6,96	89,4	87,1506	14,5493
16:00	950	49	20	20,057	6,55	6,86	84,6	90,6109	15,1270
17:00	941	48,2	20,1	20,156	6,78	7,17	88,9	95,157	15,8860

Los dos primeros ensayos, realizados a las 10:30 y a las 12:00, cuentan con una irradiancia muy por debajo de los 800 W/m^2, por tanto no cumple uno de los requerimientos, según norma, para realizar este ensayo. En este caso es interesante su observación a modo de comparación con el resto de los ensayos que sí cumple con la irradiancia mínima.

Como se observa, ambos ensayos poseen curvas I-V irregulares, las curvas P-V son más uniformes, pero en ambas se observa un salto entre el último valor de voltaje obtenido y el voltaje de $V_{oc,}$ esto debido a que la irradiancia es muy baja, y el panel no puede entregar un voltaje demasiado alto.

A las 13:00 horas el día ya se encuentra despejado y se tiene una radiación superior a los 800 W/m^2, como lo es en el resto de la tarde, por lo que se obtienen, en todos los siguientes ensayos, curvas continuas y similares a una curva teórica de un panel fotovoltaico.

Si bien para el resto de la tarde se obtuvo una radiación superior a los 800W/m^2, aun así fue bastante variable pues las condiciones del tiempo cambiaron constantemente.

En la figura 4.30 se muestra un gráfico realizado con los datos tomados en la experiencia anterior.

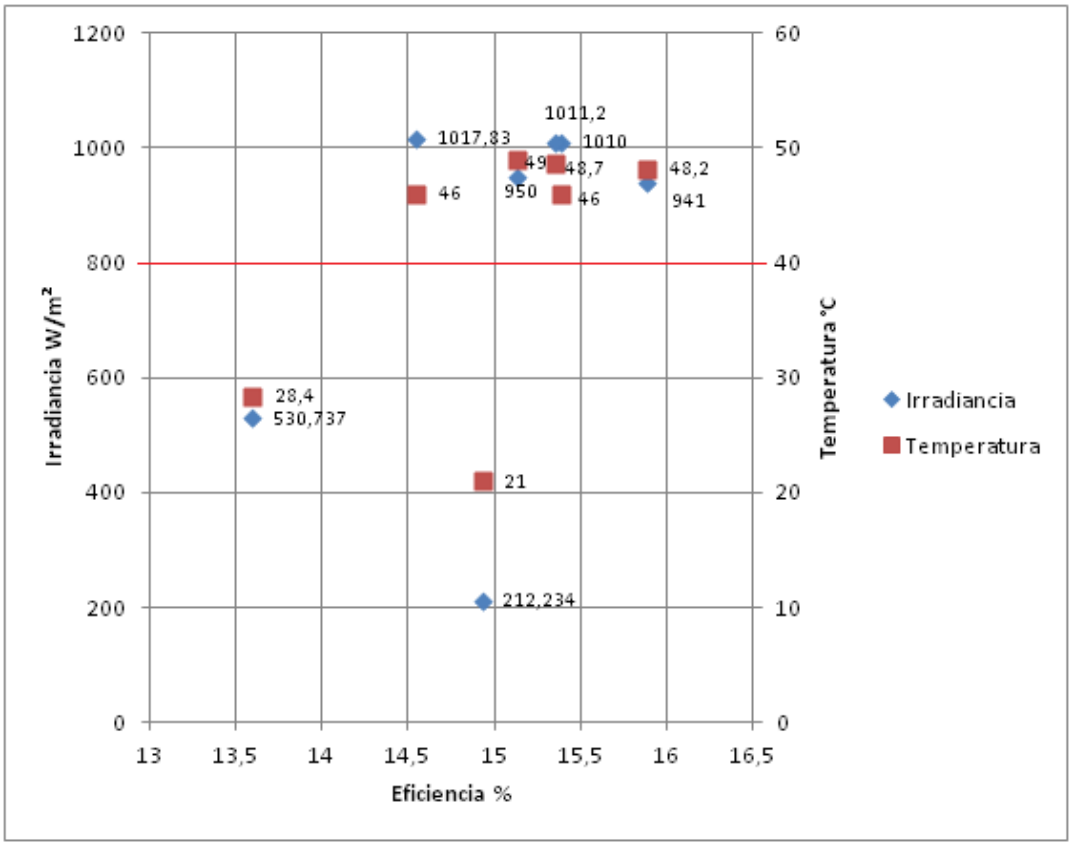


Fig. 4.30 Gráfico Irradiancia - Temperatura - Eficiencia

Se observan los dos en sayos que no cumple con la irradiancia mínima. Los datos de temperatura e irradiancia no muestran una tendencia clara en este ensayo, por lo que no se puede concluir nada de la figura.

En laboratorios, se ha conseguido un rendimiento máximo de los paneles monocristalinos de un 15%. En dichos ensayos se han usado condiciones estándar de temperatura, es decir, 25°C y 1000 W/m^2.

En el ensayo realizado, si bien los resultados obtenidos de potencia máxima corregida son variables, se puede observar que los resultados de eficiencia pico obtenidos se encuentran entre 14,9273% y 15,8860%. Esto quiere decir, que, realizando el ensayo en condiciones experimentales efectivamente nos podemos acercar a un rendimiento realizado en condiciones estándar de medida, mediante el proceso de extrapolación.

CONCLUSIONES

El equipo didáctico y sistema de medición para ensayos de paneles fotovoltaicos propuestos en esta memoria consisten en un sistema cómodo para profesor y alumnos en la experiencia a realizar. Se realiza en base a la Nch 2903/1.Of2004 ‘’Energía fotovoltaica – Dispositivos fotovoltaicos - Parte 1: Medición de las características corriente-tensión fotovoltaicas’’, en la cual se destaca la corrección de características corriente-tensión para las condiciones de irradiancia y temperatura deseadas que, para nuestro caso, son las condiciones estándar de medida.

Con dicho sistema se realiza un ensayo en una jornada de condiciones climáticas bastante variables. La teoría nos indica los siguientes puntos que deberíamos observar en los ensayos realizados:

- Al aumentar la radiación, aumentan los valores de I_{sc} y de potencia máxima.
- A niveles muy bajos de irradiancia, los valores de V_{oc} caen muy bruscamente.
- Al aumentar la temperatura, disminuyen los valores de V_{oc} y de potencia máxima.

En cuanto al ensayo realizado, no es posible observar la relación entre la radiación o temperatura y los parámetros característicos, puesto que éstas relaciones se han concluido en ensayos independientes, en que se analiza, por un lado, los efectos de la radiación, y por otro, los efectos de la temperatura, mientras en el descrito en este trabajo se corrigen los efectos de ambos fenómenos al mismo tiempo, mediante la extrapolación a condiciones estándar de medida. En condiciones experimentales, no es posible manipular los factores de temperatura e irradiancia, por tanto tampoco lo es el estudio por separado del comportamiento de los resultados

variando estos factores. Para poder realizar un estudio como este, es necesario tener el control sobre la temperatura del panel, o sobre la irradiancia.

Por otro lado, los ensayos en que se han concluido estas relaciones teóricas, efectivamente se han realizado en condiciones estándar de medida, que además considera la distribución espectral, la cual, para el objetivo de esta memoria, bajo la Nch2903, no era necesario aplicar su corrección.

Durante la obtención de datos, el valor de irradiacia en las condiciones experimentales se registra al final del registro de los datos, lo cual es un inconveniente puesto que, en un día de condiciones climáticas variables, durante el registro de todos los datos, la irradiancia también varía constantemente. Se propone, por tanto, la continuación en el trabajo realizado en el software LabView, para el registro del promedio de los valores de irradiancia que se presentan durante el ensayo.

El equipo de medición consta de los instrumentos de punta de corriente y de voltaje, los cuales son prácticos y de fácil manipulación para los alumnos, aunque son de alto costo. Éstos se pueden reemplazar por conexiones sofisticadas como los son el divisor de tensión y un shunt de corriente, pero son circuitos que están fuera del alcance de nuestro conocimiento y objetivo. Estos requieren un estudio más profundo de conceptos de electrónica y se requiere mucho cuidado y precisión en su diseño y construcción para no dañar el resto del circuito.

Por otro lado, la aplicación del programa Labview es trascendental, permitiendo transformar señales analógicas a digitales y, además procesar estos datos para poder aplicar la extrapolación a condiciones estándar de medida y permitir visualizar tablas y gráficos sin utilizar herramientas extras.

REFERENCIAS

[1]. PEREDA Soto, Isidro Elvis. Celdas fotovoltaicas en Generación Distribuida. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial Mención Electricidad. Valparaíso. PUCV, Escuela de Ingeniería, 2005. 7 h.

[2]. NICOLÁS González A. Energía fotovoltaica domiciliaria en Chile. Trabajo para optar al título profesional de Ingeniero de Técnico Universitario en Electrónica. Concepción, UTFSM. 2010. 6 h.

[3]. D. R. CARROL. The wining solar car: A design guide for solar race car teams. Sae International. 2003, Capítulo 4.

[4] La Energía Proveniente del Sol [En línea]

<http://wiki.ead.pucv.cl/index.php/La_energ%C3%ADa_proveniente_del_sol > [Consulta 16 abril 2013]

[5]. G. J. AUBRECHT. ENERGY: Physical, Environmental, and Social Impact. PearsonPrentice Hall, Third Edition, Extension 21.4: The Physics of Solar Cells.

[6]. PANEL fotovoltaico [En línea]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_solar> [Consulta 10 mayo 2013]

[7] PANEL Solar [En línea]

<http://es.wikipedia.org/wiki/Panel_solar> [Consulta 10 mayo 2013]

[8]. Tecnología de mitigación de emisiones en centrales termoeléctricas a carbón. [En línea]. <http://web.ing.puc.cl/~power/alumno10/mitigacion/Situacion%20Chile.html> [Consulta 25 marzo 2013]

[9] R. PALMA-BENHKE, G. Jiménez, M. Cortés. Compendio Energético de Chile. Santiago, EDITEC, S.S. 2010. Capítulo: El Sector Energético en Chile.

[10]. PABLO GALIMBERTI. Diseño de laboratorios de ensayos fotovoltaicos. Tesis de maestría. España. Universidad Internacional de Andalucía. 2009. 50 p.

[11] INSTITUTO Nacional de Normalización (Chile). Catálogo 2013 Normas Chilenas Vigentes. Santiago, Agosto 2013. Sección E.7.1.

[12] ARNO KRENZINGER, Alexander Buler, Fabiano Gasparín. Aparato para medir curvas características de módulos fotovoltaicos con radiación natural. Rio Grande Do Sul, Brasil. Universidade Federal del Rio Grande del Sul.2 h.

[13] REQUISITOS para los módulos y sistema de desarrollo de NI LabVIEW [En línea] <http://www.ni.com/labview/esa/requirements> [Consulta 14 enero 2014]

[14] AGILENT Technologies. Data sheet N2862B/N2863B/N2889A/N2890A Passive Probes. USA, Febrero 2011. 1p.

[15] SENSORES para uso general [En línea] <http://www.aemc.com/products/Spanish%20PDFs/2110.71-SP.pdf> [Consulta 23 diciembre 2013]

[16] Aplicaciones acero inoxidable AISI 304. [En línea]. <http://www.sumiteccr.com/navegadores/esp/productos_esp2.shtml> [Consulta 15 agosto 2013].

ANEXOS

Anexo A: Proveedores de celdas fotovoltaicas en Chile.

					PRODUCTOS			
EMPRESA	**PÁGINA WEB**	**DIRECCIÓN**	**FONO**	**MAIL**	**Tipo**	**Potencia**	**Dimensión**	**peso**
EÓLICA SOLAR	www.eolicasolar.cl	Llano Subercaseaux 4005, of 1002, San Miguel. Santiago	85284269, 66099883	info@eolicasolar.cl	Policristalino	140 Wp	1500 x 668 x 36 mm	13 kg
					Monocristalino	180 Wp	808 x 1581 x 40 mm	16 kg
					Monocristalino	40 Wp	36 celdas de 125 x 63 mm	-
					Monocristalino	90 Wp	546 x 1196 x 35 mm	7,9 kg
					-	70 Wp	-	-
TECNORED	www.tecnored.cl	Cerro El Plomo 3819, Parque Industrial, Curauma.	-	-	Monocristalinos	180 Wp	-	-
					Monocristalinos	85 Wp	-	-
SOLENER	www.solener.cl	Emilio Vaisse 686, metro Irarrázabal, Ñuñoa.	(56-2) 453 7687, (56-2) 635 5591	-	Policristalino (Kyocera)	140 y 135 Wp	1500 x 668 x 46 mm	12,9 kg
					Policristalino (Yingli)	10 Wp	350 x 285 x 25 mm	1,64 kg

					Policristalino (Yingli)	20 Wp	525 X 350 x 25 mm	2,58 kg
					Policristalino (Yingli)	50 Wp	660 x 630 x 35 mm	5,23 kg
					Policristalino (Yingli)	90 Wp	1010 x 660 x 35 mm	7,88 kg
SK ECOLOGÍA	www.ske.cl	Asturias 149, Las Condes.	8374550	-	Monocristalino (Isofotón)	22 Wp	585 x 435 mm	3 kg
					Monocristalino (Isofotón)	120 Wp	1515 x 662 x 39,5	13,5 kg
HELIPLAST	www.heliplast.cl	Luis Thayer Ojeda 0180 of 201, Providencia.	(56-2) 3340800 3346904	christof.horn@heliplast.cl	Policristalino (Komaes)	5 Wp	205 x 352 x 22 mm	1,2 kg
					Policristalino (Komaes)	10 Wp	-	-
					Policristalino (Komaes)	20 Wp	-	-
					Policristalino (Komaes)	50 Wp	800 x 510 x 35 mm	5,2 kg
					Policristalino (Komaes)	100 Wp	1170 x 680 x 35 mm	9,2 kg
					Policristalino (Komaes)	130, 135, 140 Wp	1480 x 680 x 35 mm	11,6 kg
					Policristalino (Komaes)	230, 235, 240 Wp	1650 x 990 x 50 mm	19,8 kg
					Policristalino (Solarworld)	50 Wp	958 x 680 x 34 mm	7,6 kg
					Monocristalino (Solarworld)	70, 75, 80, 85, 90 Wp	1229 x 556 x 34 mm	7,6 kg
					Policristalino (Solarworld)	85 Wp	1230 x 556 x 34 mm	7,5 kg
					Policristalino	130, 140 Wp	1508 x 680 x 34 mm	11,8

					(Solarworld)			kg
					Policristalino (Solarworld)	135 Wp	1509 x 680 x 34 mm	11,8 kg
					Policristalino (Solarworld)	175, 180 Wp	1610 x 810 x 34 mm	15 kg
					Policristalino (Solarworld)	200, 205, 210, 215, 220, 225 Wp	1675 x 1001 x 34 mm	22 kg
					Policristalino (Solarworld)	245 Wp	1676 x 1001 x 34 mm	23 kg
GOSOLAR	www.gosolar.cl	-	-	-	Monocristalino (Et Solar)	70, 75, 80, 85 Wp	1205 x 545 x 35 mm	8,23 kg
					Policristalino (Kyocera)	135 Wp	1500 x 668 x 46 mm	12,5 kg
					Policristalina (Schott Solar)	220, 225, 230, 235 Wp	1685 x 993 x 50 mm	23 kg
ENERGÍA LED	www.energíaled.cl	Avenida Departamental 3913, La Florida, Santiago.	(56-2) 9848735, (56-2) 2981236, (56-2) 2981239	soluciones@energialed.cl	Monocristalino	145 Wp	1476 x 671 x 35 mm	11,5 Kg.
					Monocristalino	90 Wp	1196 x 541 x 35 mm	7,8 kg
					Policristalino	140 Wp	1476 x 671 x 35 mm	11,2 Kg.
ANTUSOLAR	www.antusolar.cl	Huérfanos 1373 - Oficina 1011, 8340615 Santiago	(56-2) 671 20 17 -	contacto@antusolar.cl	Policristalino (Photowatt)	70, 80, 85 Wp	556 x 237 x 45 mm	7,8 kg
					Policristalino (Photowatt)	90, 100, 110 Wp	1424 x 655 x 45 mm	12,5 kg
					Policristalino (Photowatt)	100, 110, 120 Wp	1425 x 655 x 45 mm	12,5 kg
					Policristalino (Photowatt)	120, 125, 130 Wp	1464 x 678,5 x 25 mm	12 kg
					Policristalino (Photowatt)	165, 170, 175, 180, 185 Wp	1237 x 1082 x 38 mm	18 kg

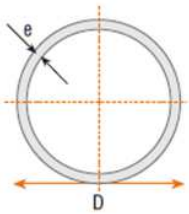
					Policristalino (Photowatt)	195, 200, 205, 210 Wp	1474 x 995 x 38 mm	17 kg
WIRELESS ENERGY	www.wireless-energy.cl	Ruta 5 Sur Km. 1017, Parcela 6 - Puerto Montt	56-65-292100	info@renovable.cl	Policristalino (Sharp)	50 - 160 Wp	-	-
					Policristalino (Sunwize)	72 - 224 Wp	-	-
					Policristalino (Evergreen)	170, 180, 190 Wp	-	-
					Monocristalino	20 Wp	645 x 295 x 25 mm	2,4 kg
					Monocristalino	30 Wp	450 x 540 x 25 mm	3 kg
					Monocristalino	40 Wp	644 x 551 x 28mm	5 kg
					Monocristalino	50 Wp	760 x 540 x 35 mm	5,5 kg
					Monocristalino	80 Wp	1005 x 540 x 35 mm	7,5 kg
					Monocristalino	85 Wp	1200 x 545 x 35mm	8 kg
					Monocristalino	130 Wp	1210 x 808 x 35mm	12 kg
					Monocristalino	185 Wp	1580 x 808 x 35 mm	15 kg
					Monocristalino	190 Wp	1580 x 808 x 35 mm	14,5 kg
					Monocristalino	230 Wp	1580 x 1060 x 45mm	21 kg

Anexo B: Listado de normas IEC sobre energía solar fotovoltaica (Enero 2004)

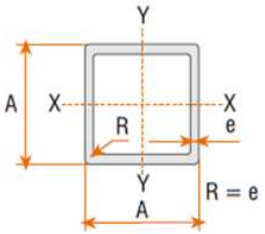
Norma	Título
IEC 60891 (1987-04)	Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices
IEC 60891-am1 (1992-06)	Amendment 1 - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics of crystalline silicon photovoltaic devices
IEC 60904-1 (1987-12)	Photovoltaic devices. Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics
IEC 60904-2 (1989-05)	Photovoltaic devices. Part 2: Requirements for reference solar cells
IEC 60904-2-am1 (1998-02)	Amendment 1 - Photovoltaic devices. Part 2: Requirements for reference solar cells
IEC 60904-3 (1989-02)	Photovoltaic devices. Part 3: Measurement principles for terrestrial photovoltaic (PV) solar devices with reference spectral irradiance data
IEC 60904-5 (1993-10)	Photovoltaic devices - Part 5: Determination of the equivalent cell temperature (ECT) of photovoltaic (PV) devices by the open-circuit voltage method
IEC 60904-6 (1994-09)	Photovoltaic devices - Part 6: Requirements for reference solar modules
IEC 60904-6-am1 (1998-02)	Amendment 1 - Photovoltaic devices - Part 6: Requirements for reference solar modules
IEC 60904-7 (1998-03)	Photovoltaic devices - Part 7: Computation of spectral mismatch error introduced in the testing of a photovoltaic device
IEC 60904-8 (1998-02)	Photovoltaic devices - Part 8: Measurement of spectral response of a photovoltaic (PV) device.
IEC 60904-9 (1995-09)	Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements
IEC 60904-10 (1998-02)	Photovoltaic devices - Part 10: Methods of linearity measurement

IEC 61173 (1992-09)	Overvoltage protection for photovoltaic (PV) power generating systems - Guide
IEC 61194 (1992-12)	Characteristic parameters of stand-alone photovoltaic (PV) systems
IEC 61215 (1993-04)	Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
IEC 61277 (1995-03)	Terrestrial photovoltaic (PV) power generating systems - General and guide
IEC 61345 (1998-02)	UV test for photovoltaic (PV) modules
IEC 61646 (1996-11)	Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval
IEC 61683 (1999-11)	Photovoltaic systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency
IEC 61701 (1995-03)	Salt mist corrosion testing of photovoltaic (PV) modules
IEC 61702 (1995-03)	Rating of direct coupled photovoltaic (PV) pumping systems
IEC 61721 (1995-03)	Susceptibility of a photovoltaic (PV) module to accidental impact damage (resistance to impact test)
IEC 61724 (1998-11)	Photovoltaic system performance monitoring - Guidelines for measurement, data exchange and analysis
IEC 61725 (1997-05)	Analytical expression for daily solar profiles
IEC 61727 (1995-06)	Photovoltaic (PV) systems - Characteristics of the utility interface
IEC 61829 (1995-03)	Crystalline silicon photovoltaic (PV) array - On-site measurement of I-V characteristics
IEC/TR2 61836 (1997-10)	Solar photovoltaic energy systems - Terms and symbols
IEC/TS 62257-1 (2003-08)	Recommendations for small renewable energy and hybrid systems for rural electrification - Part 1: General introduction to rural electrification
IEC/PAS 62111 (1999-07)	Specifications for the use of renewable energies in rural decentralised electrification

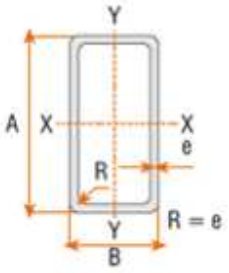
Anexo C: Tablas perfiles laminados perfil circular, perfil cuadrado, perfil rectangular.



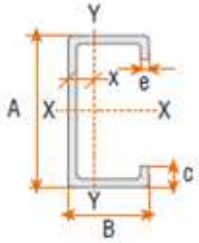
Designación		Espesor	Peso teórico	Propiedades			
Diámetro exterior		e	P	Área	I	W	i
Pulgadas	mm	mm	kgf/m	cm²	cm⁴	cm³	cm
1"	25,40	1,0	0,60	0,77	0,57	0,45	0,86
	25,40	1,5	0,88	1,13	0,81	0,64	0,85
	25,40	2,0	1,15	1,47	1,01	0,80	0,83
1 1/8"	28,60	1,5	1,00	1,28	1,18	0,82	0,96
1 1/4"	31,75	1,0	0,76	0,97	1,14	0,72	1,09
	31,75	1,2	0,90	1,15	1,35	0,85	1,08
	31,75	1,5	1,12	1,43	1,63	1,03	1,07
	31,75	2,0	1,47	1,87	2,08	1,31	1,05
1 1/2"	38,10	1,0	0,91	1,17	2,01	1,05	1,31
	38,10	1,5	1,35	1,72	2,89	1,52	1,30
	38,10	2,0	1,78	2,27	3,71	1,95	1,28
1 3/4"	44,45	1,5	1,59	2,02	4,67	2,10	1,52
	44,45	2,0	2,09	2,67	6,02	2,71	1,50
2"	50,80	1,0	1,23	1,56	4,85	1,91	1,76
	50,80	1,5	1,82	2,32	7,06	2,78	1,74
	50,80	2,0	2,41	3,07	9,14	3,60	1,73
	50,80	3,0	3,54	4,51	12,92	5,09	1,69
2 1/2"	63,50	1,5	2,29	2,92	14,05	4,42	2,19
	63,50	2,0	3,03	3,86	18,29	5,76	2,18
	63,50	3,0	4,48	5,70	26,15	8,24	2,14
3"	76,20	1,5	2,76	3,52	24,56	6,45	2,64
	76,20	2,0	3,66	4,66	32,11	8,43	2,62
	76,20	3,0	5,42	6,90	46,29	12,15	2,59
	76,20	4,0	7,12	9,07	59,30	15,56	2,56
3 1/2"	88,90	2,0	4,29	5,46	51,57	11,60	3,07
4"	101,6	2,0	4,91	6,26	77,63	15,28	3,52
	101,6	3,0	7,29	9,29	113,04	22,25	3,49
	101,6	4,0	9,63	12,26	146,28	28,80	3,45
	101,6	5,0	11,90	15,17	177,47	34,93	3,42
5"	127,0	4,0	12,10	15,46	292,61	46,08	4,35
	127,0	5,0	15,00	19,16	357,14	56,24	4,32



Dimensiones nominales		Peso teórico	Área	Ejes X-X e Y-Y		
A	Espesor		A	I	W	i
mm	mm	Kg/m	cm^2	cm^4	cm^3	cm
15	1,0	0,42	0,53	0,17	0,23	0,56
	1,5	0,59	0,75	0,22	0,29	0,54
20	1,0	0,58	0,73	0,43	0,43	0,77
	1,5	0,83	1,05	0,58	0,58	0,74
	2,0	1,05	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,0	0,73	0,93	0,88	0,71	0,97
	1,5	1,06	1,35	1,21	0,97	0,95
	2,0	1,36	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,0	0,89	1,13	1,57	1,05	1,18
	1,5	1,30	1,65	2,19	1,46	1,15
	2,0	1,68	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,0	1,20	1,53	3,85	1,93	1,59
	1,5	1,77	2,25	5,48	2,74	1,56
	2,0	2,31	2,94	6,93	3,46	1,54
	3,0	3,30	4,21	9,28	4,64	1,48
50	1,5	2,24	2,85	11,06	4,42	1,97
	2	2,93	3,74	14,13	5,65	1,94
	3	4,25	5,41	19,41	7,76	1,89
	4	5,45	9,95	23,60	9,44	1,84
	5	6,56	8,36	26,78	10,71	1,79
75	2	4,50	5,74	50,47	13,46	2,97
	3	6,60	8,41	71,54	19,08	2,92
	4	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
	5	10,48	13,36	105,92	28,25	2,82
	6	12,27	15,63	119,48	31,86	2,76
100	2	6,07	7,74	122,99	24,60	3,99
	3	8,96	11,41	176,95	35,39	3,94
	4	11,73	14,95	226,09	45,22	3,89
	5	14,41	18,36	270,57	54,11	3,84
	6	16,98	21,63	310,55	62,11	3,79
135	4	16,13	20,55	581,38	86,13	5,32
	5	19,90	25,36	704,23	104,33	5,27



Dimensiones nominales			Peso teórico	Área A	Eje X-X			Eje Y-Y		
A	B	e			I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	kgf/m	cm²	cm⁴	cm³	cm	cm⁴	cm³	cm
20	10	1,0	0,42	0,53	0,25	0,25	0,69	0,08	0,17	0,39
	10	1,5	0,59	0,75	0,32	0,32	0,66	0,10	0,21	0,37
25	15	1,0	0,58	0,73	0,59	0,48	0,90	0,27	0,36	0,60
	15	1,5	0,83	1,05	0,80	0,64	0,87	0,35	0,47	0,58
	15	2,0	1,05	1,34	0,95	0,76	0,84	0,41	0,55	0,56
30	20	1,0	0,73	0,93	1,15	0,77	1,11	0,61	0,61	0,81
	20	1,5	1,06	1,35	1,58	1,05	1,08	0,84	0,84	0,79
	20	2,0	1,36	1,74	1,93	1,28	1,05	1,01	1,01	0,76
40	20	1,0	0,89	1,13	2,33	1,17	1,43	0,79	0,79	0,84
	20	1,5	1,30	1,65	3,26	1,63	1,40	1,09	1,09	0,81
	20	2,0	1,68	2,14	4,04	2,02	1,37	1,33	1,33	0,79
	30	1,5	1,53	1,95	4,37	2,19	1,50	2,80	1,87	1,20
	30	2,0	1,99	2,54	5,48	2,74	1,47	3,50	2,33	1,17
50	20	1,5	1,53	1,95	5,76	2,31	1,72	1,35	1,35	0,83
	20	2,0	1,99	2,54	7,22	2,89	1,69	1,66	1,66	0,81
	30	1,0	1,20	1,53	5,28	2,11	1,86	2,41	1,61	1,25
	30	1,5	1,77	2,25	7,53	3,01	1,83	3,41	2,27	1,23
	30	2,0	2,31	2,94	9,52	3,81	1,80	4,28	2,85	1,21
	30	3,0	3,30	4,21	12,78	5,11	1,74	5,66	3,77	1,16



Dimensiones nominales			Peso teórico	Área A	Eje X-X			Eje Y-Y		
A	B	e			I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	kgf/m	cm^2	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm^3	cm
60	40	2	2,93	3,74	18,39	6,13	2,22	9,81	4,91	1,62
	40	3	4,25	5,41	25,31	8,44	2,16	13,38	6,69	1,57
	40	4	5,45	6,95	30,83	10,28	2,11	16,15	8,08	1,52
70	30	2	2,93	3,74	22,20	6,34	2,44	5,85	3,90	1,25
	30	3	4,25	5,41	30,50	8,71	2,37	7,84	5,23	1,20
80	40	2	3,56	4,54	37,33	9,33	2,87	12,70	6,35	1,67
	40	3	5,19	6,61	52,16	13,04	2,81	17,49	8,74	1,63
	40	4	6,71	8,55	64,59	16,15	2,75	21,33	10,67	1,58
100	50	2	4,50	5,74	74,94	14,99	3,61	25,65	10,26	2,11
	50	3	6,60	8,41	106,34	21,27	3,56	35,97	14,39	2,07
	50	4	8,59	10,59	133,88	26,78	3,50	44,76	17,90	2,02
	50	5	10,48	13,36	157,70	31,54	3,44	52,09	20,83	1,97
150	50	2	6,07	7,74	207,45	27,66	5,18	37,17	14,87	2,19
	50	3	8,96	11,41	298,35	39,78	5,11	52,54	21,02	2,15
	50	4	11,73	14,95	380,98	50,80	5,05	65,92	26,37	2,10
	50	5	14,41	18,36	455,54	60,74	4,98	77,40	30,96	2,05
200	70	4	16,13	20,55	968,54	96,85	6,87	185,17	52,91	3,00
	70	5	19,90	25,36	1172,89	117,29	6,80	221,55	63,30	2,96
	70	6	23,58	30,03	1362,69	136,27	6,74	254,26	72,65	2,91

Anexo D: Rosca métrica DIN

Rosca Métrica gruesa DIN ISO 13-1							**Rosca Métrica Fina DIN ISO 13-2**			
Diámetro nominal mm	Paso P	Diámetro núcleo (mm)		Profundidad de la rosca mm		O	Diámetro nominal (mm)	Diámetro núcleo (mm)		O
	(mm)	Tornillo d_3	Tuerca D_1	Tornillo h_3	Tuerca H_4	Broca (mm)		Tornillo d_3	Tuerca D_1	Broca (mm)
M1	0,25	0,693	0,729	0,153	0,135	0,75	M2x0,25	1,755	1,783	1,75
M1,2	0,25	0,893	0,929	0,153	0,135	0,95	M2,5×0,35	2,193	2,229	2,15
M1,6	0,35	1,170	1,221	0,215	0,189	1,25	M3x0,35	2,571	2,621	2,65
M2	0,4	1,509	1,567	0,245	0,217	1,6	M4x0,5	3,387	3,459	3,65
M2,5	0,45	1,948	2,130	0,276	0,244	2,1	M5x0,5	4,387	4,459	4,50
M3	0,5	2,387	2,459	0,307	0,271	2,5	M6x0,5	5,387	5,489	5,50
M4	0,7	3,141	3,242	0,429	0,379	3,3	M6x0,75	5,080	5,188	5,20
M5	0,8	4,019	4,134	0,491	0,433	4,2	M7x0,75	6,080	6,188	6,20
M6	1,00	4,773	4,917	0,613	0,541	5,00	M8x0,5	7,387	7,459	7,50
M8	1,25	6,466	6,647	0,767	0,677	6,8	M8x0,75	7,080	7,188	7,20
M10	1,50	8,160	8,376	0,920	0,812	8,5	M8x1,0	6,773	6,917	7,00

M12	1,75	9,853	10,106	1,074	0,947	10,2	M9x0,75	8,080	8,188	8,20
M16	2,00	13,546	13,835	1,227	1,083	14,0	M10x0,75	9.080	9,188	9,20
M20	2,50	16,933	17,294	1,534	1,353	17,5	M10x1,0	8,773	8,917	9,00
M24	3,00	20,319	20,752	1,840	1,624	21,0	M10x1,25	8,466	8,647	8,80
M30	3,50	25,706	26,211	2,147	1,894	26,5	M11x1,0	9,773	9,917	10,00
M36	4,00	31,093	31,670	2,454	2,165	32,0	M12x1,0	10.773	10,917	11,00
M42	4,5	36,147	37,129	2,760	2,436	37,5	M12x1,25	10,466	10,647	10,80
M48	5,00	41,866	42,587	3,076	2,706	43,0	M12x1,5	10,160	10,376	10,50
M56	5,50	19,252	50,046	3,374	2,977	50,5	M14x1,25	12,466	12,647	12,80
M64	6,00	56,639	57,505	3,681	3,248	58,0	M14x1,5	12,160	12,376	12,50
							M16x1,0	14,773	14,917	15,00
							M16x1,25	14,466	14,647	14,80
							M16x1,5	14,160	14,376	14,50
							M18x1,5	16,160	16,376	16,50
							M20x1,0	18,773	18,917	19,00
							M20x1,5	18,16	18,37	18,5

		0	6	0
	M24x1,5	22,160	22,376	22,50
	M24x2,0	21,546	21,835	22,00
	M30x1,5	28,160	28,376	28,50
	M30x2,0	27,546	27,835	28,00
	M36x1,5	34,160	34,376	34,50
	M36x2,0	33,546	33,835	34,00
	M42x1,5	40,160	40,376	40,80
	M42x2,0	39,546	39,835	40,00

Anexo e:

a) FLEXIÓN EN VIGA CUADRADA Y EN VIGA CIRCULAR

- Flexión en viga de perfil cuadrado:

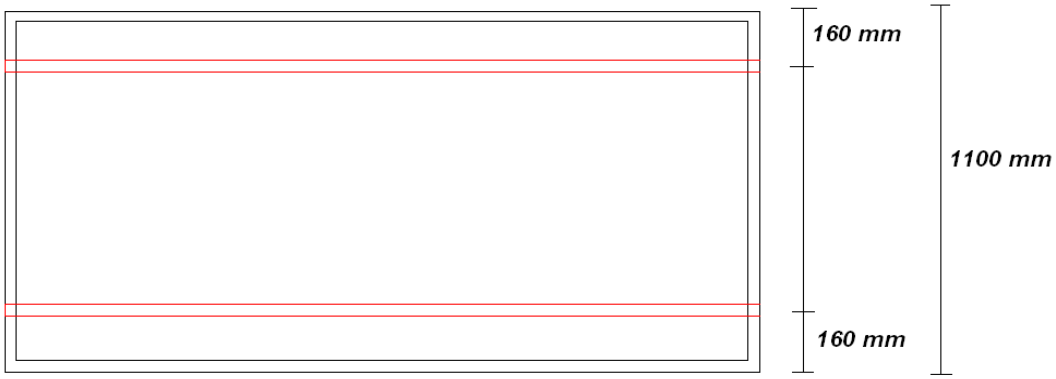
La mayor parte de la estructura metálica está diseñada en un perfil cuadrado hueco con dimensiones de 50 x 50 mm. con 2,5 mm. de diámetro. Se estudia aquí la flexión en las vigas horizontales que soportan los paneles.

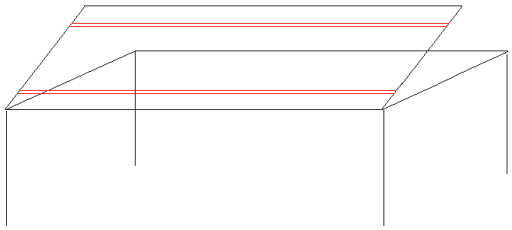
Como se mencionó anteriormente el peso estimado a considerar es de 80 kg (20 kg por panel), por tanto se calculará la flexión en los rieles de sujeción de los paneles:

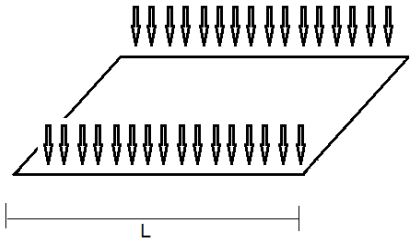
En manuales de instalación de paneles fotovoltaicos, la recomendación es instalar cada riel a una distancia de 0,6 L, siendo L el largo del panel. En este caso el largo de los paneles será variable, pero se tomará como promedio una distancia de 1300 mm. Por tanto:

d = 1300 * 0,6 = 780 mm

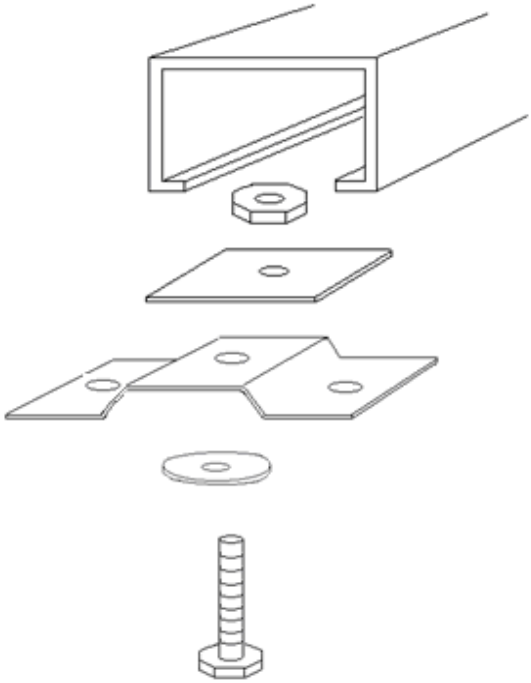
Debe haber una distancia de 780 mm entre los rieles. La parte superior de la estructura de soporte tiene un alto de 1100 mm. Por tanto:

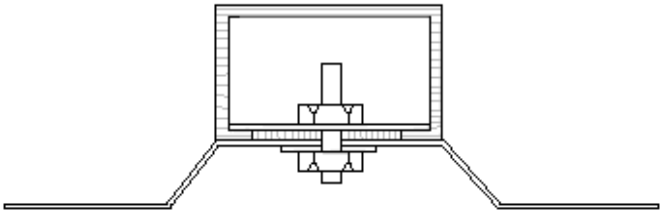






El sistema de sujeción mediante rieles funciona de la siguiente forma:





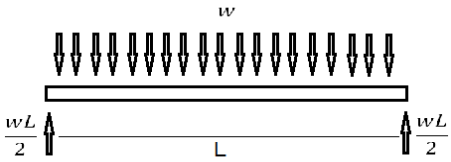
La carga en cada viga se aproximará a 40 kg, por tanto:

$$wL: Carga\ Total\ en\ una\ viga$$

$$L: Largo\ viga$$

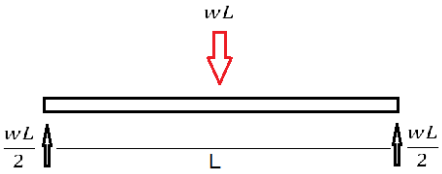
$$wL = 40 * 9{,}8 \tag{1}$$

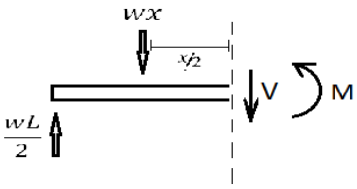
$$wL = 392\ [N]$$



$$w = \frac{392}{L}$$

$$w = \frac{392}{3} = 130{,}6\ [\frac{N}{m}]$$





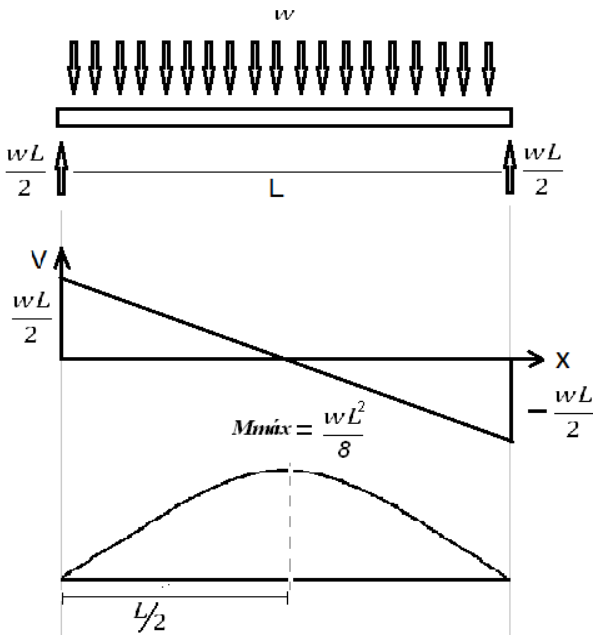
$\sum F_y = 0$ $$\frac{wL}{2} - wx - V = 0$$

$$V = w\left(\frac{L}{2} - x\right) \quad (2)$$

$\sum M = 0$ $$-\left(\frac{wL}{2}\right)x + (wx)\left(\frac{x}{2}\right) + M = 0$$

$$M = \frac{w}{2}(Lx - x^2) \quad (3)$$

Por tanto,



La fuerza cortante máxima se presenta en los extremos $x = 0$

El momento máximo se presenta en $x = \frac{L}{2}$, reemplazando en (2) y (3)

$$V_{máx} = \frac{wL}{2} = \frac{392}{2} = 196\ [N]$$

$$M_{máx} = \frac{w}{2}\left[L\left(\frac{L}{2}\right) - \left(\frac{L^2}{2}\right)\right] = \frac{wL^2}{8} = \frac{130{,}6 * 3^2}{8} = 146{,}93\ [Nm]$$

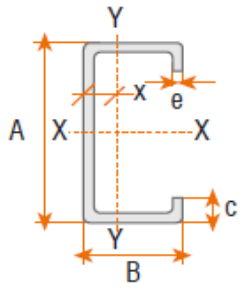
El esfuerzo máximo de la viga es:

$$\sigma_{máx} = \frac{M*C}{I} \quad (4)$$

Donde,

$$C: distancia\ perpendicular\ al\ eje\ neutro$$

$$I: momento\ de\ inercia\ del\ área\ transversal$$



Dimensiones nominales			Peso teórico	Área A	Eje X-X			Eje Y-Y		
A	B	e			I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	kgf/m	cm^2	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm^3	cm
60	40	2	2,93	3,74	18,39	6,13	2,22	9,81	4,91	1,62
	40	3	4,25	5,41	25,31	8,44	2,16	13,38	6,69	1,57
	40	4	5,45	6,95	30,83	10,28	2,11	16,15	8,08	1,52

A = 60 mm

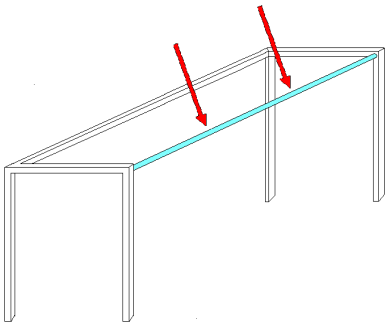
Espesor = 2 mm

I = 98.100 mm^4

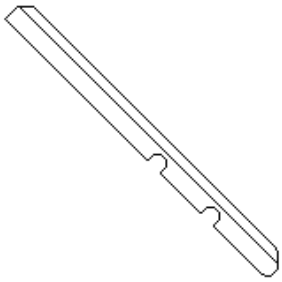
$$\sigma_{máx} = \frac{146.999{,}93 * 30}{98.100} = 44{,}95[\frac{kN}{mm^2}]$$

- Flexión en viga de perfil circular:

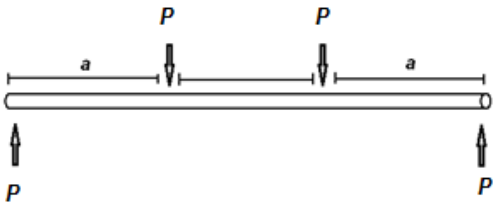
En el diseño es ésta estructura hay una viga circular hueca, con el fin de 'enganchar' dos brazos articulados a la viga de arriba, que tendrán dos sacados circulares.



Sobre esta viga circular van apoyadas los dos brazos que soportan la viga cuadrada.



Por tanto,

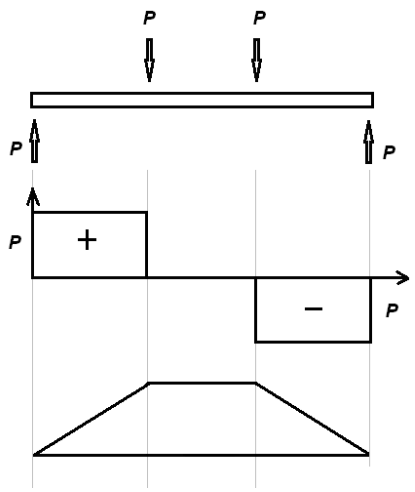


$$a = 1000[mm]$$

Luego,

$$2P = wL = 392\ [N]$$

$$P = 196\ [N]$$



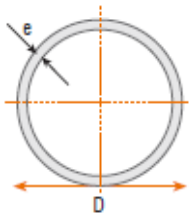
$$V_{máx} = P = 196\ [N]$$

$$M_{máx} = P * L = 196 * 1 = 196\ [Nm]$$

$$\sigma_{máx} = \frac{M * c}{I}$$

Las dimensiones c e I dependen de las dimensiones del perfil.

Se escoge de la tabla que se encuentra en el Anexo C el perfil de las siguientes dimensiones:



Designación		Espesor	Peso teórico	Propiedades			
Diámetro exterior		e	P	Área	I	W	i
Pulgadas	mm	mm	kgf/m	cm²	cm⁴	cm³	cm
1 1/2"	38,10	1,0	0,91	1,17	2,01	1,05	1,31
	38,10	1,5	1,35	1,72	2,89	1,52	1,30
	38,10	2,0	1,78	2,27	3,71	1,95	1,28

$$D = 38{,}1\ [mm]$$

$$t = 1{,}5\ [mm]$$

$$c = 19{,}05\ [mm]$$

$$I = 28.900\ [mm^4]$$

Por tanto:

$$\sigma_{máx} = \frac{196.000 * 19{,}05}{28.900} = 129{,}20\ [\frac{N}{mm^2}]$$

b) ANÁLISIS DE PANDEO EN PATAS DE ESTRUCTURA

La mayor parte de la estructura tiene un perfil cuadrado de 50 x 50 mm, con espesor de 2 mm.

Donde

A = 50 mm

Espesor = 2 mm

$$Area = 374\ [mm^2]$$

La carga crítica es:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(kL)^2} \tag{5}$$

El esfuerzo crítico:

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{kL}{r}\right)^2} \tag{6}$$

Radio de giro mínimo de la columna:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \tag{7}$$

E: Módulo de elasticidad del material

I: Momento de inercia del área transversal

L: Longitud de la columna

K: Fator de longitud efectiva

Para el acero:

$$E = 200\ [\frac{kN}{mm^2}]$$

En la estructura:

$$L = 1000\ [mm]$$

$$K = 2\ (extremos\ empotrado\ y\ libre)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * 200 * 141.300}{(2 * 1000)^2} = 69{,}72\ kN$$

$$r = \sqrt{\frac{141.300}{374}} = 19{,}44\ mm$$

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 * 200}{\left(\frac{2000}{19{,}44}\right)^2} = 0{,}19\ \left[\frac{kN}{mm^2}\right]$$

Resistencia de fluencia del acero inoxidable:

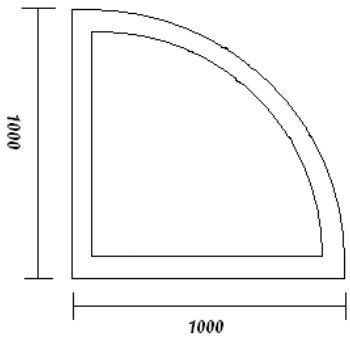
σ_y = 310 MPa = 44,96 Ksi

$$\sigma_y = 44{,}96\left[\frac{klb}{pulg^2}\right] = 0{,}31\left[\frac{kN}{mm^2}\right]$$

Habrá pandeo antes que falla por fluencia

$$\sigma_y > \sigma_{cr\ calculado}$$

c) ESFUERZOS CORTANTES EN PASADORES



El perímetro de la circunferencia que comprende el arco formado por las platinas circulares de la estructura es de 628,32 cm.

- Posición de los pasadores:

Arco comprendido en 43° (X_1)

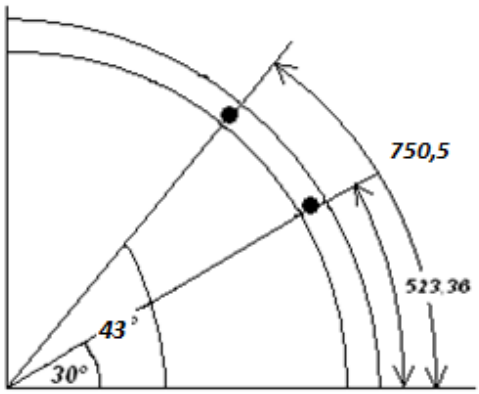
$$\frac{360°}{43°} = \frac{628{,}32}{X_1}$$

$$X_1 = 75{,}05\ cm$$

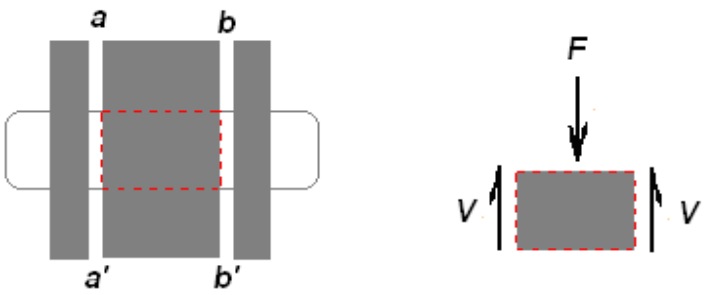
Arco comprendido en 30° (X_2)

$$\frac{360°}{30°} = \frac{628{,}32}{X_2}$$

$$X_2 = 52{,}36\ cm$$



- Esfuerzo cortante doble de los pasadores:



El perno se somete a esfuerzo cortante doble.

$$\tau = \frac{F}{2A} \tag{8}$$

Como se realizó en los cálculos anteriores, se estima el peso total de los paneles, como 80 kg. Se sobrecalcula el perno suponiendo que la mitad del peso de los paneles será soportado por el pasador:

$$F = 40\ kg = 392\ N$$

Los pernos y pasadores utilizados en la estructura también deben ser de acero inoxidable, por tanto:

$$\sigma_y = 44{,}96 \left[\frac{klb}{pulg^2}\right] = 0{,}31 \left[\frac{kN}{mm^2}\right]$$

$$\tau < 0{,}31 \left[\frac{kN}{mm^2}\right]$$

$$0{,}31 > \frac{0{,}392}{2A}$$

$$A > 0{,}63$$

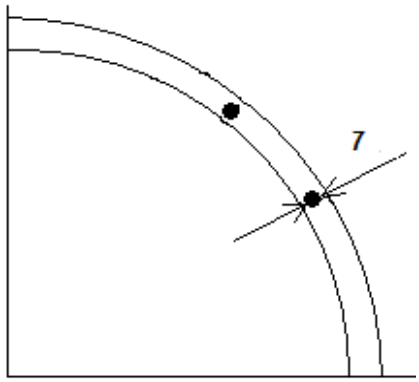
$$r > 0{,}44\ mm$$

El perno escogido es el M8x1,0 (Anexo D), que supera bastante a lo calculado, el cual tiene las siguientes dimensiones:

Diámetro tornillo= 6,773 mm

Diámetro Tuerca= 6,971mm

Broca= 7,00 mm

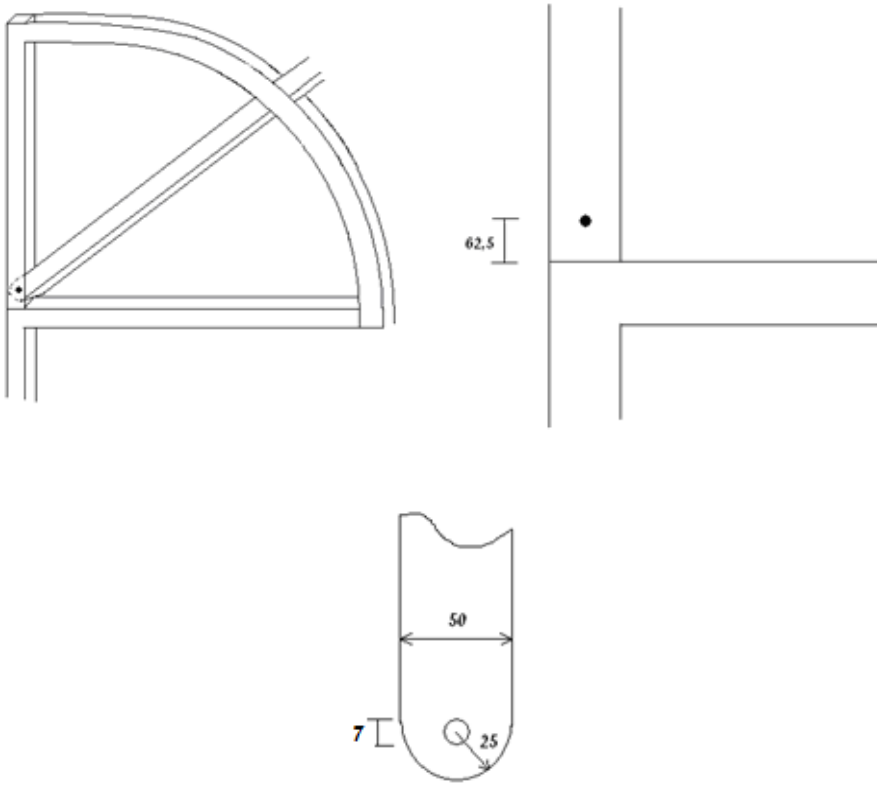


Recalculamos el esfuerzo cortante:

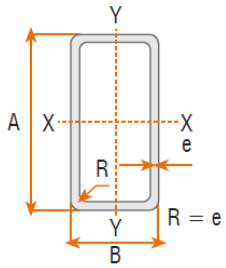
$$\tau = \frac{0{,}294}{2 * \pi * \left(\frac{6{,}773}{2}\right)^2} = 0{,}004 \left[\frac{kN}{mm^2}\right]$$

Para el pasador en los dos extremos inferiores se utilizará el mismo pasador.

La viga móvil tiene un extremo articulado por un pasador en la esquina inferior. La distancia desde la base hasta el agujero será de 62,5 cm.



La viga móvil tiene un perfil diferente al resto de la estructura, es mas angosta para que pueda moverse libremente por las platinas circulares.



Las dimensiones de éste perfil fueron escogidas de la tabla del Anexo C.

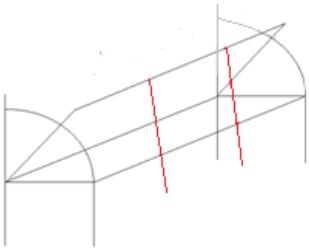
Dimensiones nominales			Peso teórico	Área A	Eje X-X			Eje Y-Y		
A	B	e			I	W	i	I	W	i
mm	mm	mm	kgf/m	cm^2	cm^4	cm^3	cm	cm^4	cm^3	cm
50	20	1,5	1,53	1,95	5,76	2,31	1,72	1,35	1,35	0,83
	20	2,0	1,99	2,54	7,22	2,89	1,69	1,66	1,66	0,81
	30	1,0	1,20	1,53	5,28	2,11	1,86	2,41	1,61	1,25
	30	1,5	1,77	2,25	7,53	3,01	1,83	3,41	2,27	1,23
	30	2,0	2,31	2,94	9,52	3,81	1,80	4,28	2,85	1,21
	30	3,0	3,30	4,21	12,78	5,11	1,74	5,66	3,77	1,16

B = 30 mm

A = 50 mm

e = 2,0 mm

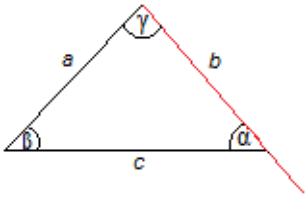
d) BRAZOS POSTERIORES



Como se mencionó anteriormente, los ángulos necesarios son:

β = 48°

β = 30°



Sabemos que:

$$a = 1100\ mm$$

$$c = 1000\ mm$$

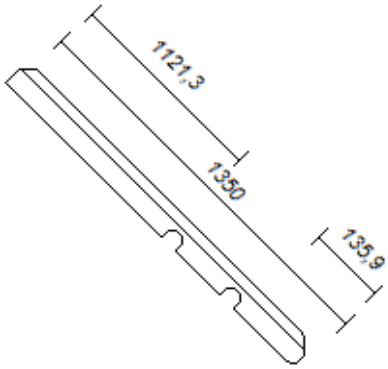
Se necesitan dos valores de b, correspondientes a los dos ángulos:

Teorema del coseno:

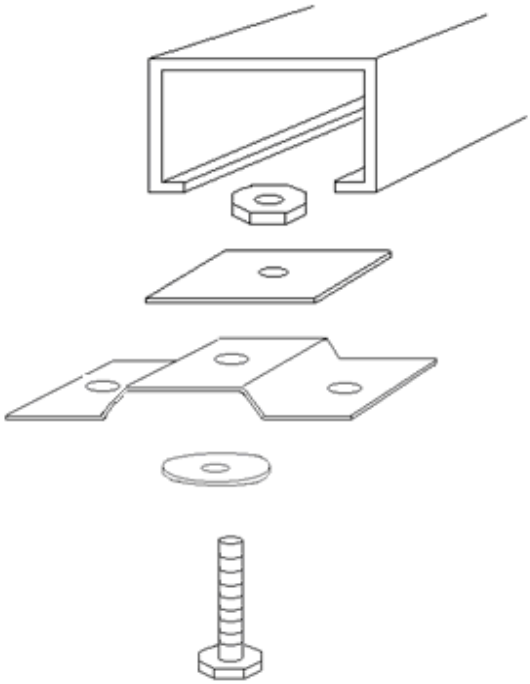
$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac\cos\beta \tag{9}$$

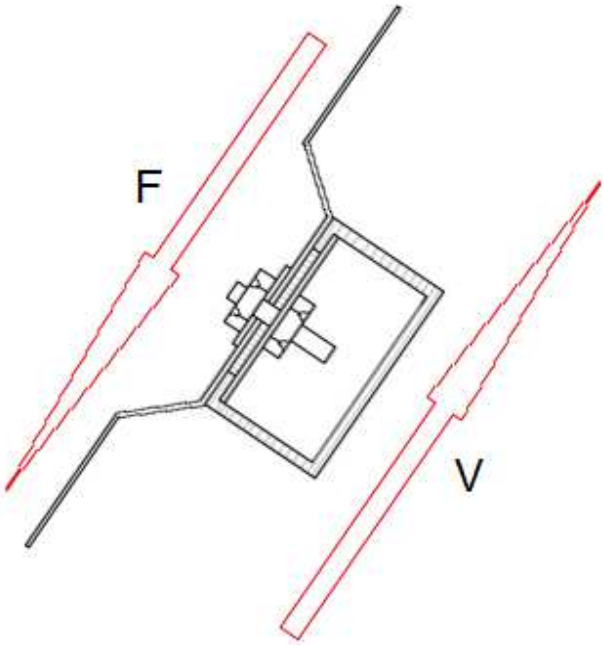
$$b_{48^\circ} = 1214{,}1\ mm$$

$$b_{30^\circ} = 1123{,}1\ mm$$



e) ESFUERZOS PERNOS SUJECIÓN PANELES-RIELES




F
V

Donde F será la el peso de un panel en uno de sus pernos. Un panel tendrá como mínimo dos pernos, uno por riel. La fuerza F será la mitad del peso del panel.

F = 98 N

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$\tau < 0{,}31 \left[\frac{kN}{mm^2}\right]$$

$$0{,}31 > \frac{0{,}098}{A}$$

$$A > 0{,}32$$

$$r > 0{,}32\ mm$$

Se escoge el mismo perno anterior, el M8x1,0 , el que supera bastante a lo calculado y tiene las siguientes dimensiones:

Diámetro tornillo= 6,773 mm

Diámetro Tuerca= 6,971mm

Broca= 7,00 mm