UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIRÍA MECÁNICA

SANTIAGO-CHILE

# Cuantificación experimental de los efectos de la instalación de una lámina reflectora de radiación en un panel fotovoltaico

Braulio Antonio Benítez Belmar

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Ph.D Rodrigo Barraza Vicencio

Profesor Co-Referente: Ph.D Patricio Valdivia Lefort

**Octubre-2019**

# Agradecimientos

Agradezco a Dios, a mi familia y a mi compañera por el constante apoyo, amor, guía, paciencia, ya que son una parte fundamental de mi vida y esencia. Este trabajo va dedicado a ellos, en especial a mis padres por el rol que tienen en mi vida, por su inconmensurable esfuerzo, amor y apoyo para poder desarrollarme como persona.

También agradecer al profesor Rodrigo Barraza, profesores de laboratorio y compañeros que me brindaron las herramientas y toda la ayuda necesaria para realizar este proyecto.

Finalmente agradecer a mis amigos que conocí en esta etapa universitaria, por los buenos momentos, haciendo el proceso de estudio más ameno.

# Resumen

El potencial de energía solar en Chile y el constante crecimiento de la tecnología solar fotovoltaica han contribuido a un mejor aprovechamiento del recurso solar. Por esto, y con el fin de aumentar la cantidad de irradiancia por superficie, es que se han realizado estudios de módulos fotovoltaicos con adición de reflectores de radiación en diversas partes del mundo, e incluso hasta plantas solares con esta tecnología.

Con el fin de obtener registros confiables y de primera fuente es que se implementa un sistema de medición, para realizar el estudio de los efectos de dos tipos de láminas reflectivas de radiación; Cool mirror 330 de 3M y papel aluminio, en dos paneles fotovoltaicos de silicio monocristalino de 250[W] nominales que están continuamente inyectando a la red eléctrica, uno de ellos expuesto solo a la radiación solar y el otro expuesto adicionalmente a las láminas reflectivas radiación nombradas. El sistema de medición permite registrar variables; eléctricas como corriente y voltaje continuo; térmicas como temperatura en la cara posterior del módulo fotovoltaico; y meteorológicas como temperatura ambiente e irradiancia solar para cada panel fotovoltaico. Todas las variables mencionadas son medidas y registradas cada un minuto, lo que permite tener una base de datos continua, confiable y de primera fuente para posteriores estudios.

Parte de los resultados son que el desempeño del reflector de papel aluminio y el Cool mirror 3M son similares. En promedio la potencia aumentada por el reflector respecto a un panel fotovoltaico sin este es de 3,9 [%] para el Cool mirror y de un 6,9[%] al utilizar el aluminio, en un día de invierno. En primavera y en mejores condiciones de irradiancia se logró registrar un aumento promedio de la potencia de hasta 10,6 [%] utilizando aluminio como reflector.

# Abstract

The potential of solar energy in Chile and the constant growth of solar photovoltaic technology have contributed to a better use of the solar resource. For this reason, and in order to increase the amount of irradiance per surface, it is that studies of photovoltaic modules have been carried out with the addition of radiation reflectors in various parts of the world, and even to solar plants with this technology.

In order to obtain reliable and first source records, a measurement system is implemented to study the effects of two types of radiation reflective sheets; Cool mirror 330 of 3M and aluminum foil, in two nominal 250 [W] monocrystalline silicon photovoltaic panels that are continuously injecting into the mains, one of them exposed only to solar radiation and the other additionally exposed to radiation reflective sheets named. The measurement system allows to record variables; electrical as current and continuous voltage; thermal as temperature on the back of the photovoltaic module; and meteorological as ambient temperature and solar irradiance for each photovoltaic panel. All the mentioned variables are measured and recorded every one minute, which allows for a continuous, reliable and first-rate database for further studies.

Part of the results are that the performance of the aluminum foil reflector and the Cool mirror 3M are similar. On average the power increased by the reflector compared to a photovoltaic panel without it is 3.9 [%] for the Cool mirror and 6.9 [%] when using aluminum, on a winter day. In spring and in better irradiance conditions, an average power increase of up to 10.6 [%] was recorded using aluminum as a reflector.

# Glosario

**CPV**: Concentrator Photovoltaic o concentrado fotovoltaico.

**CR:** Panel con reflector de radiación

**ERNC:** Energías renovables no convencionales.

**Espectrómetro: I**nstrumento óptico para medir las propiedades de la luz sobre una porción específica del espectro electromagnético.

**LCPV:** Low-concentration photovoltaic o sistemas fotovoltaicos de baja concentración,

**MPPT**: Maximum Power Point Tracker, seguidor de punto de máxima potencia.

**P_CR:** Potencia generada por el panel fotovoltaico con reflector de radiación.

**P_SR:** Potencia generada por el panel fotovoltaico sin reflector de radiación.

**Piranómetro:** Instrumento meteorológico utilizado para medir la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre.

**Pirheliómetro:** Instrumento para la medición de irradiancia de un haz de luz solar, utilizado junto a un sistema de seguimiento solar para mantener el instrumento orientado al sol.

**POA:** Plane of Array, irradiancia de plano inclinado.

**PV**: Fotovoltaico(s), Fotovoltaica(s).

**R_CR:** Radiación solar incidente en el panel fotovoltaico con reflector.

**R_SR:** Radiación solar incidente en el panel fotovoltaico sin reflector.

**SR:** Panel sin reflector de radiación

**Superficie especular:** Superficie en que el ángulo del rayo incidente es igual al ángulo del rayo reflejado, tomando como referencia la normal a la superficie de incidencia.

**Superficie Lambertiana:** Superficie ideal que refleja la energía incidente desde una dirección igual en todas direcciones.

**T_CR:** Temperatura en la cara posterior del panel fotovoltaico con reflector de radiación.

**T_SR:** Temperatura en la cara posterior del panel fotovoltaico sin reflector de radiación.

**TERMISTOR NTC**: Termistor Negative Temperature Coefficient, Termistor de coeficiente de temperatura negativa.

**TERMISTOR PTC:** Termistor Positive Temperature Coefficient, Termistor de coeficiente de temperatura positiva.

# Nomenclatura

| Abreviación | Nombre | Unidad |
|---|---|---|
| $\boldsymbol{Isc}$ | Corriente de corto circuito | [A] |
| $\boldsymbol{V_{OC}}$ | Voltaje de circuito abierto | [V] |
| **DC o CC** | Corriente continua | [A] |
| **CA o AC** | Corriente alterna | [A] |
| $\boldsymbol{V_{DC}\ o\ V_{CC}}$ | Voltage of Continuous Current o Voltaje de corriente continua | [V] |
| $\boldsymbol{P_p}$ | Potencia del panel fotovoltaico | [W] |
| $\boldsymbol{\eta_p}$ | Eficiencia del panel | [-] |

# Índice general

Agradecimientos ..... ii
Resumen ..... iii
Abstract ..... iv
Glosario ..... v
Nomenclatura ..... vi
Índice general ..... vii
Índice de figuras ..... ix
Índice de tablas ..... xi
1. Introducción ..... 12
1.1. Justificación del tema: ..... 12
1.2. Descripción del problema: ..... 13
1.3. Objetivo General ..... 13
1.3.1. Objetivos específicos ..... 13
2. Estado del arte ..... 14
2.1. Experimento con espejo convencionales y lámina de aluminio ..... 14
2.2. Análisis de incidencia de energía solar de paneles PV con reflectores curvos. ..... 17
2.2.1. Diseño de la curvatura del reflector ..... 20
2.4.2. Desempeño del reflector curvo ..... 21
2.3. Materiales reflectores de radiación ..... 23
2.3.1 Lámina reflectora selectiva de radiación Cool Mirror 3M ..... 23
2.3.2. Estudio de reflectividad de distintos materiales ..... 26
3. Instrumentos de medición y dispositivos empleados ..... 30
3.1. Datalogger ..... 30
3.2. Termistor ..... 30
3.3. Estación meteorológica ..... 31
3.4. Piranómetros ..... 32
3.5. Shunt ..... 32
3.6. Divisor de tensión ..... 34
4. Diseño experimental ..... 38
4.1. Montaje inicial ..... 38

4.2. Esquema de conexiones de la planta de generación ..... 38
4.3. Error experimental ..... 40
4.4. Modificaciones y configuración experimental ..... 42
4.4.1. Variables de medición ..... 43
5. Resultados y conclusiones ..... 51
5.1. Comparación lámina reflectora aluminio y 3M ..... 51
6. Bibliografía ..... 58
7. Anexos ..... 59
7.1. ANEXO A: Tablas experimento Bangladés ..... 59
7.2. ANEXO B: Ficha técnica Cool Mirror Film 330 ..... 61
7.3. Anexo C: Ficha Técnica termistor ..... 62
7.4. Anexo D: Ficha Técnica Panel fotovoltaico ..... 62
7.5. Anexo E: Especificaciones técnicas CR1000 ..... 63
7.6. Anexo F: Cálculo del error ..... 64

# Índice de figuras

Figura 1.1: Porcentaje de participación de la tecnología solar fotovoltaica en el tiempo..... 12
Figura 2.1-Esquema general del experimento [6]..... 14
Figura 2.2 Equipos utilizados en el experimento [6]..... 15
Figura 2.3 Gráfico de potencia para panel con y sin espejo reflector..... 16
Figura 2.4 Gráfico de potencia de panel con y sin lámina de aluminio reflectora..... 16
Figura 2.5 Gráfico de potencia del panel con reflector espejo y lámina de aluminio..... 17
Figura 2.6 Caso (a), panel PV sin reflector [7]..... 18
Figura 2.7 Caso (b), panel PV con reflector plano [7]..... 18
Figura 2.8 Caso (c), panel PV con reflector curvo [7]..... 19
Figura 2.9 Representación del ángulo solar máximo y su relación con la curvatura del reflector [7]. ..... 20
Figura 2.10 Parámetros de diseño del reflector curvo [7]. ..... 21
Figura 2.11 Paneles con reflectores: En la parte superior se muestra la configuración panel PV con reflector plano y el parte inferior con reflector curvo [7]..... 22
Figura 2.12 Representación de los resultados experimentales [7]..... 22
Figura 2.13 Reflectividad hemisférica total según longitud de onda y ángulo de incidencia [8]..... 24
Figura 2.14 Diseño RAIS WAVE de TenKsolar [9]. ..... 24
Figura 2.15 Aumento de potencia en panel PV convencional y al hacer uso de reflector 3M en estructura RAIS Wave [9]. ..... 25
Figura 2.16 LCPV 3x Sun de JX Crystals, con seguidor de un eje [9]. ..... 26
Figura 2.17 Medición de potencia panel PV convencional y con diseño de reflectores 3x Sun Cool mirror [9]..... 26
Figura 2.18 Esquema del montaje experimental [10]..... 28
Figura 2.19 Reflectancias espectrales de aluminio de alta reflectividad, papel aluminio y papel Mylar [10] ..... 29
Figura 3.1 A la izquierda se puede apreciar la conexión de medición de cable único y a la derecha la conexión diferencial [11]..... 30
Figura 3.2 Curva característica de termistor PTC y NTC [13]. ..... 31
Figura 3.3 Curva de calibración Shunt N°1..... 33
Figura 3.4 Curva de calibración Shunt N°2..... 33
Figura 3.5 Dispositivos Shunt con su caja de acrílica de protección. ..... 34
Figura 3.6 Esquema divisor de tensión diferencial. ..... 34
Figura 3.7 Divisor de tensión diferencial..... 36
Figura 3.8 Curva de calibración del divisor de tensión N°1..... 36
Figura 3.9 Curva de calibración del divisor de tensión N°2..... 37
Figura 4.1 A la izquierda con el N°1 los paneles PV con estructura de reflectores y a la derecha con el N°2 el panel PV sin reflector [16]. ..... 38
Figura 4.2 Esquema de conexiones eléctricas planta de generación..... 39
Figura 4.3 Elemento de seguridad N°1, interruptor automático AC..... 40
Figura 4.4 Elemento de seguridad N°2, por el interruptor automático y diferencial de lado izquierdo ..... 40

Figura 4.5 Caja metálica con los instrumentos de medición..... 43
Figura 4.6 Conector T MC4, utilizado para la duplicación de bornes del panel PV..... 44
Figura 4.7 Diagrama eléctrico de conexión para sensor shunt y de tensión ..... 45
Figura 4.8 Ubicación del termistor en el panel PV. ..... 46
Figura 4.9 Sensor 083E-L empleado para las mediciones de temperatura ambiente en la estación meteorológica. ..... 46
Figura 4.10 Piranómetro utilizado en panel PV con reflector. ..... 47
Figura 4.11 Panel PV con reflector de aluminio. ..... 48
Figura 4.12 Esquema Panel PV-Reflector para la optimización de la inclinación del reflector..... 49
Figura 4.13 Carta solar estereométrica de Santiago de Chile ..... 50
Figura 5.1 Potencia generada y temperatura de paneles PV CR y SR de papel aluminio, y temperatura ambiente para un día despejado. ..... 52
Figura 5.2 Potencia generada y temperatura de paneles PV CR y SR de 3M, y temperatura ambiente para un día despejado. ..... 52
Figura 5.3 Radiación solar incidente en los paneles PV CR y SR de 3M y Aluminio, para un día despejado ..... 55
Figura 5.4 Eficiencia de operación de panel CR y sin reflector de aluminio, para aun día despejado. ..... 55
Figura 5.5 Eficiencia de operación de panel CR y sin reflector 3M, para aun día despejado. ..... 56
Figura 5.6 Reflector de aluminio ..... 57
Figura 7.1 Ficha técnica Cool Mirror Film 330 de 3M ..... 61
Figura 7.2 Ficha Técnica Termistor Campbell Scientific 110 PV-L. ..... 62
Figura 7.3 Ficha técnica del panel fotovoltaico Stärkee JS 250M. ..... 63
Figura 7.4 Especificaciones técnicas Datalogger CR1000..... 63

# Índice de tablas

Tabla 2-1 Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico ..... 15
Tabla 2-2 Largo efectivo de radiación incidente en el panel, según ángulo de elevación solar y tipo de reflector ..... 19
Tabla 2-3 Características generales del experimento ..... 23
Tabla 2-4 Instrumento utilizados en las mediciones ..... 27
Tabla 2-5 Reflectividad global de distintos materiales reflectivos ..... 29
Tabla 3-1 Valores de las resistencias eléctricas para el divisor de tensión N°1. ..... 35
Tabla 3-2 Valores de las resistencias eléctricas para el divisor de tensión N°2. ..... 35
Tabla 4-1 Factor de multiplicación de calibración aplicado en el programa de mediciones del datalogger ..... 44
Tabla 5-1 Resumen comparativo de operación de panel con y sin reflector, Cool Mirror 3M y aluminio ..... 54
Tabla 7-1 Mediciones para panel con y sin espejo reflector ..... 59
Tabla 7-2Mediciones para panel con y sin lámina de aluminio reflectora ..... 60
Tabla 7-3Mediciones de panel bajo sombreado parcial con y sin espejo reflector ..... 60
Tabla 7-4Mediciones de panel con espejo y lámina de aluminio reflectoras ..... 61

# 1. Introducción

## 1.1. Justificación del tema:

La demanda energética se encuentra en alza a nivel mundial, esto sumado a la mayor conciencia medioambiental y el uso de energías limpias han fomentado el uso de las ERNC. En Chile esto se ha reforzado con políticas energéticas, la Ley N°20.257 exige que al 2025, el 10% de la matriz energética a retirar debe corresponder a las ERNC, lo que hasta el momento ha sido altamente sobrepasado por un 259% de lo planificado, por lo que en octubre del 2013 se promulga la Ley N°20.698 que eleva la exigencia a un 20% para el 2025 de ERNC a retirar de la matriz energética [1].

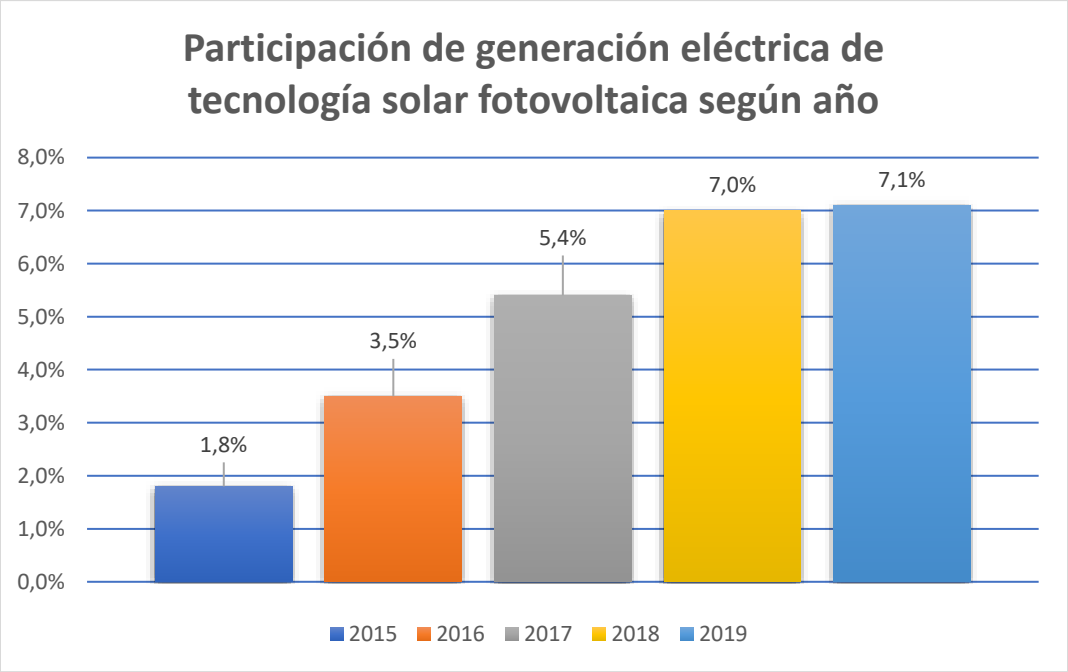


*Figura 1.1: Porcentaje de participación de la tecnología solar fotovoltaica en el tiempo.*

Hasta agosto del año 2019 exista una participación de un 7,1% en cuanto a la generación eléctrica en base a tecnología solar fotovoltaica, y se espera que vaya en aumento, de acuerdo a los antecedentes mostrados en la Figura 1.1, también por el descenso de costos continuo que se ha dado en las instalaciones de esta tecnología [2] y por la política energética 2050 que requerirá que al menos el 70% de la generación eléctrica nacional provenga de energías renovables, donde se estima que el 40% corresponderá a ERNC [3], fomentando la instalación a grandes y pequeñas escalas.

Una motivación importante es que Chile se encuentra posicionado dentro los países que mayor radiación reciben en el mundo [4], en donde en localidades como el desierto de Atacama podemos encontrar una radiación global horizontal de 7,15 $[\frac{kWh}{m^2\ día}]$ y en localidades como Santiago

centro 5,09 $[\frac{kWh}{m^2\ día}]$. Otro factor que promueve el uso de generación de energía mediante la tecnología solar fotovoltaica, es la interconexión del Sistema interconectado del Norte Grande y el Sistema interconectado central, que han dado origen al Sistema eléctrico nacional el año 2017 [5], dando mayor oportunidad de operación a plantas solares, de tal manera de que la energía producida en el norte pueda ser consumida.

Debido a los antecedentes presentados, es de vital importancia obtener el comportamiento de las variables características de un sistema fotovoltaico en operación, incluyendo el caso en el que se anexan placas reflectoras, para cuantificar su efecto.

## 1.2. Descripción del problema:

El alza en el uso de las ERNC gracias a las políticas energéticas a nivel nacional y la reducción de costos en tecnologías fotovoltaicas, abren paso a la investigación en esta materia. En particular a sistemas fotovoltaicos no convencionales que incluyen laminas reflectoras, de los que no se tiene suficientes registros de las variables características en la operación de estos sistemas.

## 1.3. Objetivo General

Chile se encuentra dentro de los países con mayor potencial de energía solar, además de contar con políticas energéticas que fomentan la utilización de las ERNC. Debido a esto y al descenso continuo de los costos de tecnología solar, han permitido el mayor desarrollo e investigación sobre alternativas como lo son los paneles fotovoltaicos con placas reflectoras de radiación.

El objetivo general del proyecto es desarrollar un sistema de medición para las variables características de un sistema fotovoltaico con y sin placa reflectora, que permita comparar sus efectos en la operación y generación de energía eléctrica.

### 1.3.1. Objetivos específicos

1) Establecer el estado del arte de sistemas fotovoltaicos con placas reflectoras y sus efectos en la generación de energía eléctrica.

2) Diseñar experimentalmente un sistema de medición y registro de las variables características del panel fotovoltaico.

3) Implementar un sistema de medición y registro de las variables características del panel fotovoltaico a utilizar con y sin placa reflectora.

4) Cuantificar y analizar los efectos de las placas reflectoras en la eficiencia y generación de energía eléctrica del panel fotovoltaico.

# 2. Estado del arte

## 2.1. Experimento con espejo convencionales y lámina de aluminio

El experimento fue realizado por un equipo de la "Sylhet university international" en el país de Bangladés. Este consistió en aumentar la radiación incidente del panel mediante tres reflectores de los cuales dos son curvos y uno es plano. Aquellos son ubicados estratégicamente para potenciar el efecto reflectivo en tres periodos del día, amanecer, mediodía y atardecer, tal como se muestra en la Figura 2.1.

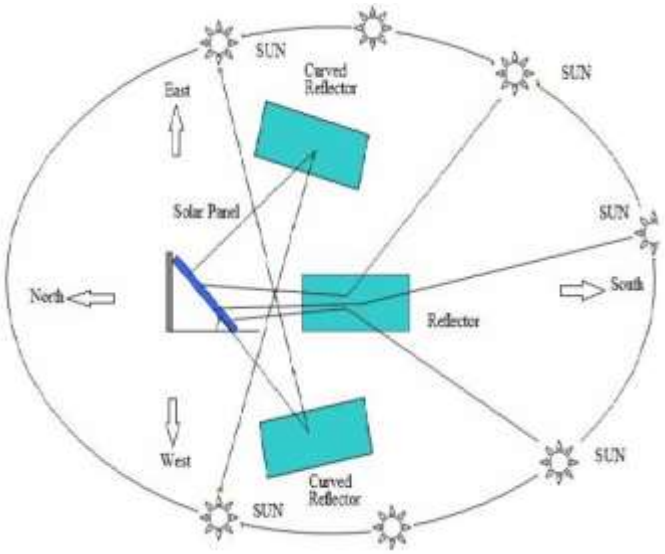


*Figura 2.1-Esquema general del experimento [6].*

Para realizar las mediciones carácteristicas utilizaron regla , compás y multitester, registrando angulo de inclinación, $V_{oc}$ , $I_{sc}$ para el panel con y sin reflectores. El panel fue orientado hacia el Sur, con 45° de inclinación y los datos fueron obtenidos en enero, a través de un multímetro con mediciones simultaneas para ambos PV [6]. Los equipos utilizados se pueden ver en la Figura 2.2 y las especificaciones técnicas del panel en la Tabla 2-1.

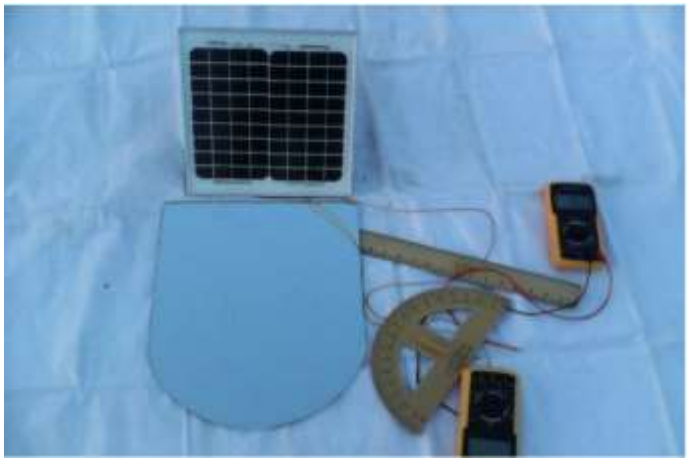

*Figura 2.2 Equipos utilizados en el experimento [6].*

| Especificaciones Panel PV | |
|---|---|
| Modelo | T-10M |
| Potencia nominal[W] | 10 |
| $I_{sc}$ [A] | 0,61 |
| $V_{oc}$ [V] | 22,5 |
| Maximum power current [A] | 0,56 |
| Maximum power voltage [V] | 18 |
| Dimensión [mm] | 320x290x18 |

*Tabla 2-1 Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico*

En la Figura 2.3 y Figura 2.4 podemos observar los gráficos correspondientes a la comparación del desempeño de los módulos PV, tanto para el espejo como la lámina de aluminio. En ambos casos se ve un aumento de la potencia generada por los paneles, y se puede apreciar que, para horas de la mañana hasta la tarde, comprendido desde aproximadamente de las 9:30 hasta las 16:30 [h] la potencia solo varía de los 10 [W] a los 14 [W], y que sin reflectores los hacer aproximadamente de los 7[W] a los 12[W] para el mismo horario. Es necesario precisar que la potencia fue calculada como $P = I_{sc} \cdot V_{oc}$, ya que los paneles PV no estaban sometido bajo carga, por lo tanto, son datos que no se obtendrían en operación real del panel PV, pero nos acerca al efecto de añadir reflectores.

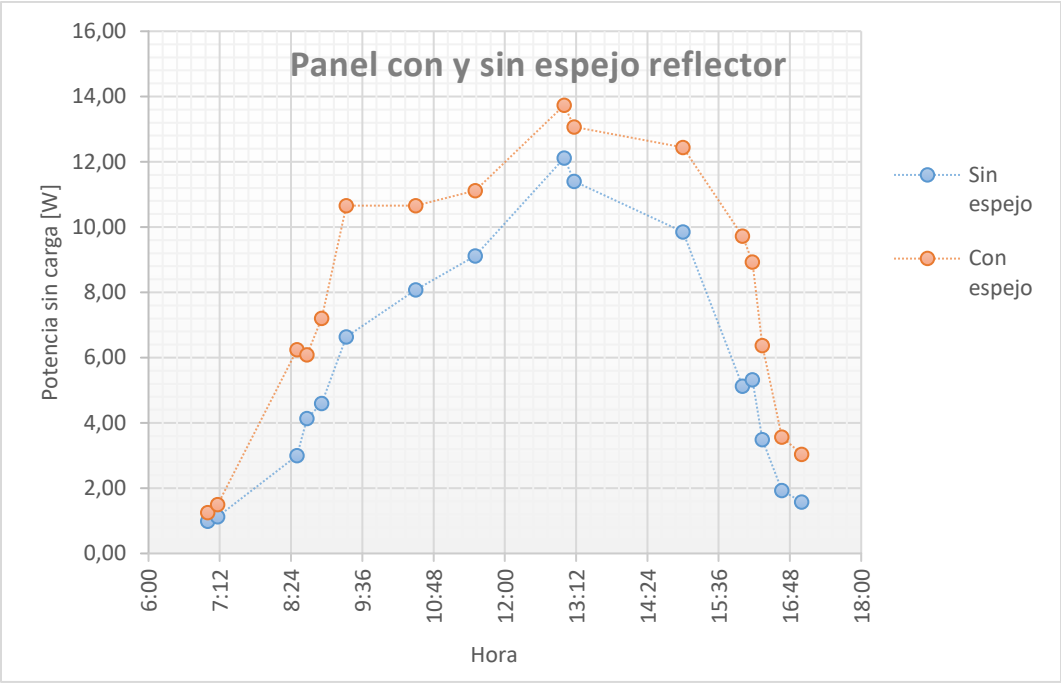


*Figura 2.3 Gráfico de potencia para panel con y sin espejo reflector*

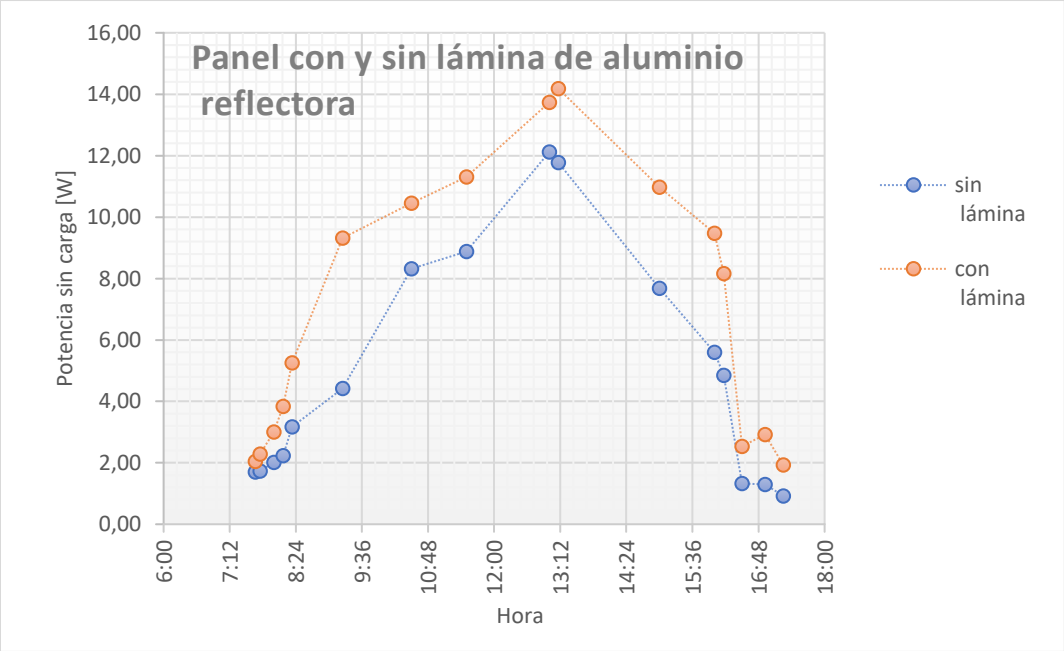


*Figura 2.4 Gráfico de potencia de panel con y sin lámina de aluminio reflectora*

Otra parte del experimento fue comparar ambos paneles PV con los dos tipos de reflectores utilizados anteriormente, el gráfico correspondiente se puede ver en la Figura 2.5. Se observa que ambos reflectores tanto espejo como lámina de aluminio se desempeñan de manera similar, presentando una ínfima brecha para la potencia obtenida. De manera adicional, se calcula la energía

en watt-hora que hubiera generado el panel, omitiendo que la potencia obtenida es sin carga. De esta forma el panel con reflector espejo generó [7] 105,3 [Wh] y el con lámina de aluminio 103,6 [Wh].

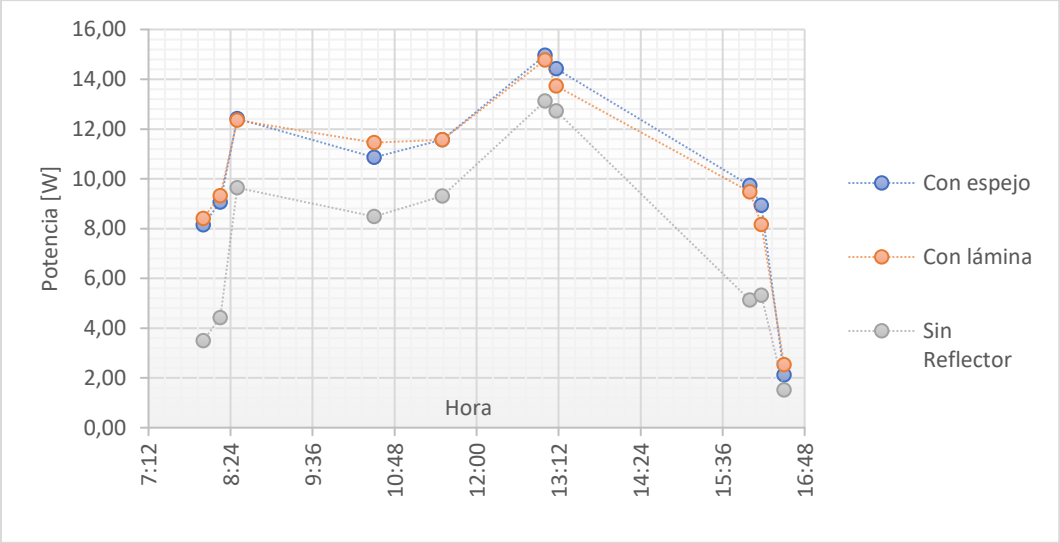


*Figura 2.5 Gráfico de potencia del panel con reflector espejo y lámina de aluminio*

Este experimento nos acerca al beneficio del uso de reflectores de espejos y láminas de aluminio, sin embargo, la obtención de datos sería más provechoso si los paneles estuvieran sometidos bajo carga, ya que es una condición de operación real, y si se tuviera un mayor número de mediciones en el día o en un tiempo más prolongado. También hay que recalcar que se hizo uso de tres reflectores, dando un enfoque rural o un uso doméstico de la aplicación de reflectores en el panel PV.

## 2.2. Análisis de incidencia de energía solar de paneles PV con reflectores curvos.

La investigación fue realizada por la escuela de ingeniería eléctrica de la universidad de KAIST, ubicada en Corea del Sur. Esta consistió en el diseño de un reflector curvo, y compararlo con un reflector plano y sin el uso de reflectores, en lo que se refiere a el aumento de la radiación incidente en un panel PV.

En primera instancia realizan un modelo a nivel geométrico y óptico del desempeño de tres casos; (a) panel PV sin reflector; (b) panel PV con reflector; y (c) panel PV con reflector curvo [7].

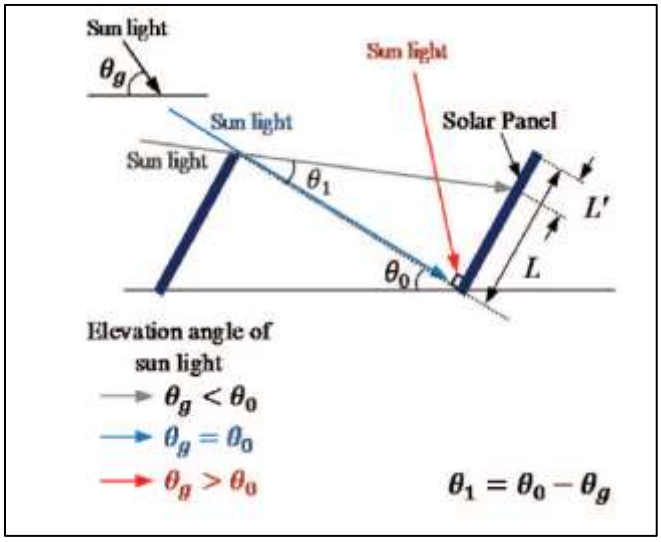


*Figura 2.6 Caso (a), panel PV sin reflector [7].*

En donde $\theta_0$ representa el ángulo del reflector plano, $\theta_g$ es el ángulo de elevación del sol, y $L, L', L'', L'''$ representan los largos efectivos "$L_{ef}(\theta_g)$" ,que relaciona la radiación incidente producto del ángulo de elevación del sol y el tipo de reflector o la ausencia de este. Estas variables son representadas en la Tabla 2-2.

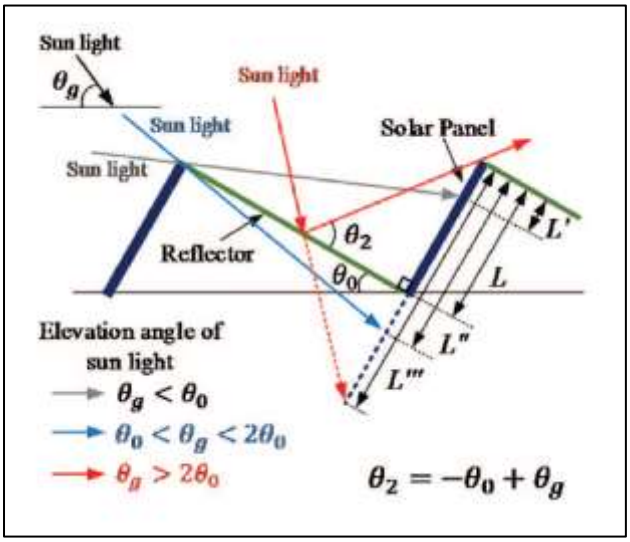


*Figura 2.7 Caso (b), panel PV con reflector plano [7].*

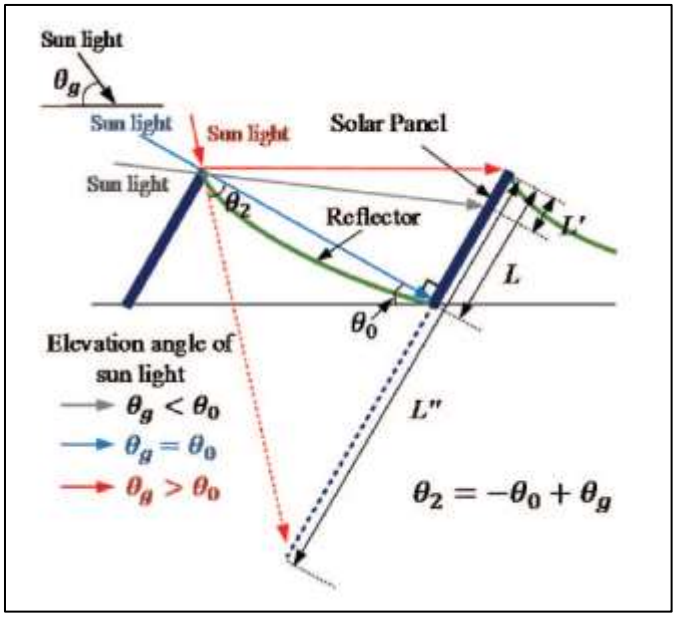


*Figura 2.8 Caso (c), panel PV con reflector curvo [7].*

| $L_{ef}\ (\theta_g)$ | Sin reflector | Reflector Plano | Reflector Curvo |
|---|---|---|---|
| $\theta_g\ < \theta_0$ | L´ | L´ | L´ |
| $\theta_g\ = \theta_0$ | L | L | L |
| $\theta_0\ < \theta_g\ <\ 2\theta$ | L | L´´ | L´´ |
| $2\theta_0\ \leq \theta_g$ | L | L´´´ | L´´ |

*Tabla 2-2 Largo efectivo de radiación incidente en el panel, según ángulo de elevación solar y tipo de reflector*

De forma general se pueden distinguir cuatro situaciones en función del ángulo de elevación solar y el ángulo de inclinación del panel:

-*Situación 1*: $\theta_g < \theta_0$ , El panel vecino bloquea parte de la luz solar y el reflector no tiene participación. Los tres casos (a), (b), (c) presentan el mismo $L_{ef}\ (\theta_g) = L'$.

-*Situación 2*: $\theta_g = \theta_0$, El reflector no tiene participación, pero todos los rayos solares inciden en el panel, presentando el mismo $L_{ef}\ (\theta_g) = L$ en cualquier caso.

-*Situación 3:* $\theta_0 <\ \theta_g < 2\theta_0$, Toda la luz reflejado por los reflectores, tanto planos como curvos inciden en el panel PV obteniendo un $L_{ef}\ (\theta_g) = L''$ que es mayor al caso de sin reflector.

-*Situación 4:* $2\theta_0 \leq\ \theta_g$, Parte de la luz proveniente del reflector plano no incide en el panel PV, mientras que todos los rayos provenientes del reflector curvo inciden en el panel PV, obteniendo distintos $L_{ef}\ (\theta_g)$ para los tres casos.

### 2.2.1. Diseño de la curvatura del reflector

El diseño busca que el reflector curvo aumente la eficiencia del reflector en comparación a uno plano, es decir, lograr reflejar los rayos del Sol cuando se encuentra a una altura mayor a la crítica $2\theta_0$y hacerlos incidir en el panel PV asociado. Por lo tanto, la curvatura dado por el ángulo $\theta_s$, se puede relacionar con la altura máxima del Sol como indica la ecuación (2.1):

$$\theta_{g,max} = 2\theta_s \tag{2.1}$$

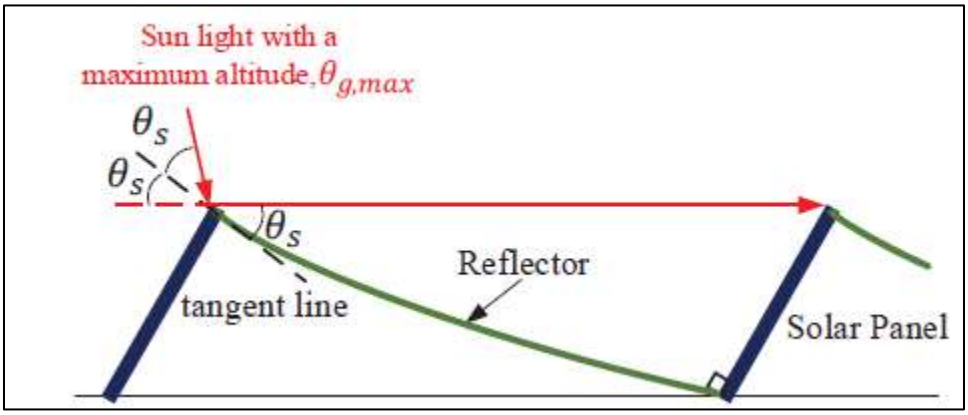


*Figura 2.9 Representación del ángulo solar máximo y su relación con la curvatura del reflector [7].*

Para diseñar el reflector curvo se establecen ciertos parámetros mostrados en la Figura 2.10. La curvatura del reflector está determinada completamente por los parámetros L y H, en donde, H, R y $\theta_c$ , son altura, radio de curvatura y ángulo entre la línea tangente en el punto final del reflector y la línea que une los dos extremos del reflector respectivamente.

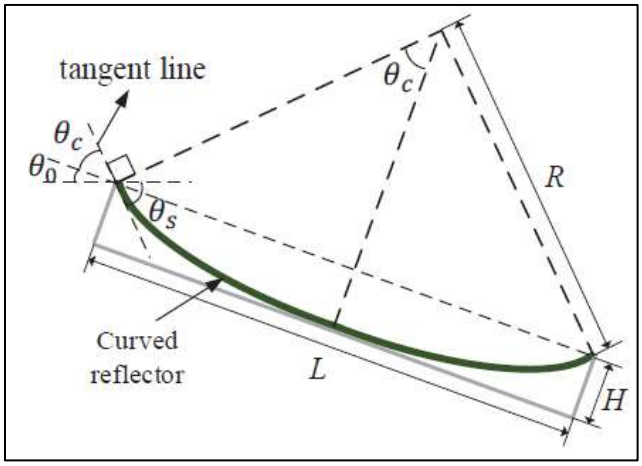


*Figura 2.10 Parámetros de diseño del reflector curvo [7].*

Los parámetros $\theta_S$ , $\theta_0$ y $L$ están determinados por el entorno de instalación y especificaciones del panel solar. Estos parámetros de diseño se pueden relacionar con las siguientes ecuaciones:

$$H = R(1 - cos\theta_c) \tag{2.2}$$

$$R = \frac{L}{2sen\theta_c} \tag{2.3}$$

$$\theta_c = \theta_s - \theta_0 \tag{2.4}$$

### 2.4.2. Desempeño del reflector curvo

Las características generales del experimento y parámetros de diseño del reflector se pueden ver en la Tabla 2-3. El experimento consistió en medir la iluminancia en el panel PV con reflector plano, curvo y sin reflector. Para una mayor representatividad de la iluminancia incidente, se divide el área del panel en 22x11 puntos a medir con el luxómetro y se normalizan con referencia para un ángulo de altura solar de 60°. Los datos son medidos para diferentes alturas solares, y para simplificar estas mediciones se gira el kit panel PV-Reflector mostrado en la Figura 2.11 obteniendo distintos ángulos de incidencia en el panel PV [7].

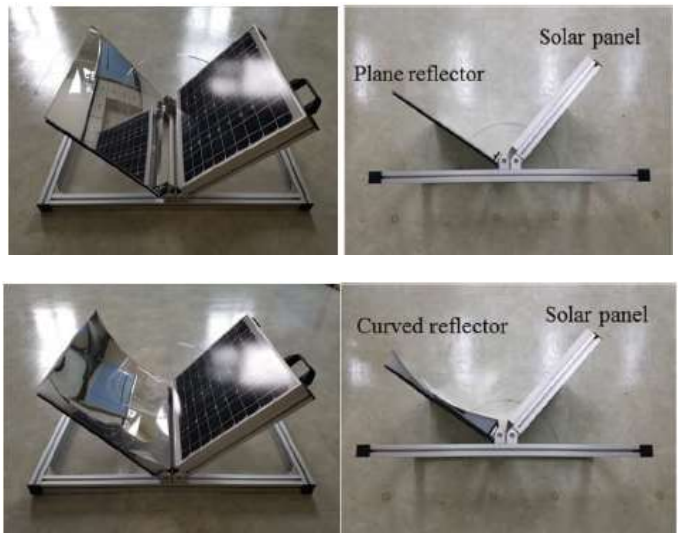


*Figura 2.11 Paneles con reflectores: En la parte superior se muestra la configuración panel PV con reflector plano y el parte inferior con reflector curvo [7].*

Los resultados obtenidos se observan en la Figura 2.12. En donde se aprecia que el reflector tipo curvo es que el que puede captar y hacer incidir los rayos solares en el panel PV de una forma óptima. Según el estudio, la relación entre la potencia luminosa para el experimento es de 1: 1,20: 1,23 para el caso sin reflector, reflector plano y curvo respectivamente.

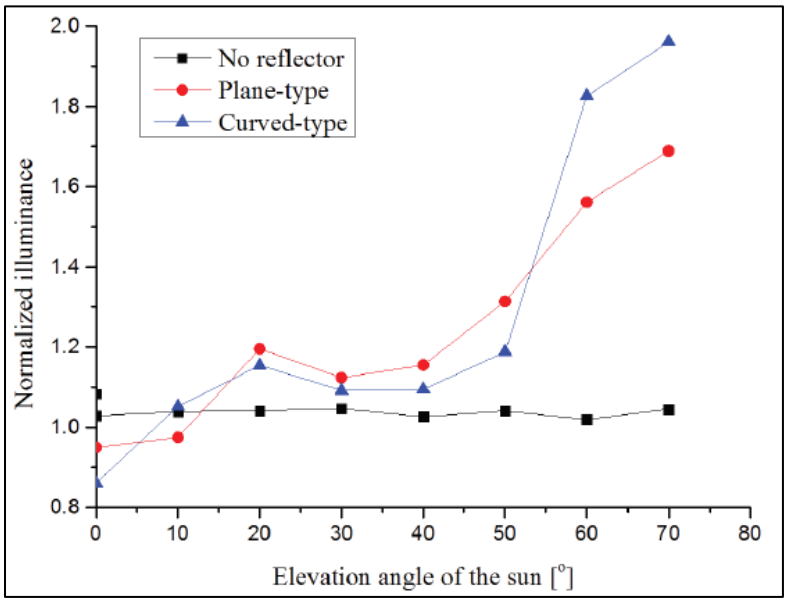


*Figura 2.12 Representación de los resultados experimentales [7].*

| Características generales del experimento | |
|---|---|
| Dimensiones [mm] | 535x425 |
| Material | Acrílico |
| Reflectividad | 85% |
| Inclinación PV [°] | 60 |
| Inclinación Reflector [°] | 30 |
| H [mm] | 12,5 |
| $\theta_c$ [°] | 7,5 |

*Tabla 2-3 Características generales del experimento*

En conclusión, el experimento nos muestra una solución innovadora al problema de la limitación del reflector plano para grandes ángulos solares y la configuración considera una geometría a nivel de plantas PV. Aun así, el experimento tiene falencias en cuanto a que no considera, que el reflector curvo puede reflejar los rayos de forma no uniforme en los paneles, omitiendo factores de temperatura de celda y datos eléctricos de operación del panel.

## 2.3. Materiales reflectores de radiación

### 2.3.1 Lámina reflectora selectiva de radiación Cool Mirror 3M

Cool Mirror Film 330 fabricada por 3M ™, es una lámina polimérica diseñada para aplicaciones solares, especiales para células solares de silicio. La lámina posee la propiedad de reflejar un rango del espectro electromagnético, filtrando el espectro infrarrojo, evitando así, el sobrecalentamiento de las células solares, ya que el infrarrojo es una parte del espectro que no logra transformar el módulo PV. La reflectividad de la lámina varía según longitud de onda y ángulo de incidencia, esto se puede apreciar detalladamente en la Figura 2.13 [8]

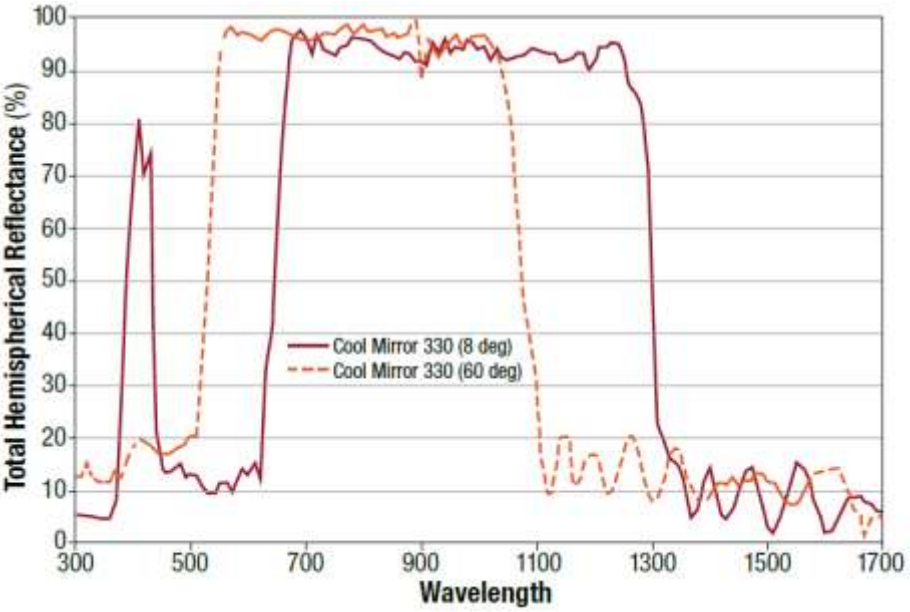


*Figura 2.13 Reflectividad hemisférica total según longitud de onda y ángulo de incidencia [8].*

Para más detalles técnicos puede dirigirse al ANEXO B: Ficha técnica Cool Mirror Film 330

### 2.3.1.1. Proyectos implementados con láminas selectivas de radiación 3M

#### 2.3.1.1.1. RAIS WAVE

La empresa TenKsolar ha desarrollado e implementado tecnologías LCPV sin seguimiento, las que han denominado "RAIS WAVE" debido a la forma de ola de la estructura, como se puede apreciar en la Figura 2.14. Estos reflectores han aumentado la potencia de salida de los paneles PV al llenar los espacios disponibles debido al sombreado provocado por estos mismos.

*Figura 2.14 Diseño RAIS WAVE de TenKsolar [9].*

Con este diseño se logró un incremento de hasta un 60% de la potencia máxima, como se puede apreciar en la Figura 2.15 al usar los reflectores Cool Mirror 330 de 3M.

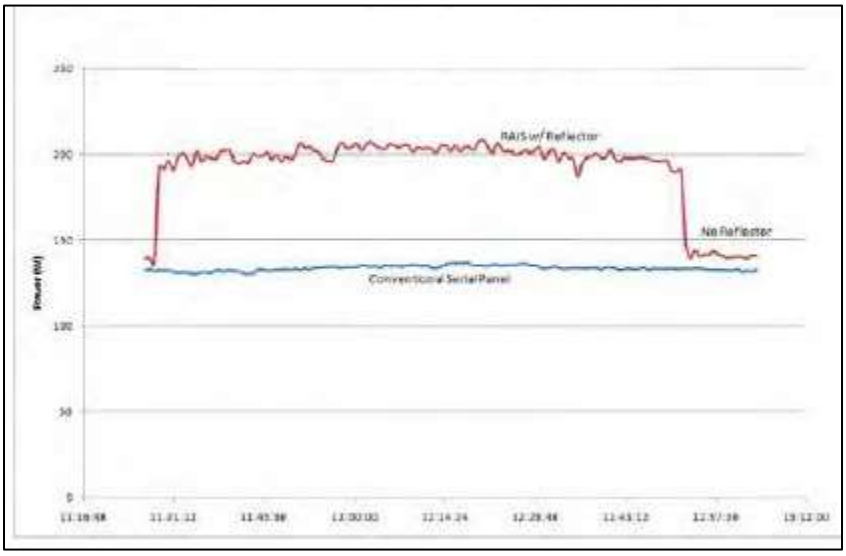


*Figura 2.15 Aumento de potencia en panel PV convencional y al hacer uso de reflector 3M en estructura RAIS Wave [9].*

Se estima como orden de magnitud que los costos un módulo PV de silicio de $200[W]$ puede costar $300\ \left[\frac{USD}{m^2}\right]$ $o$ $1{,}5\ \left[\frac{USD}{W}\right]$. Los reflectores con estructura pueden costar alrededor de $20\ \left[\frac{USD}{m^2}\right]$ y aumentar la potencia máxima del módulo en al menos $100\ [W]$. Si se supone un aumento de potencia anual de $50\ [W/m^2]$, el costo de la lámina reflectora puede ser inferior a $0{,}4\ \left[\frac{USD}{W}\right]$ [9].

**2.3.1.1.2. 3X SUN**

Otra aplicación de la lámina reflectora Cool mirror 3M, fue en el concentrador "3x Sun" diseñado por JX Crystals con seguidor de eje único, ubicado en el edificio de Science & Engineering de la UNLV (University of Nevada Las Vegas) como se aprecia en la Figura 2.16. Este diseño consta de celdas de silicio cortadas a 1/3 de tamaño de celda y separado por 2/3 de distancia de celda para que así tenga un área de superficie equivalente a módulo PV convencional.

*Figura 2.16 LCPV 3x Sun de JX Crystals, con seguidor de un eje [9].*

Los resultados del proyecto fue un aumento del 100% de la potencia de salida, medidos en la UNLV como se muestra en la Figura 2.16, debido al aumento de la irradiancia solar por los reflectores.

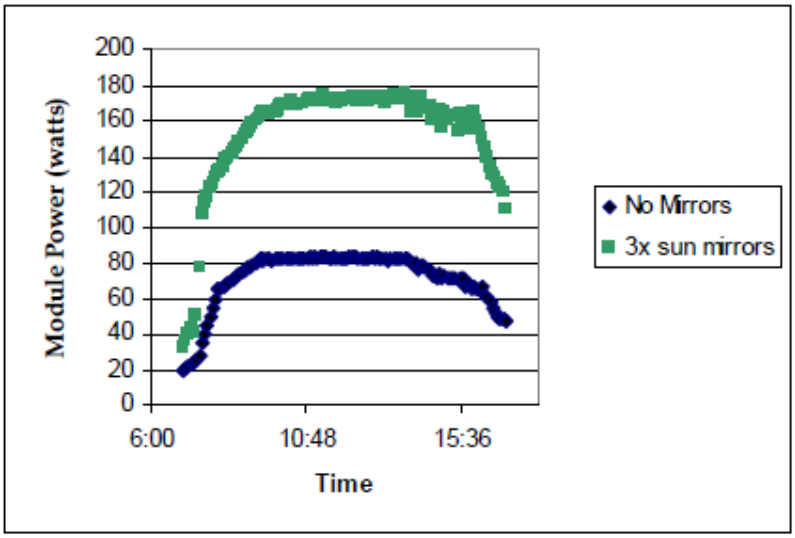


*Figura 2.17 Medición de potencia panel PV convencional y con diseño de reflectores 3x Sun Cool mirror [9].*

### 2.3.2. Estudio de reflectividad de distintos materiales

En la INENCO de Universidad Nacional de Salta, de Argentina realizaron estudios sobre la reflectancia espectral de algunos materiales que se aplican en concentradores solares. Para ello se hizo uso de variados instrumentos nombrados en la Tabla 2-4.

El esquema de montaje general se puede ver en la Figura 2.18 ,el cual sirve para tomar las mediciones en 4 etapas generales:

1) **Fijación del instrumento receptor:** Si se desea medir reflectancia espectral es utilizado el espectrómetro, mientras que para medir la reflexión global se utiliza el pirheliómetro.
2) ***Medición espectro de reflexión de muestra:*** En la ventana "A" de la esfera integradora se fija la muestra de estudio, en la ventana "C" se fija la fuente luminosa y en la "B" la referencia negra, así se obtiene el espectro de reflexión de la muestra denominado $I_S$.
3) ***Medición espectro de reflexión de la esfera:*** Se repite el paso anterior, pero intercambiando los instrumentos de la ventana "C" al "B" y del "B" al "C", de esta manera se obtiene la reflexión del interior de la esfera denominado $I_r$.
4) ***Coeficiente de reflexión:*** Se obtiene el coeficiente de reflexión del material, expresado como $\frac{I_S}{I_r}$.
5) ***Repetición para cada muestra:*** Se repiten los pasos anteriores para cada muestra.

| Instrumento | Características |
|---|---|
| Esfera integradora | Modelo LI-12 de Lincoln Corp.<br>Recubrimiento interior de sulfato de bario, 100% reflectivo.<br>Diámetro esfera de 500[mm]. |
| Fuente luminosa | Lámpara Halógena<br>de potencia 10[W] y tensión 6[V]. |
| Fibra de óptica | Rango de 390-1100 [nm] |
| Tapa plástica | Referencia negra para el espectrómetro, recubierta con negro de humo. |
| Pastilla de vidrio | Referencia de Blanco Standard con una película de sulfato de bario sobre su superficie |
| Espectrómetro | Modelo LI-1800 con monocromador, de rango de 300-1100[nm]. Resolución de 2 [nm] y banda efectiva de 6[nm] |
| Pirheliómetro | Modelo LI-250. |

*Tabla 2-4 Instrumento utilizados en las mediciones*

Para obtener la reflectividad global se utiliza como receptor el Pirheliómetro, mientras que para la reflectividad espectral se usa el Espectrómetro. Los resultados obtenidos de la reflectividad global de cada muestra están en la Tabla 2-5 Reflectividad global de distintos materiales reflectivos Tabla 2-5 [10].

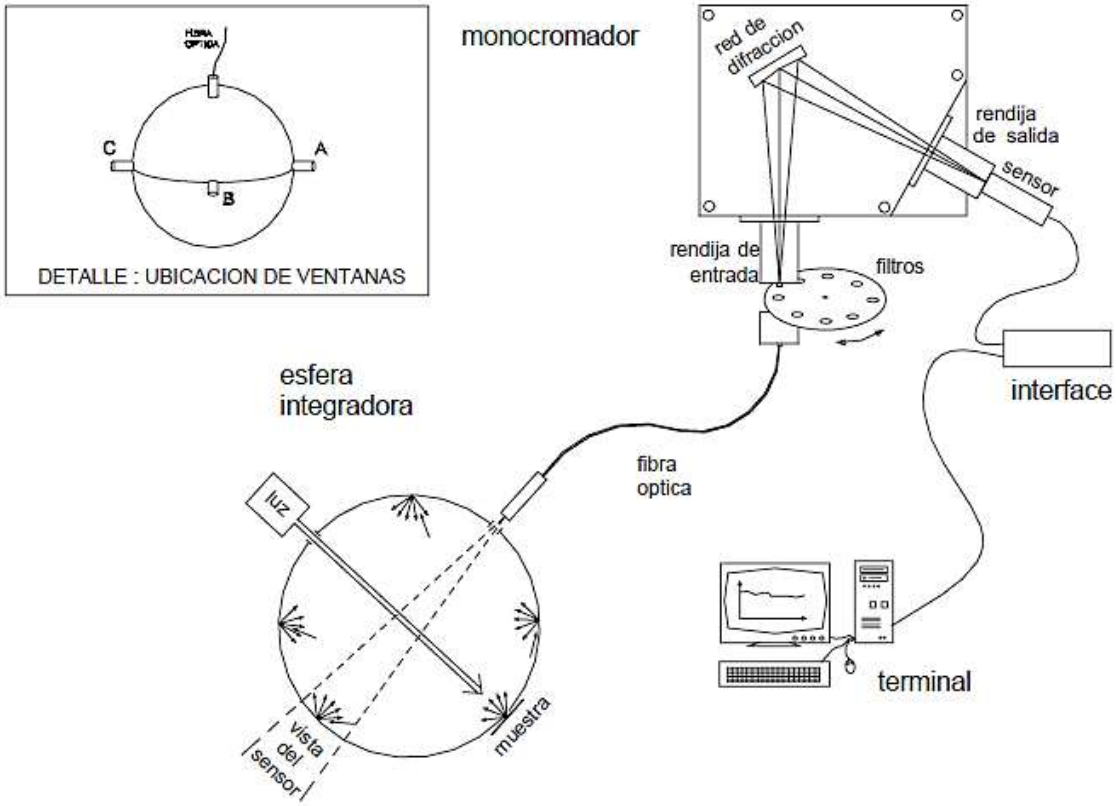


*Figura 2.18 Esquema del montaje experimental [10].*

| Material | Reflectividad global [-] | Material | Reflectividad global [-] |
|---|---|---|---|
| PVC Blanco | 0,871 | Fibra de vidrio pintada de blanco | 0,709 |
| Aluminio de alta reflectividad 1 | 0,839 | Espejo de vidrio 2[mm] | 0,795 |
| Aluminio de alta reflectividad 2 | 0,853 | Espejo de vidrio 3[mm] | 0,754 |
| Aluminio de alta reflectividad 3 | 0,82 | Espejo de vidrio 4[mm] | 0,712 |
| Chapadur prepintado blanco | 0,741 | Acero inoxidable | 0,572 |
| Chapa galvanizada | 0,588 | Mylar (Cuba) | 0,833 |
| Chapa pintada de blanco nueva | 0,582 | Papel de aluminio (Cuba) | 0,799 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Chapa pintada de blanco envejecida | 0,656 | - | - |

*Tabla 2-5 Reflectividad global de distintos materiales reflectivos*

La Figura 2.19**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la reflectancia espectral de tres tipos de aluminio de alta reflectividad, papel aluminio y papel Mylar. El aluminio 1 y 2 presentan patrones similares debido a la interferencia entre el material y la red difracción holográfica, aun así, el estudio de estos materiales presenta una reflectancia alta en donde los patrones más estables de reflectividad son dados por el Aluminio 3, papel aluminio y papel Mylar.

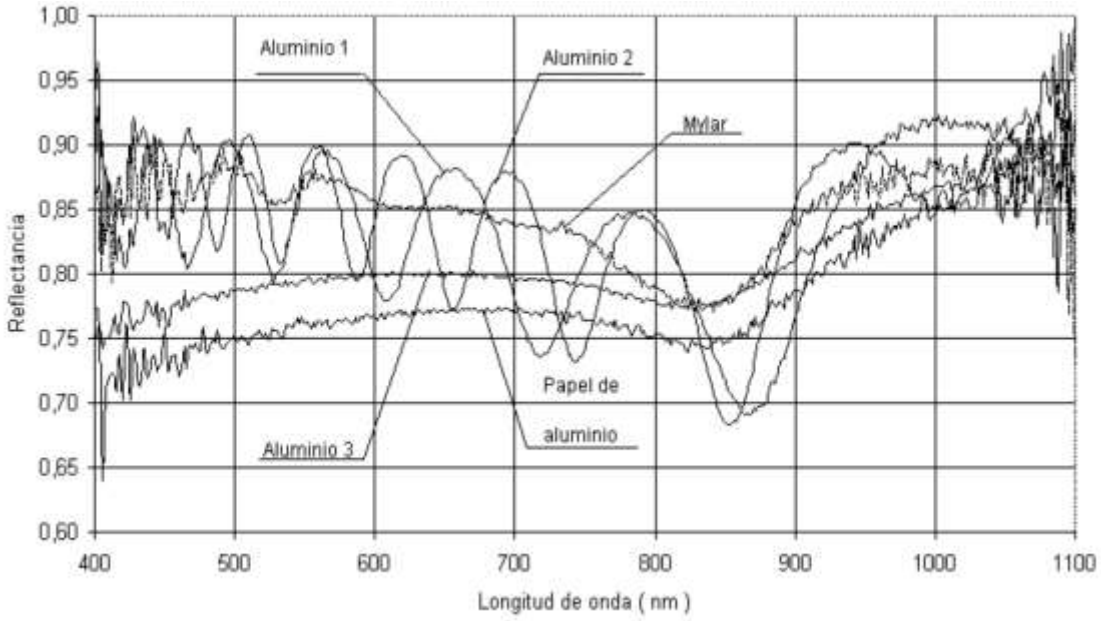


*Figura 2.19 Reflectancias espectrales de aluminio de alta reflectividad, papel aluminio y papel Mylar [10]*

En conclusión, se puede afirmar que existe diversidad de materiales con potencial en la reflectividad y aplicaciones solares. Además, que conociendo su reflectancia espectral se puede hacer una mejor selección del material dependiendo del tipo de aplicación y objetivos que se quieran lograr.

# 3. Instrumentos de medición y dispositivos empleados

## 3.1. Datalogger

El Datalogger o registrador de datos es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo, a través de señales exteriores captadas por sensores. Los registradores de datos generalmente poseen un microprocesador, una memoria interna para almacenar los datos y alguna interfaz.

En este trabajo es utilizado un datalogger Campbell Scientific CR1000, el cual es capaz de captar señales analógicas de tensión eléctrica de hasta 5[V] con una resolución que va de 0.67 [µV] hasta 1333 [µV], dependiendo si la conexión de medición es "diferencial" o de "cable único" [11]. La medición de cable único mide la diferencia de tensión entre un terminal "H" o "L" y la referencia a tierra del canal. La aplicación de esta configuración es adecuada para sistemas que carecen de ruido eléctrico y en donde se tiene cuidado de evitar las corrientes de tierra, ya que podrían generan falsas lecturas de medición. La medición diferencial mide la diferencia de tensión entre las dos terminales "H" y "L", esta forma de medición reduce el ruido en la medición en comparación a la medición de cable único. Las conexiones de medición se pueden ver en la Figura 3.1.

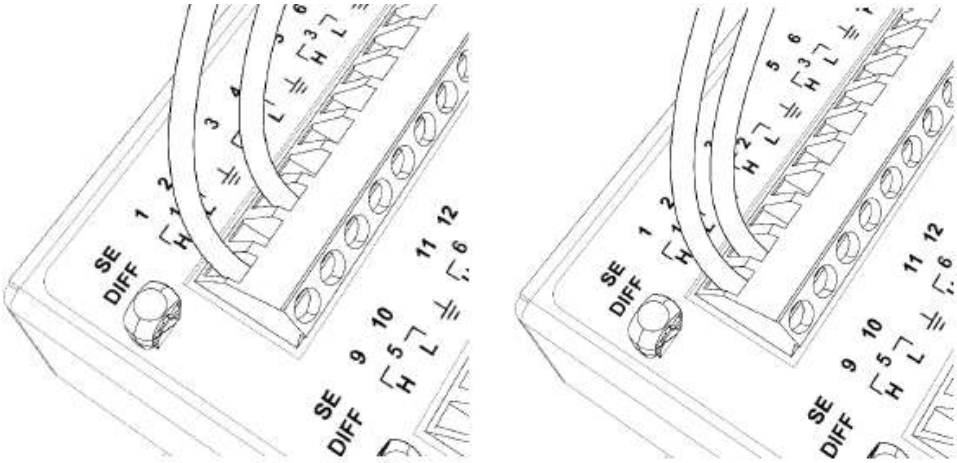


*Figura 3.1 A la izquierda se puede apreciar la conexión de medición de cable único y a la derecha la conexión diferencial [11].*

## 3.2. Termistor

El termistor es un sensor de temperatura por resistencia, estos están construidos en base a semiconductores y su nombre proviene de "Thermally Sensitive Resistor " [12].Este sensor se puede clasificar en dos tipos según su curva característica, **PTC** (Positive Temperature Coefficient), el cual tiene mayor linealidad, pero menor sensibilidad y las **NTC** (Negative Temperature Coefficient) el

cual tiene baja linealidad y mayor sensibilidad con respecto al anterior, además son los más comunes en el mercado. La representación general de los tipos de curva se ven en la siguiente Figura 3.2 :

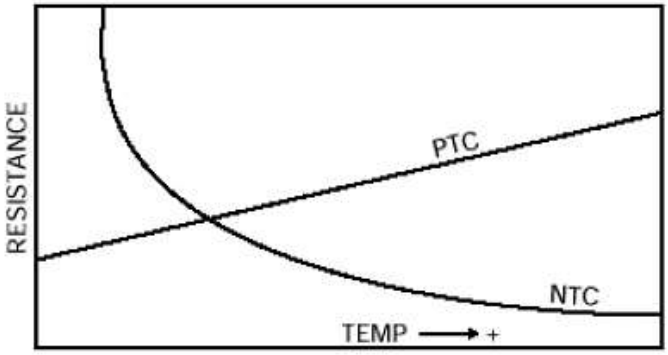


*Figura 3.2 Curva característica de termistor PTC y NTC [13].*

La representación de la curva de un termistor **NTC** se puede modelar con la ecuación (3.1) de Steinhart-Hart:

$$\frac{1}{T} = A + B\ (\ln R_T) + C\ (\ln R_T)^3 \tag{3.1}$$

En donde A, B y C son los coeficientes de la curva, que se pueden obtener mediante tablas empíricas del fabricante o por medio de un ensayo de laboratorio tomando tres pares de valores $R_T\ y\ T$, y resolviendo el sistema de 3 ecuaciones con 3 incógnitas. Esta ecuación también permite calibrar el instrumento.

Para el caso del experimento se utilizan dos termistores **NTC** modelos "110PV-L de Campbell Scientific", el cual es un sensor de temperaturas para superficies de conexión de hasta 4 hilos, compatible con datalogger Campbell Scientific. El termistor de este sensor se encuentra protegido por un disco de aluminio que cuenta con una superficie adherente, facilitando la instalación y transferencia de calor al sensor resistivo [14]. Para más detalles técnicos puede consultar el Anexo C: Ficha Técnica termistor

## 3.3. Estación meteorológica

A través de la estación meteorológica de la Universidad Técnica Federico Santa María Campus San Joaquín se obtienen mediciones de la temperatura ambiente y de radiación de plano inclinado POA a 45°. Dado a que la estación meteorológica ya estaba operativa y en estado óptimo, solo se descargan los datos de esta. La medición de temperatura ambiente es efectuada a través del

sensor 083E de Campbell Scientific y la medición POA a través de un piranómetro detallado en la siguiente sección.

## 3.4. Piranómetros

Se hace uso de dos piranómetros, un “CMP 10 de Kipp & Zonen” asociado a la estación meteorológica “RSR100 de Campbell Scientific” de la universidad con el cual se registra la irradiancia de plano inclinado POA, y un “LI-COR 200R” asociado a la irradiancia incidente en el panel PV con reflector y que los detalles de la configuración experimental se explicarán en la sección 4.4.

El piranómetro “LI-COR 200R” fue calibrado usando como referencia otro piranómetro “LI-COR 200R”, que estaba en óptimas condiciones operando en la estación meteorológica y que registraba la radiación horizontal. Para la calibración se usó la norma ISO 9847:1992 el cual detalla la metodología de calibración de un piranómetro, usando como referencia otro [15].

## 3.5. Shunt

El Shunt es un sensor de corriente, básicamente es una baja resistencia eléctrica del orden de mili ohmios y que es de precisión. Puede ser usado para medir tanto corriente continua como alterna y su principio de funcionamiento se rige por la ley de ohm, en donde la caída de tensión de sus extremos se asocia a la corriente que pasa a través de la resistencia conocida del Shunt, como muestra la siguiente ecuación:

$$\frac{V}{R_{shunt}} = I \tag{3.2}$$

Para el experimento se utilizan dos shunt, los cuales fueron calibrados utilizando una fuente de tensión y una resistencia variable, de tal modo que se obtienen distintas intensidades de corriente a través del shunt. Se hacen mediciones de la caída de tensión del shunt y la corriente que pasa a través del sensor como se muestra en Figura 3.3 y Figura 3.4. Luego aplicando una regresión lineal a cada uno de los gráficos se obtiene la resistencia de cada Shunt, obteniendo para el primero una resistencia de $R_{S1} = 992{,}85\ [\Omega]$ y el segundo $R_{S2} = 994{,}21\ [\Omega]$.

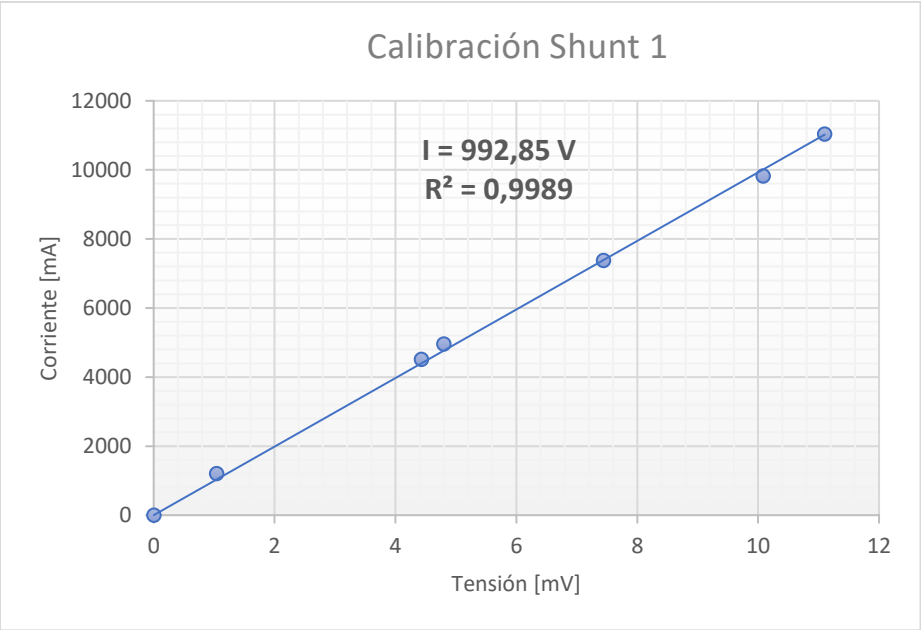


*Figura 3.3 Curva de calibración Shunt N°1*

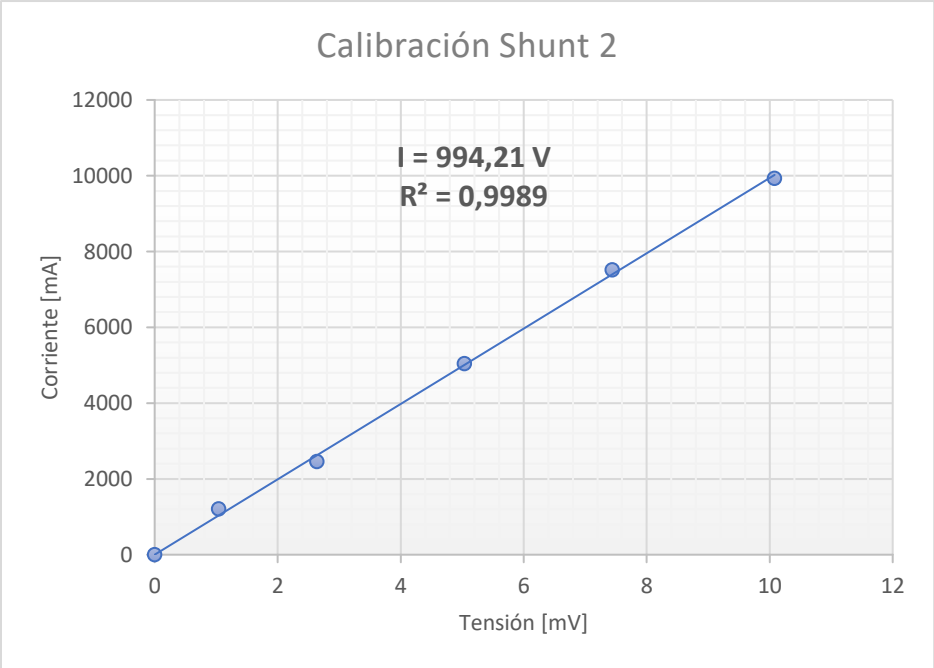


*Figura 3.4 Curva de calibración Shunt N°2*

Con el fin de aislar el Shunt y facilitar su instalación en la caja eléctrica se diseña una caja de acrílico de seguridad como se puede apreciar en la siguiente la Figura 3.5.

*Figura 3.5 Dispositivos Shunt con su caja de acrílica de protección.*

## 3.6. Divisor de tensión

Debido a que el Vdc del panel PV sobrepasa el rango de medición del Datalogger CR1000, es necesario diseñar un divisor de tensión que se adapte a las necesidades de medición requeridas. Para ello, el diseño se basa en un divisor de tensión diferencial de dos tipos de resistencia $R_1$ $y$ $R_2$ como se muestra en la Figura 3.6 :

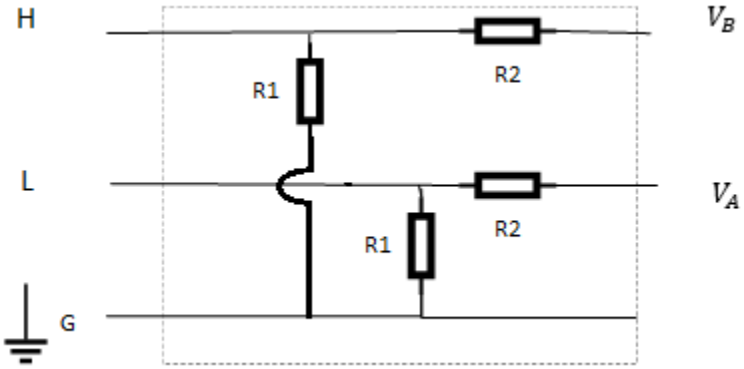


*Figura 3.6 Esquema divisor de tensión diferencial.*

Los puntos "$V_B$" $y$ "$V_A$" representan los bornes del panel solar, los terminales "$H$" $y$ "$L$" los terminales diferenciales y "G " la tierra del canal. Las mediciones del CR1000 son efectuadas desde un terminal diferencial respecto a tierra del canal, por lo tanto, $V_H$ representa la diferencia de

tensión del nodo “H” con respecto a “G” y $V_L$ la diferencia de tensión del nodo “L” con respecto a “G”, por lo que se puede representar de la siguiente manera:

$$V_H = V_B \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{3.3}$$

$$V_L = V_A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \tag{3.4}$$

Dado que la medición diferencial medirá la diferencia de tensión de entre los terminales “H” y “L”, obtendremos la siguiente relación entre lo que medimos en el Datalogger y la tensión $V_p$ del panel fotovoltaico:

$$V_p = V_B - V_A$$

El panel fotovoltaico sin reflector opera en 30 [V] aproximadamente por lo que utilizando resistencias $R_1 = 10[k\Omega]$ y $R_2 = 100[k\Omega]$ obtendremos:

$$V_H - V_L = V_p \cdot \frac{10}{110} = V_p \cdot \frac{1}{11} \tag{3.6}$$

Así, la tensión medida del panel se reducirá de forma lineal en una proporción de 1:11.

En el proceso de construcción se fabricaron los dos divisores de tensión diferenciales a los cuales se les denominó “1” y “2” para diferenciarlos, uno de ellos se puede apreciar en la Figura 3.7 . En los dispositivos se utilizaron resistencias cercanas a las del diseño preliminar y los valores de estas son detalladas en la Tabla 3-1, Tabla 3-2:

| | |
|---|---|
| T.amb. [°C] | 13,8 |
| R1 [ohm] | 9160 |
| R2 [ohm] | 9160 |
| R3 [ohm] | 89600 |
| R4 [ohm] | 89600 |

*Tabla 3-1 Valores de las resistencias eléctricas para el divisor de tensión N°1.*

| | |
|---|---|
| T.amb. [°C] | 13,9 |
| R1 [ohm] | 9110 |
| R2 [ohm] | 9120 |
| R3 [ohm] | 84700 |
| R4 [ohm] | 84700 |

*Tabla 3-2 Valores de las resistencias eléctricas para el divisor de tensión N°2.*

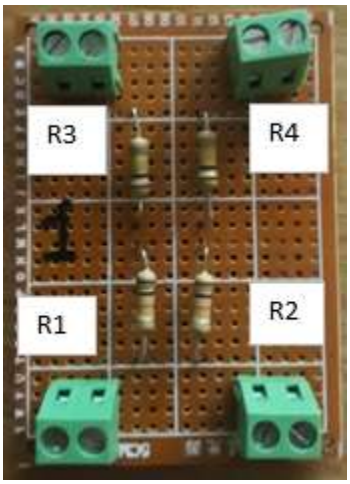


*Figura 3.7 Divisor de tensión diferencial*

Posterior a la construcción se procedió a la calibración de los divisores de tensión, por lo que fueron sometidos a distintas tensiones eléctricas de entrada, midiendo tanto su entrada como salida, obteniendo así, las curvas de regresión lineal de las mediciones, en donde la pendiente representa el factor de reducción de tensión eléctrica de los dispositivos como se ve en la Figura 3.8 y Figura 3.9:

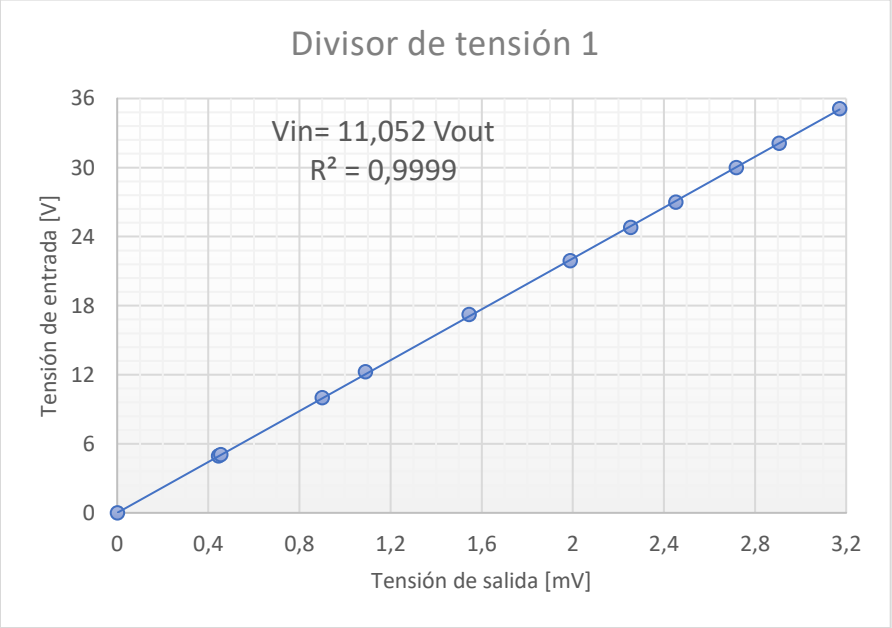


*Figura 3.8 Curva de calibración del divisor de tensión N°1.*

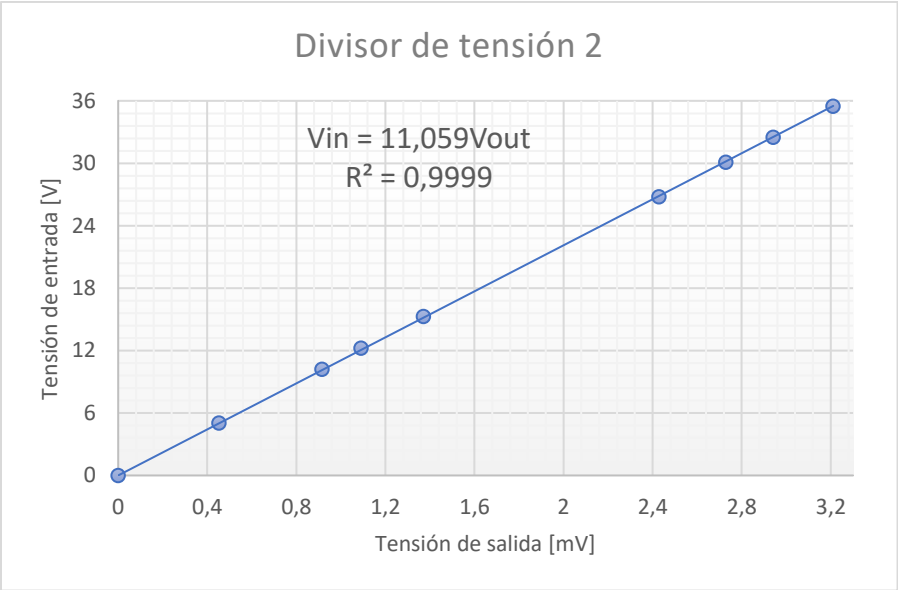


*Figura 3.9 Curva de calibración del divisor de tensión N°2.*

Por último, cabe recalcar que todas las resistencias eléctricas utilizadas son de carbón. El hecho de que todas sean del mismo material es de vital importancia, ya que evita la descalibración por cambios de temperatura, debido a que el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica es el mismo para todos. Esto se puede ver en la siguiente ecuación (3.7):

$$R_1 = R_{1,ref} \cdot (1 + \alpha\Delta T) \ \wedge \ R_2 = R_{2,ref} \cdot (1 + \alpha\Delta T)$$

$$V_H - V_L = V_p \cdot \frac{R_{1,ref}(1 + \alpha\Delta T)}{R_{1,ref}(1 + \alpha\Delta T) + R_{2,ref}(1 + \alpha\Delta T)} = V_p \cdot \frac{R_{1,ref}}{R_{1,ref} + R_{2,ref}} \tag{3.7}$$

En donde $\alpha$ es el coeficiente de temperatura de resistencia eléctrica, $R_i$ la resistencia total de $i$ a la temperatura $T$, $R_{i,ref}$ la resistencia de referencia a una temperatura de referencia y $\Delta T = T - T_{ref}$ la diferencia de la temperatura de la resistencia con su temperatura de referencia.

# 4. Diseño experimental

## 4.1. Montaje inicial

Es importante mencionar que el proyecto es una continuación de proyectos previos, por lo que existía un montaje inicial [16] [17].

En la zona experimental se dispone de 2 plantas solares PV: una con fines académicos con banco de prueba para uso de laboratorio; y otra de generación, la cual inyecta continuamente a la red mediante micro inversores individuales conectados en cada panel PV. Este último conjunto mencionado cuenta con 3 paneles sometidos a un reflector selectivo de radiación 3M [8] y 1 sin reflector como se puede ver en la Figura 4.1**:**

*Figura 4.1 A la izquierda con el N°1 los paneles PV con estructura de reflectores y a la derecha con el N°2 el panel PV sin reflector [16].*

Los paneles PV cuentan con una estructura en el costado de su marco para fijar un piranómetro y también con soportes bases telescópicos, que permiten variar el ángulo de inclinación de los paneles con respecto a la horizontal de 0° a los 45°. El reflector también cuenta con una estructura que permite variar la inclinación de 0° a 45°.

## 4.2. Esquema de conexiones de la planta de generación

La planta de generación está compuesta por múltiples componentes como se aprecia en la Figura 4.2, en primera instancia, se pueden identificar los 4 módulos PV, que estos a su vez están conectados a micro inversores individuales los cuales hacen la transformación de CC a CA, luego de esto viene el primer sistema de seguridad el cual se puede ver en la Figura 4.3, que consta de un automático de una corriente nominal AC de 10[A], el cual se encuentra ubicado en la techumbre del edificio de mecánica. El siguiente componente es el multigate, un hardware de comunicación entre la planta de generación y la red, lo que permite verificar el correcto funcionamiento de cada inversor

y generar una ficha de resumen general de la generación de los paneles PV, conectando un computador a este. Por último, tenemos un segundo sistema de seguridad que va conectado a la red, el cual consta de un interruptor automático de corriente nominal AC de 25[A] y un interruptor diferencial de una sensibilidad de 0.03[A], como se puede apreciar en la Figura 4.4. Tanto el multigate como el mecanismo de seguridad N°2 se encuentran en una caja de derivación al interior del laboratorio de termo fluidos de la universidad.

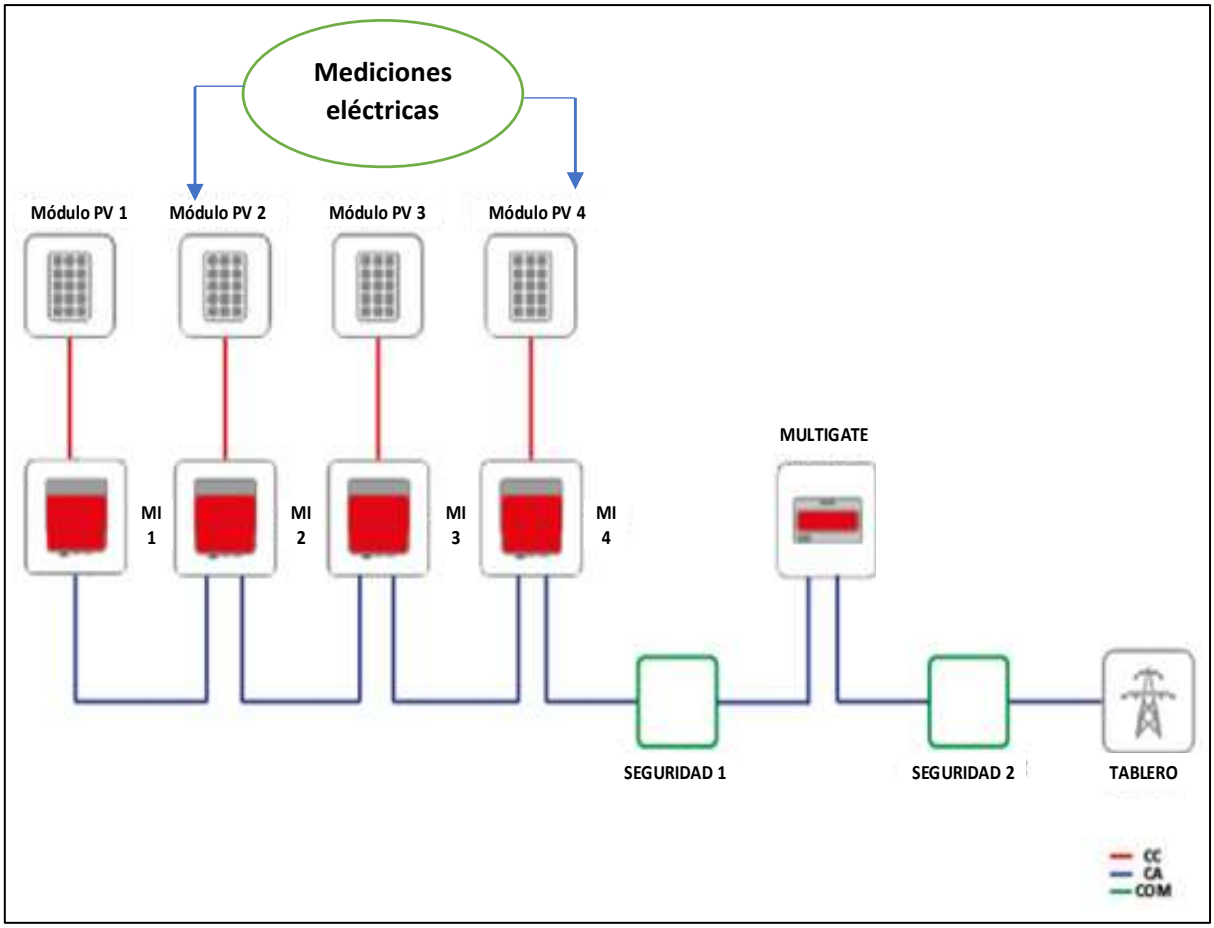


*Figura 4.2 Esquema de conexiones eléctricas planta de generación.*

*Figura 4.3 Elemento de seguridad N°1, interruptor automático AC.*

*Figura 4.4 Elemento de seguridad N°2, por el interruptor automático y diferencial de lado izquierdo*

Cabe mencionar que los primeros dos interruptores del lado izquierdo corresponden a la seguridad N°2 de los paneles PV a trabajar. Los dos del lado derecho corresponden a la planta PV con fines académicos.

## 4.3. Error experimental

De manera general una medición $X$ puede ser expresada en dos términos como se muestra en la ecuación (4.1). En donde $X_0$, es la magnitud leída por el instrumento de medición y $\delta x$, la magnitud del error o incertidumbre.

$$X = X_0 \pm \delta x \tag{4.1}$$

Toda medición por definición tiene una incertidumbre asociada, y que según su fuente pueden ser clasificado en errores sistemáticos, aleatorios y burdos. El error sistemático se caracteriza por alterar la medición de manera constante y no se logra eliminar bajo repetición, una solución para esto es la calibración, o hacer la misma medición con métodos diferentes. El error aleatorio afecta a la medición de manera errática accidental y en magnitudes diferentes, estos escapan del control del observador y no siempre pueden ser eliminados, su origen puede deberse a condiciones fluctuantes o a características del objeto a medir, y una forma de evitar estos, es repetir la medición varias veces y tomar un promedio de estas como el resultado de medición, otra opción es disponer de algún dispositivo que pueda medir y registrar de manera automática. Por último, el error burdo se debe a procedimientos errados de medición por parte del experimentador, como leer mal un instrumento, errores de cálculo, entre otras. Para evitar los errores burdos el experimentador debe ser riguroso en el proceso de medición.

El error nominal $E_{nom} = \delta x$ de las mediciones efectuadas directamente pueden ser estimada como:

$$E_{nom}^2 = E_{ins}^2 + E_{def}^2 + E_{cal}^2 + {E_{met}}^2 \tag{4.2}$$

En donde $E_{ins}$ es el error asociado a la apreciación nominal del instrumento, $E_{def}$ el error asociado a la falta de definición del objeto a medir, que en este caso se desprecia, $E_{cal}$ es el error asociado al instrumento con el que ha sido calibrado y $E_{met}$ el error del método.

Para la estimación del error de mediciones indirectas tenemos:

- Para la cantidad $Z = Z_0 \pm \delta z$ de la suma o resta de $X = X_0 \pm \delta x$ $y$ $Y = Y_0 \pm \delta y$ :

$$Z_0 = X_0 \pm Y_0$$

$$\delta z = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2} \tag{4.3}$$

- Para la multiplicación, división, potenciación y radicación de una cantidad $W = \frac{X^m Y^n}{Z^p}$:

$$\left(\frac{\delta W}{\bar{W}}\right)^2 = \left(\frac{m\delta X}{\bar{X}}\right)^2 + \left(\frac{n\delta Y}{\bar{Y}}\right)^2 + \left(\frac{p\delta Z}{\bar{Z}}\right)^2 \tag{4.4}$$

Para casos de representación del promedio de un conjunto de datos, el error típico del promedio se puede representar como:

$$\delta x_p = \sqrt{\sigma_m^2 + E_{nom}^2} \tag{4.5}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \tag{4.6}$$

## 4.4. Modificaciones y configuración experimental

Como medida de protección para algunos sensores de medición y el registrador de datos, se instala una caja metálica. Esta caja fue ubicada tras los paneles PV de uso académico, evitando así un posible sombreado hacia los paneles PV por este mismo. La caja y sus instrumentos de medición se ve representado en el esquema de la Figura 4.2 “mediciones eléctricas”.

También fue necesario obtener un punto de energía eléctrica de la red para alimentar el Datalogger y ventiladores de la caja eléctrica, por lo que para ello se instaló un cable alimentador, resistente a las condiciones de intemperie, que proviene de un aire acondicionado con interruptor eléctrico en la techumbre que podría permitir futuras modificaciones o precauciones al momento de trabajar. Adicionalmente se obtiene un punto de tierra eléctrica para aterrizar la caja y los marcos de los paneles fotovoltaicos.

La caja metálica cuenta con tres ventiladores que evitan el sobrecalentamiento de los instrumentos de medición, la caja con sus instrumentos se aprecia en la Figura 4.5.

*Figura 4.5 Caja metálica con los instrumentos de medición.*

### 4.4.1. Variables de medición

Para las mediciones se utilizan dos paneles PV Stärkee JS 250M de 250[W] nominales cada uno. El panel PV central con reflectores y el panel PV sin reflector, los cuales están señalizados en la Figura 4.1. De los paneles fotovoltaicos con reflector se elige el central, debido a que este sería un caso más representativo de una planta solar fotovoltaica de mayor escala, ya que este panel PV verá mayor área del reflector tanto a su izquierda como a su derecha. Las mediciones hechas por los sensores fueron registradas por el Datalogger cada 1 minuto, resultado del promedio de 12 mediciones en ese minuto.

Los paneles PV están continuamente inyectando energía a la red a través de los micro inversores individuales con MPPT, por lo que siempre están operando en máxima potencia. Las inclinaciones de los paneles y reflector son las siguientes: panel PV sin reflector se encuentra inclinado 44,2°; panel PV con reflector 44,6 °; y reflector 18,6°; estos poseen un acimut de 10° Noroeste. Los detalles técnicos del panel PV se pueden consultar en el Anexo D: Ficha Técnica Panel fotovoltaico

#### 4.4.1.1. Corriente y tensión eléctrica continua

Para realizar las conexiones se duplicaron los bornes de ambos paneles PV sometidos a los sensores, utilizando un “conector T MC4”, como el de la Figura 4.6.

*Figura 4.6 Conector T MC4, utilizado para la duplicación de bornes del panel PV.*

Se realizaron dos mediciones de corriente continua, una en el panel PV con reflector y la otra en el sin reflector. Dado a que las mediciones corresponden a CC, los shunt son instalados en serie con el panel PV y el micro inversor, como se puede ver en el esquema de la Figura 4.7, de esta manera el datalogger registra la corriente producida por el panel PV cada un minuto, empleando una conexión de cable único entre el sensor y el registrador. Además, se debe mencionar que el datalogger registra la medición después de aplicar el factor multiplicativo correspondiente de la calibración, por lo que en la memoria del dispositivo se encuentra la medición de corriente real. Los factores de calibración correspondientes, son los obtenidos de la calibración del dispositivo de la sección 3.5, y están representados en la Tabla 4-1 a la milésima parte, ya que el datalogger hace la medición por defecto en miliamperes, de esta manera se obtiene un registro directamente en amperes.

| Sensor | Factor de multiplicación |
|---|---|
| Shunt N°1 | 0,99285 |
| Shunt N°2 | 0,99421 |

*Tabla 4-1 Factor de multiplicación de calibración aplicado en el programa de mediciones del datalogger*

Para le medición de tensión eléctrica continua son utilizados los 2 divisores de tensión detallados en la sección 3.6, uno para cada panel escogido, estableciendo una conexión diferencial entre los dispositivos. Estos son conectados en paralelo al panel PV para poder registrar la tensión a la cual se encuentra generando el panel en cada minuto, como se puede apreciar en la Figura 4.7. Se debe mencionar que este dispositivo presenta un consumo mínimo de energía eléctrica ya que tiene una resistencia del orden de los $10\ [k\Omega]$, por lo tanto, una potencia de consumo estimada de $90\ [mW]$.

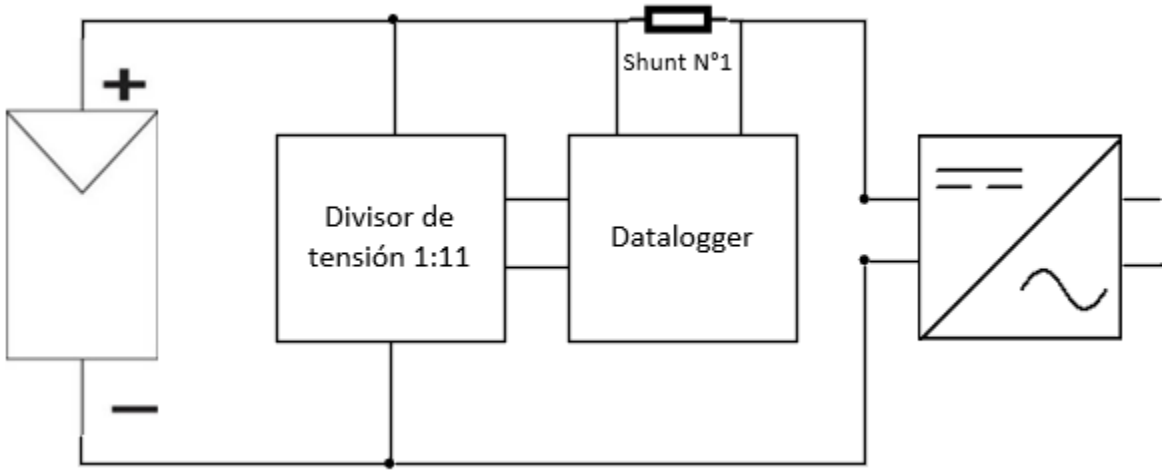


*Figura 4.7 Diagrama eléctrico de conexión para sensor shunt y de tensión*

#### 4.4.1.2. Potencia eléctrica

La potencia eléctrica continua generada por el panel $P_p$, es calculada posteriormente al descargar los datos del datalogger al computador a través de las variables de corriente y tensión, como muestra la ecuación (4.7).

$$P_p = I_{cc} \cdot V_{cc} \tag{4.7}$$

Por lo tanto, es una variable que se puede calcular para cada minuto de generación.

#### 4.4.1.3. Temperatura paneles PV

La temperatura de los paneles PV es medida a través de los termistores. Se utiliza un termistor para cada panel en la cara posterior del panel como se puede ver en Figura 4.8. Los sensores utilizados son modelo "110PV-L de Campbell Scientific" y son conectados a 3 hilos al datalogger, es importante mencionar que se puede hacer una conexión de hasta 4 hilos, pero para ello se necesita la licencia de un software.

El termistor instalado tiene como características un disco de aluminio en donde se encuentra alojada la resistencia, este disco posee un pegamento que facilita la adherencia a la cara posterior del panel PV. El sensor necesita adicionalmente adherencia extra con cinta Kapton, la cual se aplica en el disco de aluminio y en el cable, en una zona y forma indicada por el fabricante.

*Figura 4.8 Ubicación del termistor en el panel PV.*

#### 4.4.1.4. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente es registrada a cada minuto mediante la estación meteorológica de la Universidad Técnica Federico Santa María campus San Joaquín. Este sensor es de modelo 083E-L es el mostrado en la Figura 4.9:

*Figura 4.9 Sensor 083E-L empleado para las mediciones de temperatura ambiente en la estación meteorológica.*

#### 4.4.1.5. Radiación en panel PV con reflector

La radiación es registrada fijando un piranómetro LI-COR 200R en la estructura para piranómetros del panel PV con reflector, como se muestra en la Figura 4.10. De esta manera se logra medir la radiación que llega al panel PV y que adiciona el reflector.

El piranómetro fue conectado al datalogger, registrando la radiación cada un minuto, resultado del promedio de 12 mediciones en ese lapso, además de ir midiendo la energía total que llega al panel PV.

*Figura 4.10 Piranómetro utilizado en panel PV con reflector.*

#### 4.4.1.6. Radiación en panel PV sin reflector

La radiación del panel PV sin reflector es registrada mediante un piranómetro inclinado CMP10 de Kipp & Zonen de la estación meteorológica, el cual posee un ángulo casi idéntico al de los paneles PV del experimento. La medición efectuada por la estación es “POA” a 45° y es medida cada un minuto.

#### 4.4.1.7. Modificación lámina reflectiva

Como segunda parte experimental, se realizó una posterior modificación luego de obtener suficientes datos con el reflector 3M Cool Mirror. La modificación consistió en la instalación de papel aluminio de marca “ALUFOIL” como nuevo reflector, como se ve en la Figura 4.11 Panel PV con reflector de aluminio. . La adherencia del papel se hizo sobre el reflector 3M Cool Mirror con cinta de adherencia de doble faz y cinta de aluminio.

*Figura 4.11 Panel PV con reflector de aluminio.*

#### 4.4.1.7.1. Posición óptima del reflector

La optimización de la inclinación del reflector se hace en base a un panel inclinado a $\beta = 45°$, dado que esta inclinación es la que se está utilizando para el piranómetro POA de la estación meteorológica de la universidad. Se hace la suposición de que el reflector es una superficie especular, por lo que el ángulo del rayo incidente es igual al ángulo del rayo reflejado, tomando como referencia la normal a la superficie de incidencia. Considerando esto, se toma el caso crítico, en el cual llega un haz solar al extremo del reflector y su haz reflejado llega al extremo del panel PV, como se puede observar en la Figura 4.12. Si el ángulo de incidencia del haz solar $\delta$ es igual a la altura solar máxima, se puede asegurar que todos los rayos incidentes en el reflector incidirán en el panel PV, de lo contrario parte de los rayos provenientes del reflector no llegarán al panel PV.

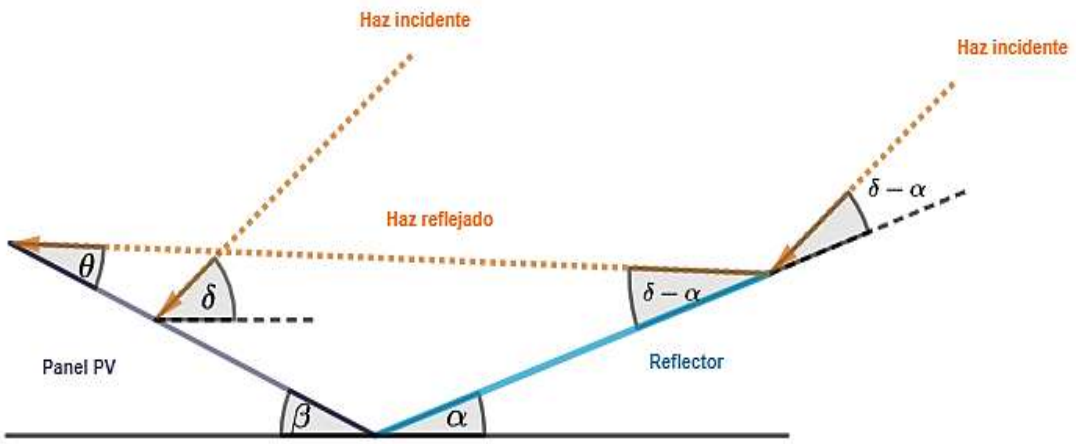


*Figura 4.12 Esquema Panel PV-Reflector para la optimización de la inclinación del reflector.*

$$\beta = 45°$$

$$\theta + (180° - \beta - \alpha) + (\delta - \alpha) = 180° \tag{4.8}$$

$$\theta - \beta - 2\alpha + \delta = 0$$

Por teorema del seno, y considerando que la longitud del panel PV "$L_p$" es la misma que la del reflector "$L_R$" tenemos:

$$\frac{\mathrm{L_p}}{\mathrm{sen}(\delta - \alpha)} = \frac{\mathrm{L_R}}{\mathrm{sen}(\theta)} \quad \wedge \quad \mathrm{L_p} = \mathrm{L_R} \tag{4.9}$$

$$\delta - \alpha = \theta$$

$$(\delta\text{-}\alpha) - (\beta + 2\alpha\text{-}\delta) = 0$$

$$\alpha = \frac{2\delta - \beta}{3} \tag{4.10}$$

Como el proceso de mediciones se inicia a fines de junio, se toma como referencia la altitud solar del 22 de junio, que según la carta solar estereométrica de Santiago de Chile de la Figura 4.13 da como resultado una altura solar máxima $\delta_{máx} = 38°$.

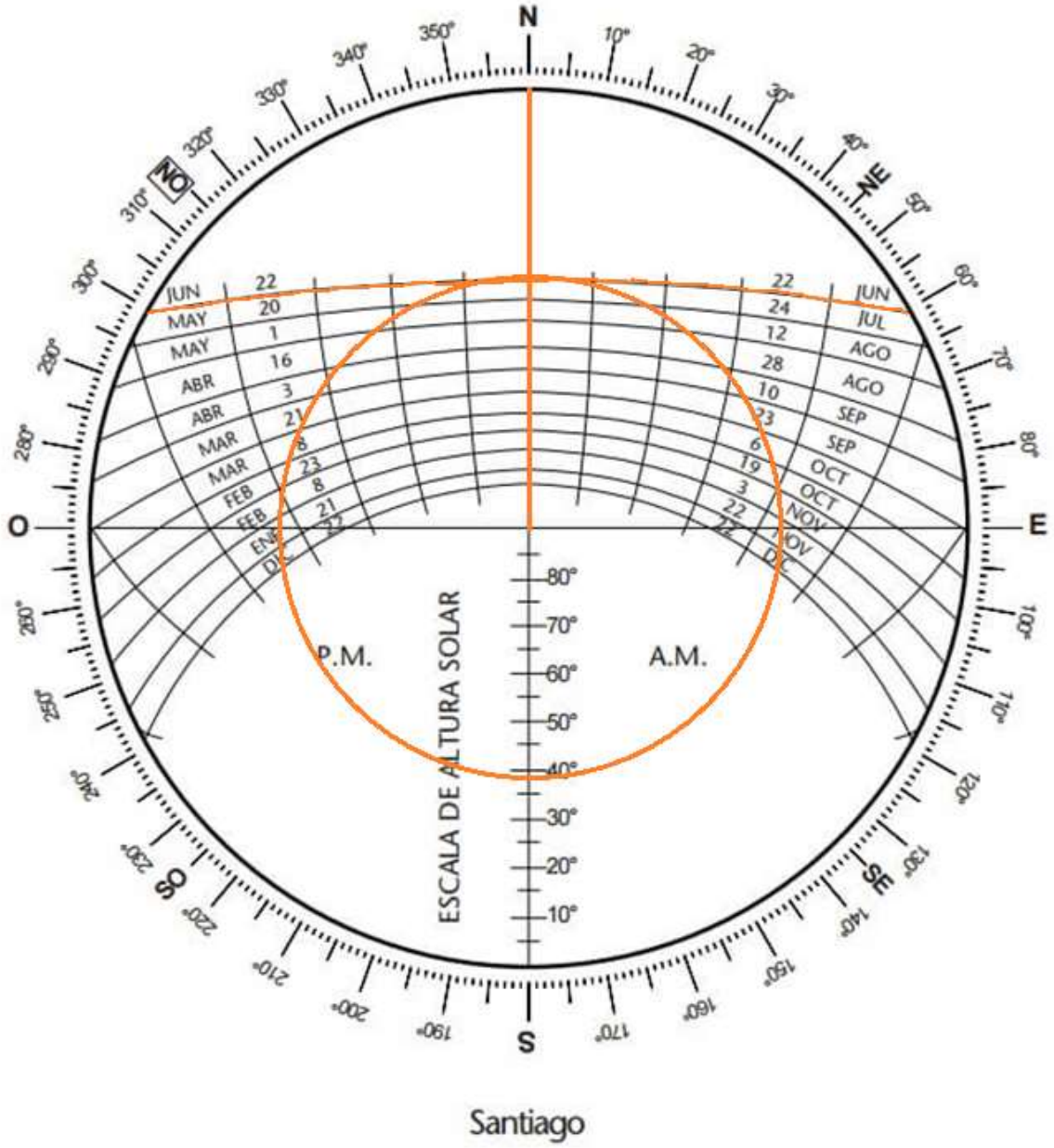


*Figura 4.13 Carta solar estereométrica de Santiago de Chile*

# 5. Resultados y conclusiones

Se realizó una media móvil para todos los gráficos, con el fin de suavizar las curvas y presentarlos de una forma visual optimizada. La media móvil utilizó 20 datos, siendo calculada de tal manera que el valor mostrado a una hora particular fue resultado del promedio de los 19 valores medidos anteriormente y el valor medido de la hora particular en cuestión.

## 5.1. Comparación lámina reflectora aluminio y 3M.

Los ángulos de paneles y reflectores se mantuvieron constante de acuerdo con los valores mencionados anteriormente. Para el análisis de resultados se consideran dos días, primero, el 24 de octubre del 2019, donde se realizaron las mediciones con reflector de papel aluminio, y el segundo, el 30 de octubre del 2019 en donde se utilizó el reflector Cool Mirror de 3M. Se escogió el 24 de octubre para representar la operación del panel con reflector de papel aluminio y se comparó con el día 30 de octubre ya que tuvieron condiciones de irradiancia similar. Para ambos casos se trabajó con un panel PV con reflector y otro sin él. Cabe destacar que las comparaciones fueron realizadas en base a las horas efectivas, es decir, cuando hay luz solar y funcionan los paneles PV sin ser sombreados.

La Figura 5.1 muestra la potencia generada y la temperatura de los paneles PV CR y SR correspondiente al día 24 de octubre 2019. La potencia promedio del panel PV CR de aluminio superó al panel PV SR en un 6[%]. Respecto a la medición de la temperatura del panel, se observó que el panel CR, en ciertos horarios, superó a la del panel SR, especialmente pasado al medio día. El promedio de la temperatura en las horas efectivas del panel CR es superior en un 0,3[%] en comparación al panel SR.

La Figura 5.2 representa la potencia generada por el panel PV SR y CR Cool Mirror 3M. Respecto al promedio de la potencia en las horas efectivas del panel PV CR 3M supera al panel SR en un 5,3[%]. Para el caso de la temperatura promedio en las horas efectivas, el panel PV CR 3M supera en un 1,4[%] al SR.

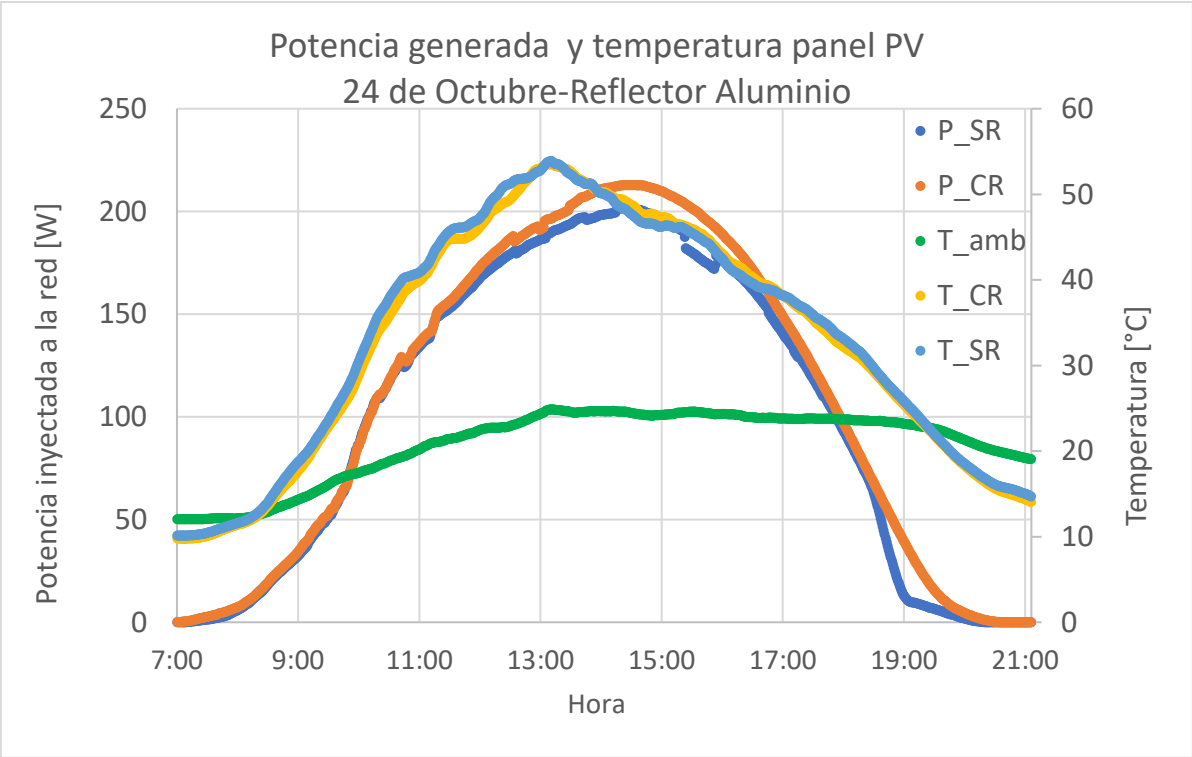


*Figura 5.1 Potencia generada y temperatura de paneles PV CR y SR de papel aluminio, y temperatura ambiente para un día despejado.*

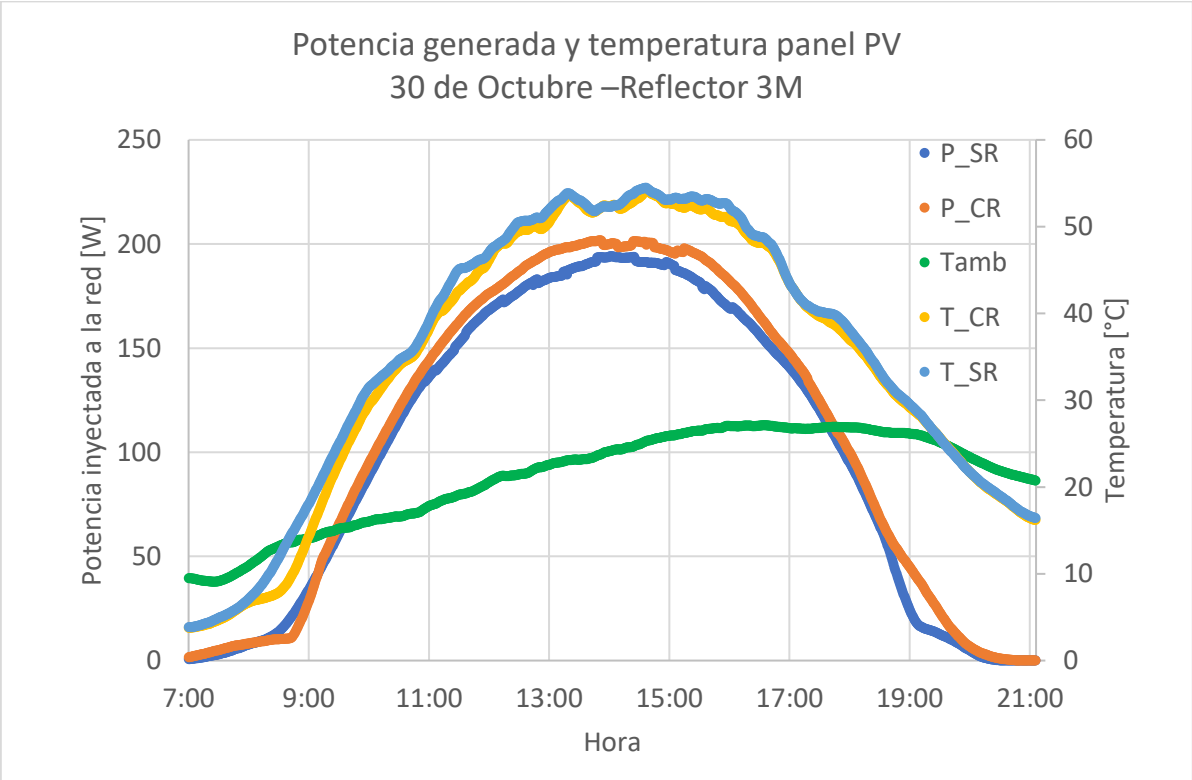


*Figura 5.2 Potencia generada y temperatura de paneles PV CR y SR de 3M, y temperatura ambiente para un día despejado.*

| | *Aluminio* | | *3M* | | *Aluminio* | *3M* |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Descripción* | *Panel PV SR* | *Panel PV CR* | *Panel PV SR* | *Panel PV CR* | *Incremento porcentual rel.* | *Incremento porcentual rel.* |
| *Promedio de Potencia [W]* | *188* | *200* | *185* | *194* | *6,00%* | *5,30%* |
| *Error estándar de potencia [W]* | *0,66* | *0,73* | *0,48* | *0,44* | - | - |
| *Error promedio de potencia [W]* | *6,39* | *6,47* | *7,14* | *6,92* | - | - |
| *Energía inyectada a la red [Wh]* | *1440* | *1531* | *1439* | *1528* | *6,40%* | *6,20%* |
| *Error energía inyectada a la red [Wh]* | *61,8* | *65* | *60,8* | *64,2* | - | - |
| *Promedio temperatura termistor. [°C]* | *48,75* | *48,91* | *51,72* | *52,47* | *0,30%* | *1,40%* |
| *Error estándar temperatura termistor [°C]* | *0,23* | *0,2* | *0,11* | *0,11* | - | - |
| *Error promedio temperatura termistor[°C]* | *0,34* | *0,32* | *0,27* | *0,29* | - | - |
| Promedio temperatura ambiente [°C] | 24,2 | | 24,3 | | - | - |
| Error estándar temperatura ambiente [°C] | 0 | | 0,1 | | - | - |
| Error promedio temperatura ambiente [°C] | 0,2 | | 0,2 | | - | - |
| Irradiancia incidente en panel PV [W/m²] | 979,452 | 1028,89 | 979,066 | 998,813 | 5,00% | 2,00% |

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Error estándar irradiancia incidente en panel PV [W/m²] | 3,46366 | 2,9501 | 3,93912 | 3,0862 | - | - |
| Error promedio irradiancia incidente en panel PV [W/m²] | 29,587 | 29,5198 | 31,1513 | 30,2303 | - | - |
| Eficiencia promedio [%] | 19,6 | 20,4 | 19,2 | 20,4 | 4 | 6 |
| Error eficiencia promedio [%] | 0,88 | 0,86 | 0,93 | 0,91 | - | - |
| Pr promedio | 78,60% | 81,70% | 76,90% | 81,50% | 4 | 6 |

*Tabla 5-1 Resumen comparativo de operación de panel con y sin reflector, Cool Mirror 3M y aluminio*

La Figura 5.3 nos muestra la irradiancia que llega a los paneles PV CR y SR. Para los casos del reflector Cool Mirror 3M y el reflector de aluminio las curvas son suaves y en puntas por lo tanto podemos concluir que la medición se efectuó en un día despejado.

La Figura 5.4 y Figura 5.5 nos muestran la eficiencia del panel. Los bordes en los gráficos son omitidos en los posteriores cálculos, ya que se produce una falla en la corrección del coseno de Lambert, tanto para el amanecer y el atardecer, debido a la estructura natural del piranómetro. El incremento porcentual relativo de la eficiencia del panel PV CR de aluminio en comparación al caso SR es de un 4 %, y para el panel PV CR 3M en comparación al caso SR es de un 6 %, según lo indicado en la Tabla 5-1.

En la Tabla 5-1 se presenta un resumen de los gráficos revisados previamente. Los cálculos efectuados en la tabla se realizaron en base a las horas efectivas.

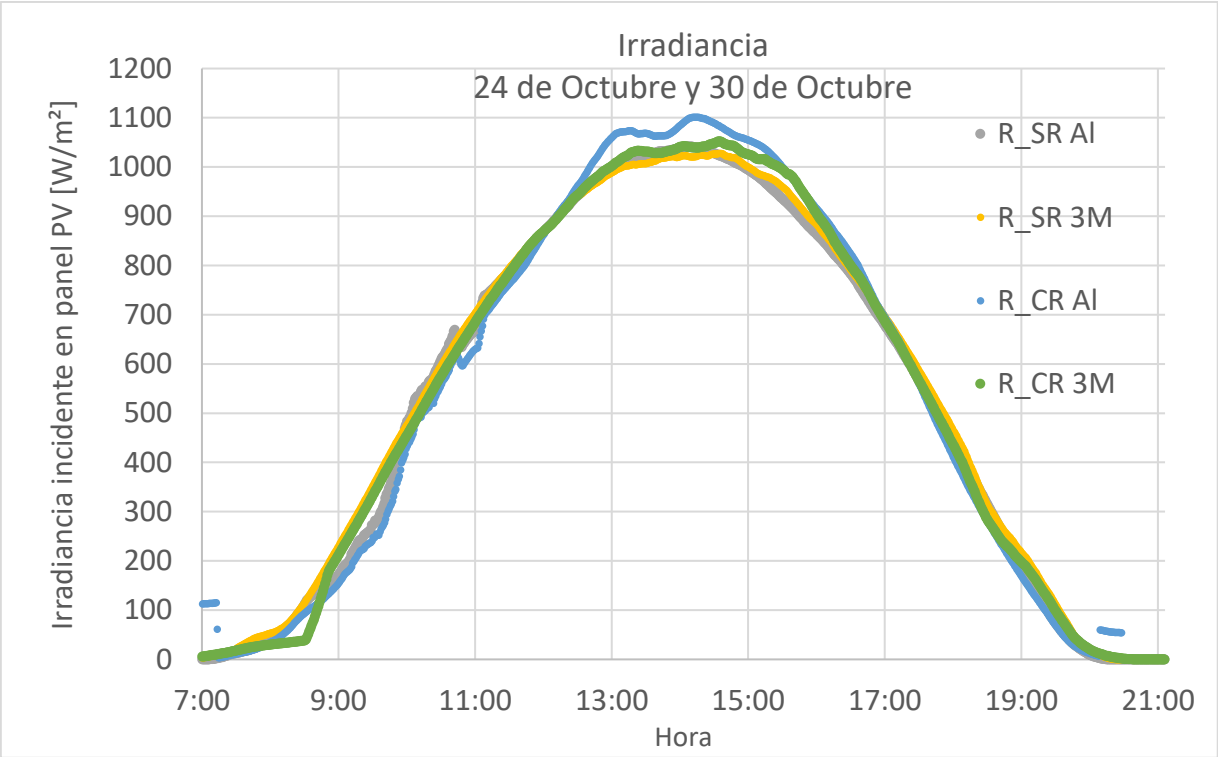


*Figura 5.3 Radiación solar incidente en los paneles PV CR y SR de 3M y Aluminio, para un día despejado*

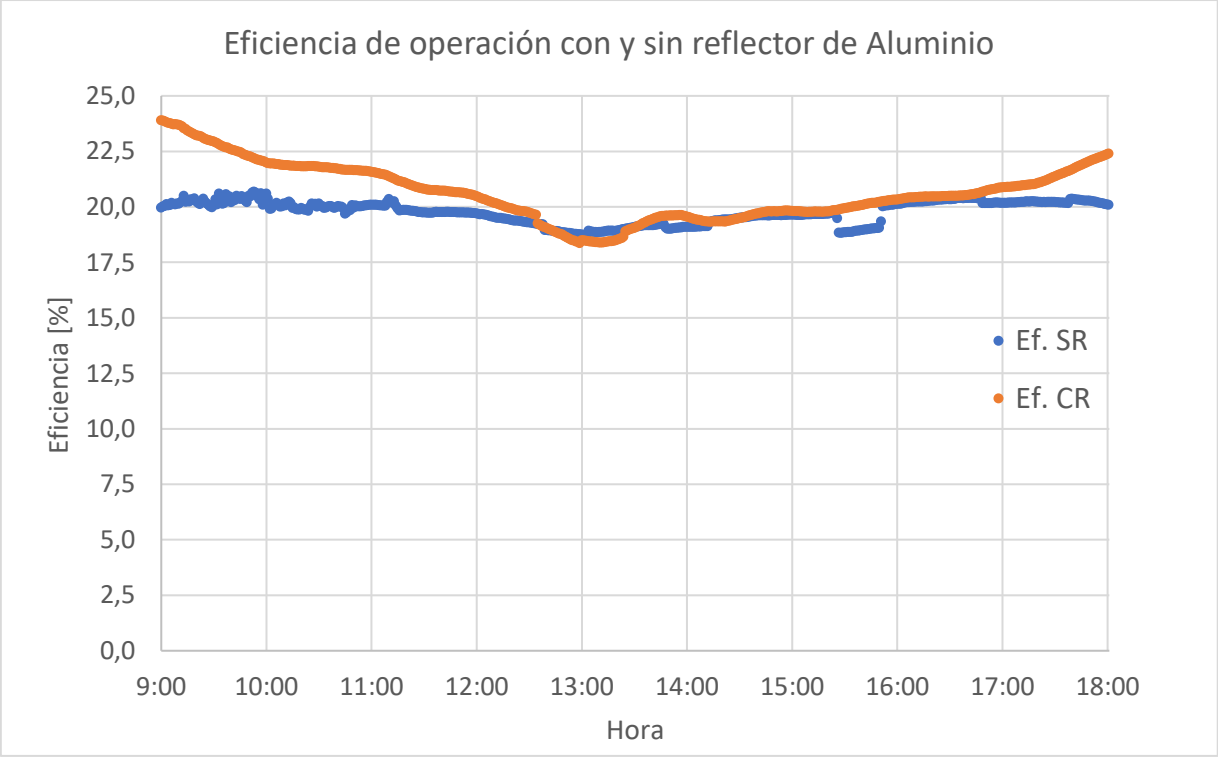


*Figura 5.4 Eficiencia de operación de panel CR y sin reflector de aluminio, para aun día despejado.*

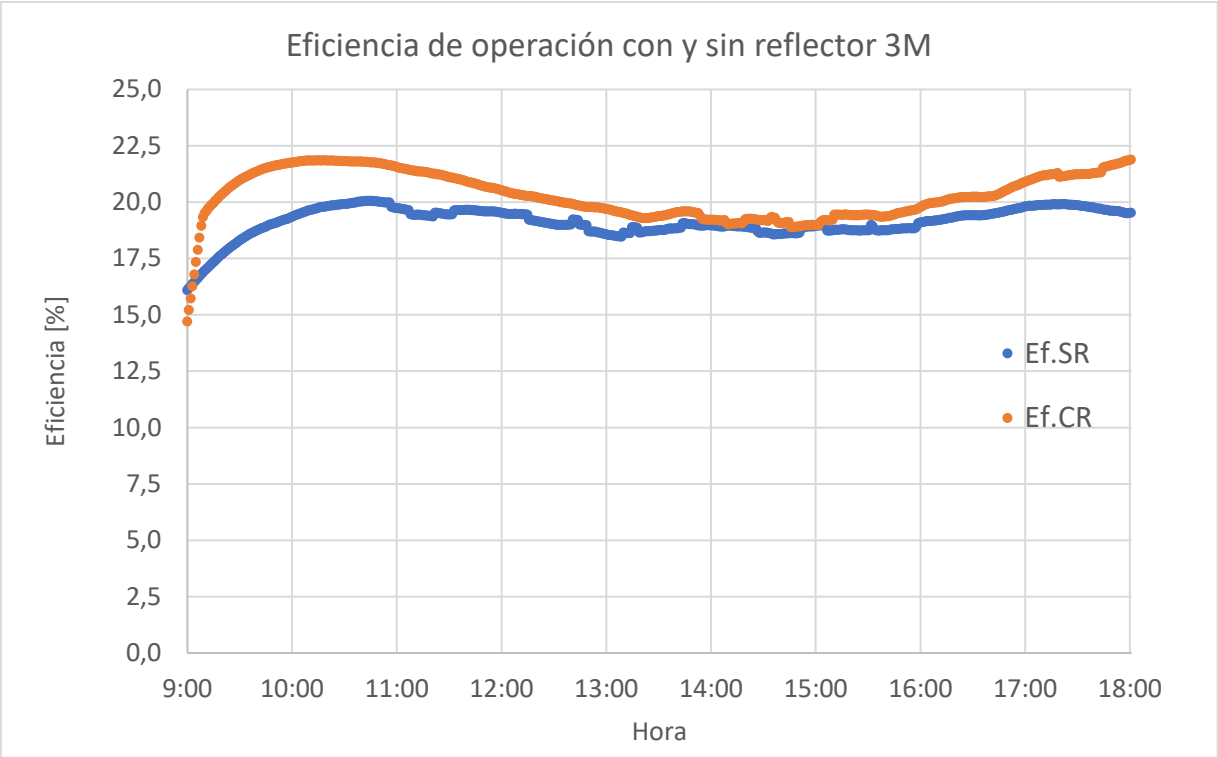


*Figura 5.5 Eficiencia de operación de panel CR y sin reflector 3M, para aun día despejado.*

En cuanto a la inyección de energía a la red se registró y calculó que fue similar en ambos casos de uso de reflectores Cool Mirror y aluminio, siendo 1528[Wh] y 1531[Wh] respectivamente. El incremento porcentual relativo al usar el panel PV CR 3M en comparación al caso SR fue de un 6,2 %, mientras que para el caso de panel PV CR de aluminio en comparación al caso SR fue de un 6,4 %.

Se logra comprobar empíricamente el buen desempeño de un sistema PV al añadir el reflector de aluminio, como el Cool Mirror 3M. También se logra demostrar la propiedad selectiva de radiación del reflector Cool Mirror 3M, ya que el aumento porcentual relativo de la radiación incidente al usar este tipo de reflector fue de un 2 % en comparación al caso SR, mientras que para el caso en que se utilizó aluminio fue de un 5 % en comparación al caso SR. Adicionalmente, para estos resultados se debe considerar que el reflector Cool Mirror 3M tiene 3 años de antigüedad, siendo visible un cambio del color del film desde su adquisición, mientras que el papel aluminio utilizado como reflector era nuevo.

El diseño e implementación del sistema de medición expuesto, permitirá obtener un registro de datos confiables y continuos en el tiempo de diversos tipos de variables, de tipo eléctrico, térmico e irradiancia solar.

El papel aluminio debido a la exposición ambiental presentó algunos pliegues en su superficie después de un mes, posiblemente por una adherencia no óptima a la estructura del reflector, sin embargo, esto no logró afectar el desempeño del reflector de papel aluminio, según los registros de las mediciones expuestas. El estado de físico del reflector de aluminio después de 2 meses de su instalación se puede observar en la Figura 5.6, el cual se ve en excelentes condiciones

al ser inspeccionado visualmente. Sin embargo, cuando el papel aluminio fue retirado, se observó al reverso de este papel zonas quemadas, debido a que este tipo de papel posee una película plástica. Se recomienda en futuros experimentos con papel aluminio verificar que esté libre de la película plástica mencionada.

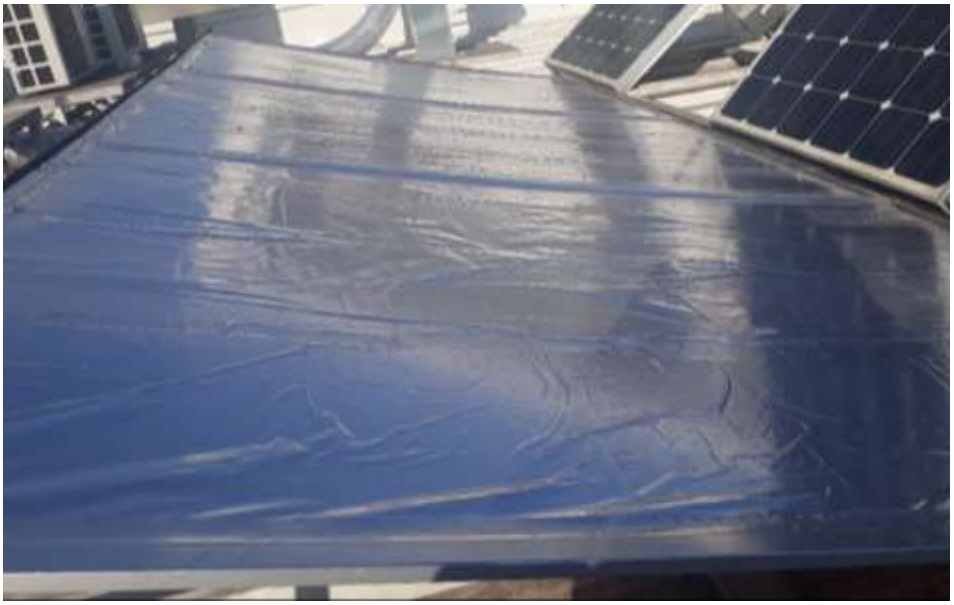

*Figura 5.6 Reflector de aluminio*

Para futuros trabajos se recomienda incorporar sensores con los cuales se logre registrar el efecto convectivo del sistema, añadir disipadores de calores pasivos para contrarrestar el aumento de temperatura de celda debido al uso del reflector, experimentar con otros materiales reflectivos como el papel Mylar e implementar uno de geometría curva.

# 6. Bibliografía


[1] M. D. ENERGÍA, «http://www.energia.gob.cl/content/anuario-estadistico-de-energia-cne-2016,» [En línea].

[2] «https://www.greentechmedia.com/articles/read/solar-costs-are-hitting-jaw-dropping-lows-in-every-region-of-the-world#gs.9NiW9QY,» [En línea].

[3] P. E. 2050, «http://www.energia2050.cl/es/energia-2050/energia-2050-politica-energetica-de-chile/,» [En línea].

[4] «https://www.4echile.cl/chile-pais-la-mayor-radiacion-del-mundo/,» [En línea].

[5] S. e. nacional, «https://www.coordinador.cl/sistema-electrico-nacional/,» [En línea].

[6] M. M. A. M. S. A. M. A. A. A. Shahjahan Ahmed, «More efficient use of photovoltaic solar panel using multiple fixed directed mirrors or aluminum foils instead of solar trackers in rural perspective of Bangladesh,» p. 5, 2014.

[7] J. H. K. Jin S. Choi, «Incidence solar power analysis of PV panels with curved reflectors,» p. 6, 2017.

[8] 3M™, «3M™ Cool Mirror Film 330,» p. 2, 2013.

[9] 3M Company USA, «Durable Polymeric films fot increasing the performance of concentrators,» 2012.

[10] C. L. R.Echazú, «Estudio de materiales reflectivos para concentradores solares,» p. 6.

[11] Campbell Scientific, *Manual Operator's CR1000,* 2018.

[12] Wikipedia, «https://es.wikipedia.org,» 8 Julio 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Termistor. [Último acceso: 25 Julio 2019].

[13] I. Morena, «Apuntes de instrumentación electrónica».

[14] Campbell Scientific, *110PV surface temperature probe,* 2017.

[15] Bureau of Indian Standard, *Solar energy-Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer,* 1992.

[16] I. TEITELMAN, «Medición del efecto de la instalación de una lámina reflectora y selectiva de radiación solar en la producción de energía eléctrica de un panel fotovoltaico,» Santiago, 2017.

[17] B. ESPINOZA, «Implementación de laboratorio de energía solar fotovoltaica en edificio de ingeniería mecánica campus San Joaquín,» Santiago, 2016.

[18] «http://www.minenergia.cl/exploradorsolar/,» [En línea].

[19] «https://acera.cl,» Agosto 2019. [En línea]. Available: https://acera.cl/estadisticas-generacion-de-energia/. [Último acceso: Septiembre 2019].

# 7. Anexos

## 7.1. ANEXO A: Tablas experimento Bangladés

Tablas correspondientes al experimento de Bangladés realizado con reflectores y espejos [6]:

| Panel con y sin espejo reflector | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hora | $V_{oc}$ [V] | | $I_{sc}$ [A] | | Potencia sin carga [W] | |
| | Sin espejo | Con espejo | Sin espejo | Con espejo | Sin espejo | Con espejo |
| 7:00 | 19,00 | 19,60 | 0,052 | 0,064 | 0,99 | 1,25 |
| 7:10 | 19,46 | 19,75 | 0,058 | 0,076 | 1,13 | 1,50 |
| 8:30 | 20,00 | 20,80 | 0,15 | 0,30 | 3,00 | 6,24 |
| 8:40 | 19,70 | 20,30 | 0,21 | 0,30 | 4,14 | 6,09 |
| 8:55 | 20,00 | 20,60 | 0,23 | 0,35 | 4,60 | 7,21 |
| 9:20 | 20,10 | 20,50 | 0,33 | 0,52 | 6,63 | 10,66 |
| 10:30 | 20,20 | 20,50 | 0,40 | 0,52 | 8,08 | 10,66 |
| 11:30 | 19,40 | 19,50 | 0,47 | 0,57 | 9,12 | 11,12 |
| 13:00 | 20,20 | 20,50 | 0,60 | 0,67 | 12,12 | 13,74 |
| 13:10 | 19,00 | 19,50 | 0,60 | 0,67 | 11,40 | 13,07 |
| 15:00 | 20,10 | 20,40 | 0,49 | 0,61 | 9,85 | 12,44 |
| 16:00 | 20,50 | 20,70 | 0,25 | 0,47 | 5,13 | 9,73 |
| 16:10 | 19,70 | 20,30 | 0,27 | 0,44 | 5,32 | 8,93 |
| 16:20 | 19,40 | 19,90 | 0,18 | 0,32 | 3,49 | 6,37 |
| 16:40 | 19,30 | 19,80 | 0,10 | 0,18 | 1,93 | 3,56 |
| 17:00 | 17,50 | 19,00 | 0,09 | 0,16 | 1,58 | 3,04 |

*Tabla 7-1 Mediciones para panel con y sin espejo reflector.*

| Panel con y sin lámina de aluminio reflectora | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hora | $V_{oc}$ [V] | | $I_{sc}$ [A] | | Potencia sin carga [W] | |
| | sin lámina | con lámina | sin lámina | con lámina | sin lámina | con lámina |
| 7:40 | 19,40 | 19,70 | 0,0876 | 0,1038 | 1,70 | 2,04 |
| 7:45 | 19,50 | 19,80 | 0,0890 | 0,1153 | 1,74 | 2,28 |
| 8:00 | 19,20 | 20,00 | 0,105 | 0,15 | 2,02 | 3,00 |
| 8:10 | 19,50 | 20,20 | 0,1145 | 0,19 | 2,23 | 3,84 |
| 8:20 | 19,80 | 20,20 | 0,16 | 0,26 | 3,17 | 5,25 |
| 9:15 | 2,10 | 20,70 | 0,22 | 0,45 | 0,46 | 9,32 |
| 10:30 | 19,80 | 20,10 | 0,42 | 0,52 | 8,32 | 10,45 |
| 11:30 | 19,30 | 19,50 | 0,46 | 0,58 | 8,88 | 11,31 |
| 13:00 | 20,20 | 20,50 | 0,60 | 0,67 | 12,12 | 13,74 |
| 13:10 | 19,30 | 19,70 | 0,61 | 0,72 | 11,77 | 14,18 |
| 15:00 | 19,20 | 19,60 | 0,40 | 0,56 | 7,68 | 10,98 |
| 16:00 | 20,00 | 20,60 | 0,28 | 0,46 | 5,60 | 9,48 |
| 16:10 | 19,40 | 19,90 | 0,25 | 0,41 | 4,85 | 8,16 |
| 16:30 | 19,00 | 19,50 | 0,07 | 0,13 | 1,33 | 2,54 |
| 16:55 | 18,50 | 19,50 | 0,07 | 0,15 | 1,30 | 2,93 |
| 17:15 | 18,50 | 19,30 | 0,05 | 0,10 | 0,93 | 1,93 |

*Tabla 7-2Mediciones para panel con y sin lámina de aluminio reflectora*

| Panel bajo sombreado parcial con y sin espejo reflector | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hora | $V_{oc}$ [V] | | $I_{sc}$ [A] | | Potencia sin carga [W] | |
| | Sin espejo | Con espejo | Sin espejo | Con espejo | Sin espejo | Con espejo |
| 8:05 | 18,70 | 19,80 | 0,052 | 0,125 | 0,97 | 2,48 |
| 8:10 | 18,70 | 19,80 | 0,057 | 0,1292 | 1,07 | 2,56 |
| 8:15 | 19,00 | 19,80 | 0,0583 | 0,15 | 1,11 | 2,97 |
| 8:40 | 18,40 | 19,50 | 0,06 | 0,14 | 1,10 | 2,73 |
| 9:00 | 19,00 | 19,90 | 0,0856 | 0,1812 | 1,63 | 3,61 |
| 9:10 | 18,60 | 19,80 | 0,08 | 0,22 | 1,49 | 4,36 |
| 9:20 | 18,70 | 19,70 | 0,12 | 0,25 | 2,24 | 4,93 |
| 9:30 | 18,40 | 19,60 | 0,07 | 0,25 | 1,29 | 4,90 |

*Tabla 7-3Mediciones de panel bajo sombreado parcial con y sin espejo reflector*

| Panel con espejo y lámina de aluminio reflectoras | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Hora | $V_{oc}$ [V] | | $I_{sc}$ [A] | | Potencia sin carga [W] | |
| | Con espejo | con lámina | Con espejo | Con lámina | Con espejo | Con lámina |
| 8:00 | 20,90 | 21,00 | 0,39 | 0,40 | 8,15 | 8,40 |
| 8:15 | 20,60 | 20,70 | 0,440 | 0,45 | 9,06 | 9,32 |
| 8:30 | 20,70 | 20,60 | 0,6000 | 0,60 | 12,42 | 12,36 |
| 10:30 | 20,50 | 20,10 | 0,53 | 0,57 | 10,87 | 11,46 |
| 11:30 | 19,60 | 19,60 | 0,5900 | 0,59 | 11,56 | 11,56 |
| 13:00 | 20,50 | 19,70 | 0,73 | 0,75 | 14,97 | 14,78 |
| 13:10 | 19,50 | 20,50 | 0,74 | 0,67 | 14,43 | 13,74 |
| 16:00 | 20,70 | 20,60 | 0,47 | 0,46 | 9,73 | 9,48 |
| 16:10 | 20,30 | 19,90 | 0,44 | 0,41 | 8,93 | 8,16 |
| 16:30 | 19,30 | 19,50 | 0,11 | 0,13 | 2,12 | 2,54 |

*Tabla 7-4Mediciones de panel con espejo y lámina de aluminio reflectoras*

## 7.2. ANEXO B: Ficha técnica Cool Mirror Film 330

| | |
|---|---|
| Descripción | 3M ™ Cool Mirror Film 330 es una película de espejo polimérica con una reflectancia media normal de incidencia del 89% o mayor. Refleja la luz que es útil para módulos fotovoltaicos y transmite la luz infrarroja (IR). La película Cool Mirror 330 se puede utilizar para aumentar significativamente PV potencia del módulo al aumentar la cantidad de luz en el módulo al tiempo que limita la cantidad de Luz IR generadora de calor en el módulo. En ángulos típicos de incidencia, Cool Mirror Film 330 tiene bajo reflectancia visible, que limita los reflejos cegadores asociado con espejos de banda ancha en fijo Sistemas LCPV. |
| Características | Baja reflectividad visible en incidencia normal.<br>Alta reflectividad visible en ángulos de incidencia mayores.<br>Reflectividad adaptada al espectro solar y respuesta de las celdas solares de silicio.<br>Construcción totalmente polimérica, lo que elimina la corrosión.<br>Sin plomo. |
| Propiedades ópticas | Reflectividad media de incidencia normal (700-1250nm) de un 89% mínimo<br>Reflectividad fotópica de incidencia normal de 25% máximo. |
| Propiedades físicas | Espesor de 0,107[mm]<br>Ancho máximo: 1,22 [m] |

*Figura 7.1 Ficha técnica Cool Mirror Film 330 de 3M*

## 7.3. Anexo C: Ficha Técnica termistor

| | |
|---|---|
| Rango de medición de temperatura | -40° a 135°C |
| Rango de resistencia a la temperatura | -50° a 140°C |
| Incertidumbre de temperatura | • ±0,2 °C tolerancia (-40 a 70°C)<br>• ±0,5 °C tolerancia (71 a 105°C)<br>• ±1 °C tolerancia (106 a 135°C) |
| Error de linealización de ecuación de Steinhart-Hart | 0,0024°C (a -40°C) máximo |
| Material del disco | Aluminio anodizado |
| Material de cubierta del cable | Santoprene |
| Material Cable/Sonda de conexión | Santoprene |
| Longitud máxima del cable | 304,8 [m] (1000 [ft]) |
| Diámetro de disco | 2,54[cm] (1 [in]) |
| Longitud de sonda | 6,35 [cm] (2,5 [in]) |
| Dimensiones de la junta sobremoldeada | 5,72 x 1,12 x 1,47 [cm](2,25 x 0,44 x 0,58 [in]) |
| Peso | 90,7[g] con cable de 3,2 [m] (0,2 [lb] con cable de 10,5 [ft] |

*Figura 7.2 Ficha Técnica Termistor Campbell Scientific 110 PV-L.*

## 7.4. Anexo D: Ficha Técnica Panel fotovoltaico

| Datos generales | |
|---|---|
| Dimensiones [mm] | 1640 x 992 x 40 |
| Peso [kg] | 20 |
| Tipo de vidrio y espesor [mm] | 3,2/4,0 (Vidrio templado/Revestiemiento de vidrio AR) |
| Largo del cable [mm] | 900 |
| Tipo de conector | MC4 o conector compatible |
| Características Eléctricas (STC) | |
| Potencia nominal (Pmáx)[W] | 250 |
| Voltaje de máxima potencia (Vmp) [V] | 30,7 |
| Corriente de máxima potencia (Imp) [A] | 8,15 |
| Voltaje de circuito abierto (Voc) [V] | 36,8 |
| Corriente de cortocircuito (Isc) [A] | 8,87 |
| Tolerancia de potencia | 0-3% |
| Eficiencia del módulo | 15,32% |
| Rendimiento eléctrico (NOCT) | |
| Potencia de salida (Pmáx) [W] | 181 |
| Voltaje de máxima potencia (Vmp) [V] | 27 |

| | |
|---|---|
| Corriente de máxima potencia (Imp) [A] | 6,7 |
| Voltaje de circuito abierto (Voc) [V] | 34,8 |
| Corriente de cortocircuito (Isc) [A] | 7,23 |
| Temperaturas características | |
| NOCT [°C] | 45±2 |
| Coeficiente de temperatura de Pmáx | -0,45%/°C |
| Coeficiente de temperatura de Voc | -0,32%/°C |
| Coeficiente de temperatura de Isc | 0,06%/°C |
| Capacidad máxima del fusible [A] | 15 |
| Temperatura de operación [°C] | -40 a 85 |
| Temperatura de almacenaje [°C] | -40 a 85 |

*Figura 7.3 Ficha técnica del panel fotovoltaico Stärkee JS 250M.*

## 7.5. Anexo E: Especificaciones técnicas CR1000

| ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS | |
|---|---|
| Entradas analógicas | 16 individuales u 8 diferenciales (configurados individualmente) |
| Contadores de pulso | 2 |
| Terminales de excitación de voltaje | 3 (VX1 a VX3) |
| Puertos de comunicaciones | Periférico paralelo, RS-232, CS I / O |
| Número de terminales de conmutación para 12 [V] | 1 terminal |
| Límites de entrada | ± 5 Vdc |
| Precisión de voltaje analógico | ± 0.06% (medida incluida con la desviación) desde 0 °C a 40 °C |
| ADC | 13 bit |
| Requerimientos de energía | 9.6 a 16 Vdc |
| Batería de respaldo SRAM para uso de CPU y almacenamiento final | 4 MB |

*Figura 7.4 Especificaciones técnicas Datalogger CR1000*

## 7.6. Anexo F: Cálculo del error

**Error Divisor de tensión**

$$\delta V = \sqrt{E_{DL}^2 + E_{cal}^2 + E_a^2}$$

Con $E_{DL}$ error del datalogger, $E_{cal}$ error del instrumento de calibración, $E_a$ el error aleatorio de la medición en cuestión y $\delta V$ error de la tensión medida por el divisor de tensión.

**Error Divisor del shunt**

$$\delta I = \sqrt{E_{DL}^2 + E_{cal}^2 + E_a^2}$$

Con $E_{DL}$ error del datalogger, $E_{cal}$ error del instrumento de calibración, $E_a$ el error aleatorio de la medición en cuestión y $\delta I$ error de la corriente medida por el shunt.

**Error termistor**

$$\delta T = \sqrt{E_{DL}^2 + E_{ins}^2 + E_a^2}$$

Con $E_{DL}$ error del datalogger,$E_{ins}$ error del instrumento de medición, $E_a$ el error aleatorio de la medición en cuestión y $\delta T$ error de la temperatura medida por el termistor.

**Error de temperatura ambiente**

$$\delta T_a = \sqrt{E_{DL}^2 + E_{ins}^2 + E_a^2}$$

Con $E_{DL}$ error del datalogger,$E_{ins}$ error del instrumento, $E_a$ el error aleatorio de la medición en cuestión y $\delta T_a$ error de la temperatura ambiente medida por sensor 083E-L.

**Error piranómetro**

$$\delta R = \sqrt{E_{DL}^2 + E_a^2}$$

Con $E_{DL}$ error del datalogger, $E_a$ el error aleatorio de la medición en cuestión y $\delta R$ error de la temperatura medida por el termistor.

**Error potencia continua**

La potencia continua se obtiene indirectamente, por lo que el error asociado se calcula como:

$$\delta P = \sqrt{|\bar{I}\delta V|^2 + |\bar{V}\delta I|^2}$$

Con $\bar{I}$ medición promedio de intensidad de corriente, $\bar{V}$ tensión media de voltaje, $\delta I$ y $\delta V$ sus errores respectivos, y $\delta P$ error asociado a la potencia eléctrica continua.

**Error eficiencia panel**

La eficiencia del panel se obtiene indirectamente, por lo que el error asociado se calcula como:

$$\delta\eta_p = \sqrt{\left(\frac{\bar{P_p}}{\overline{P_R^2}}\delta\overline{P_R}\right)^2 + \left(\frac{1}{\overline{P_R}}\delta\bar{P_p}\right)^2}$$

Con $\bar{P_p}$ la medición promedio de la potencia del panel, $\overline{P_R}$ la medición promedio de la radiación que llega al panel,$\delta\ \bar{P_p}\ y\ \delta\overline{P_R}$ sus errores asociados, y $\delta\eta_p$ el error asociado a la eficiencia del panel.