

2017

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

TEITELMAN LIPCHENCA, IAN

<http://hdl.handle.net/11673/40908>

Repositorio Digital USM, UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

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



“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”

IAN TEITELMAN LIPCHENCA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO MENCIÓN ENERGÍA

PROFESOR GUÍA: DR. ING. RODRIGO BARRAZA VICENCIO
PROFESOR CO-REFERENTE: MS. ING. DAVID SALDIVIA SALAZAR
CURSO: MEC-399 TRABAJO TIT. ING CIVIL MECÁNICA

JULIO – 2017

Resumen

La producción de energía eléctrica, a partir de energía solar incidente sobre la tierra, a gran y pequeña escala está en aumento en muchas partes del mundo al igual que en Chile, debido entre otras razones, a la tendencia en la disminución de costos de las tecnologías, políticas energéticas de país, o el constante desarrollo de nuevas tecnologías, de las cuales algunas persiguen mejorar el desempeño de instalaciones ya en funcionamiento o tecnologías más antiguas. Este estudio se enfoca en el efecto producido sobre un panel fotovoltaico de silicio monocristalino de potencia nominal 250 [W] al instalar un concentrador solar para aumentar la radiación incidente. Este concentrador solar, está construido básicamente por una lámina reflectora selectiva de radiación adherida a un vidrio templado incoloro posicionado en frente del panel. Esta lámina es un film desarrollado por la empresa 3M que refleja solo la radiación de longitud de onda útil para el panel fotovoltaico, evitando reflejar una fracción del espectro que solo aporta a un aumento de temperatura del panel, efecto no deseado.

En Estados Unidos hay empresas que utilizan este producto y hay reportes de que pueden producir hasta un 17% más de potencia en el mismo espacio en comparación a una planta sin los reflectores. En Chile la empresa 3M tiene la oportunidad de vender este film, pero no ha podido introducirlo en el mercado por diversos motivos, siendo uno de ellos la falta de información respaldada seriamente de cómo podría afectar este reflector al panel y su producción de energía. A raíz de esta situación y en cooperación entre 3M y la Universidad Técnica Federico Santa María se decide realizar un estudio de forma comparativa entre dos paneles iguales, uno con el reflector y otro sin.

Para llevar a cabo el estudio, se realizaron modificaciones a la infraestructura disponible en el techo del edificio de mecánica del campus San Joaquín, fabricando estructuras que permitieran variar el ángulo de inclinación de los paneles. También se construyó el soporte para el reflector y estructuras para los instrumentos de medición. Como segunda fase, se diseñó el experimento y se decidió estudiar las variables de radiación, potencia y temperatura de cada panel en 3 configuraciones distintas. Parte importante del estudio fue la de validar las mediciones a realizar mediante pruebas y calibración de los inversores, piranómetros y termocuplas.

Finalmente se procesaron los datos y se reveló hasta un aumento de un 9% en la potencia, correspondiente a 16 [W] extra en el panel con el reflector. La radiación se elevó en 150 [W/m²] y la temperatura subió 5 [°C]. Adicionalmente se revelaron efectos visuales y del polvo acumulado. Estos resultados dan pie para seguir estudiando y optimizando la utilización de esta tecnología.

Abstract

The production of electric energy, from solar energy incident to the earth, on a large and small scale is increasing in many parts of the world as in Chile, due, among other reasons, to the trend in the reduction of costs of Technologies, country energy policies, or the constant development of new technologies, some of which seek to improve the performance of existing facilities or ones with older technologies. This study focuses on the effect of a nominal monocrystalline silicon photovoltaic panel 250 [W] when installing a solar concentrator to increase incident radiation. This solar concentrator is basically constructed of a selective radiation reflective sheet attached to a colorless tempered glass positioned in front of the panel. This film is a film developed by the company 3M that reflects only the wavelength radiation useful for the photovoltaic panel, avoiding to reflect a fraction of the spectrum that only contributes to a panel temperature increase, which is undesired effect.

In the United States there are companies that use this product and there are reports that they can produce up to 17% more power in the same space compared to a plant without the reflectors. In Chile the company 3M has the opportunity to sell this film, but it has not been able to introduce it in the market for several reasons, one of them being the lack of information seriously backed on how this reflector could affect the panel and its energy production. As a result of this situation and in cooperation between 3M and the Federico Santa María Technical University, it was decided to carry out a comparative study between two equal panels, one with the reflector and the other without.

To carry out the study, modifications were made to the available infrastructure in the roof of the building of the San Joaquin campus, fabricating structures that allowed to vary the angle of inclination of the panels. We also built the support for the reflector and structures for the measuring instruments. As a second phase, the experiment was designed and it was decided to study the radiation, power and temperature variables of each panel in 3 different configurations. An important part of the study was to validate the measurements to be carried out by means of tests and calibration of the inverters, pyranometers and thermocouples.

Finally the data were processed and revealed up to a 9% increase in power, corresponding to 16 extra [W] in the panel with the reflector. The radiation increase by 150 [W / m²] and the temperature also increase by 5 [°C]. Additionally visual effects and accumulated dust were revealed. These results provide the opportunity to further study and optimization of the use of this technology.

Agradecimientos

Agradezco de todo corazón y de forma especial a mi padre por su constante apoyo y preocupación a lo largo de todo mi proceso formativo desde que tengo memoria. Aprecio enormemente todos los sacrificios que ha hecho por mí y su inconmensurable dedicación que hacen posible haber llegado a donde me encuentro hoy en día.

Gracias a los profesores PhD. Rodrigo Barraza y MsC. David Saldivia por involucrarse en mi proyecto, brindar apoyo de manera transversal en todas sus aristas y por sobre todo por su buena disposición y excelente trato.

A la empresa 3M, Fernando Cifuentes y Claudio Castro por proveer su colaboración y materiales fundamentales para la realización de este estudio.

Finalmente muchas gracias a mis queridos amigos quienes constituyen una fuente de alegría y buenos momentos, alimento fundamental para el alma.

*Dedicado mis abuelos
Frida y Angel Z"L*

Glosario

C/R: Con Reflector

CDEC: Centro de Despacho Económico de Carga

CM10: Modelo piranómetro

CM3: Modelo piranómetro

CNE: Comisión Nacional de Energía

ERNC: Energías Renovables No Convencionales

IEA, International Energy Agency: Agencia Internacional de la Energía. Busca coordinar las políticas energéticas de 30 países, miembros de la organización para la cooperación y el desarrollo económico.

LCPV, Low Concentration PV: Concentrador solar para módulos fotovoltaicos, con concentración menor equivalente a 100 soles [1]

MPPT, Maximun Powet Point Tracker: seguidor del punto de máxima potencia. Tecnología incorporada en algunos inversores que permiten al modulo FV trabajar continuamente en su punto de máxima potencia

NREL, Natioanl Renewable Energy Laboratory: Laboratorio de estudio y desarrollo de energías renovables perteneciente al gobierno de estados unidos.

Panel o Modulo Fotovoltaico: Conjunto de células fotovoltaicas conectadas entre sí como unidad aislada del medio ambiente.

PV, Photo Voltaic: Fotovoltaico (a)

S/R: Sin Reflector

SIC: Sistema Interconectado Central

SING: Sistema Interconectado de Norte Grande

Nomenclatura

Abreviación	Nombre	Unidad
σ	Error experimental	
σ_i	Error instrumental	
$\sigma(\bar{X})$	Error estándar	
\bar{X}	Promedio de datos	
N	Cantidad de datos	[-]
η_{panel}	Eficiencia panel	[-]
T	Temperatura	[°C]
V_{out}	Voltaje salida	[V]
V_{in}	Voltaje salida	[V]
R	Factor de correlación	[-]
h	Hora solar	[°]
α	Altitud	[°]
Z	Azimutt	[°]
β	Latitud	[°]
γ	Inclinación PV	[°]

Índice General

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Agradecimientos.....	v
Glosario.....	vi
Nomenclatura.....	vii
Índice General.....	viii
1. Introducción.....	13
1.1. Información General.....	13
1.2. Descripción del problema.....	14
1.3. Objetivo General.....	14
1.4. Objetivos Específicos.....	14
1.5. Situación Energética Nacional.....	15
1.5.1. Energía Solar.....	15
1.5.2. Capacidad Instalada.....	17
1.5.3. Catastro de Proyectos.....	18
1.6. Marco Teórico.....	19
1.6.1. Marco Teórico Panel Fotovoltaico.....	19
1.6.2. Modelos Radiación.....	20
1.6.3. Evolución Tecnologías PV.....	22
2. Estado del Arte.....	23
2.1. Film Reflector "Cool Mirror".....	23
2.2. Tecnologías Existentes.....	24
2.2.1. Experimento con Reflector de Aluminio.....	24
2.2.2. Sistema "RAIS WAVE".....	26
2.2.3. Concentrador Solar "3X".....	27
2.2.4. TenK Solar.....	29
3. Metodología de Medición.....	30
3.1. Error.....	30
3.2. Variables de Medición.....	32
3.2.1. Temperatura.....	32
3.2.2. Radiación Incidente.....	33

3.2.3.	Potencia Eléctrica Generada en el Panel	34
3.2.4.	Eficiencia Panel.....	34
3.3.	Instrumentos y Calibración	34
3.3.1.	Termocuplas	35
3.3.2.	Piranómetros.....	39
3.3.3.	Inversores	42
3.3.4.	Amplificador de Señal.....	42
4.	Diseño Experimental.....	46
4.1.	Montaje disponible.....	46
4.2.	Modificación Montaje.....	47
4.3.	Disposición Instrumentos de Medición	49
4.4.	Configuraciones de Prueba	49
4.4.1.	Óptimo Panel – Óptimo Reflector.....	50
4.4.2.	Fijo Panel – Óptimo Reflector	51
4.4.3.	Fijo Panel – Reflector sin Sombreamiento.....	52
5.	Resultados y Conclusiones	53
5.1.	Efecto Visual.....	53
5.2.	Óptimo Panel – Óptimo Reflector	55
5.3.	Fijo Panel – Óptimo Reflector	60
5.4.	Fijo Panel – Reflector sin Sombreamiento	61
5.5.	Conclusiones	63
6.	Bibliografía	65
7.	Anexos	67

Índice de Figuras

Figura 1: Radiación solar en plano inclinado igual a la latitud para América del Sur [10]	15
Figura 2: Consumo energético en Chile producido por energía solar. [11]	16
Figura 3: Capacidad total instalada en Chile [2]	17
Figura 4: Capacidad instalada de generación solar fotovoltaica [2]	18
Figura 5: Capacidad instalada en el SIC y su proyección para el año 2017 [12]	19
Figura 6: Irradiancia espectral del centro mundial de radiación a distancia media tierra-sol [13]	20
Figura 7: Componentes de radiación solar incidentes en una superficie inclinada [13].....	21
Figura 8: Precio por Watt instalado según sector, y su proyección a partir del año 2014 en Estados Unidos [14].....	22
Figura 9: Muestra espectral del reflejo del film para dos ángulos de incidencia [16].....	23
Figura 10: Configuración panel reflector con reflector de aluminio. 3 paneles de 45 [W] [17]...	24
Figura 11: Comparación de la potencia total de los tres módulos en función del ángulo del reflector [18].....	25
Figura 12: Temperatura de celda para diferentes configuraciones [18]	25
Figura 13: LCPV, sin seguimiento con 3M Cool Mirror Film [18].....	26
Figura 14: Aumento de potencia máxima de salida con Cool Mirror Film [18].....	26
Figura 15: Concentrador solar para celdas fotovoltaicas [18]	27
Figura 16: Concentrador solar fotovoltaico con seguimiento en un eje [18].....	28
Figura 17: Potencia de salida para celdas con y sin reflectores en sistema 3X, medida en Las Vegas.....	28
Figura 18: Modulo “Reflect High – Yield PV System” de la empresa TenK Solar. Ver Anexo B	29
Figura 19: Reflect™ High-Yield PV System para techo plano	30
Figura 20: Curva característica I-V de un módulo PV a temperaturas 0 y 75 [°C] [13].....	32
Figura 21: Máxima potencia en función de la temperatura para 3 niveles distintos de radiación [13]	33
Figura 22: Termocuplas 1 y 2 sumergidas en agua destilada junto a la termocupla ambiental (T7)	36
Figura 23: Prueba adhesión termocuplas con cinta doble contacto	36
Figura 24: Temperatura de las termocuplas en contacto directo con la superficie el 16 de diciembre 2017.	37
Figura 25: Adhesión de dos termocuplas con pasta termo conductora.....	38
Figura 26: Temperatura en configuración de prueba de Figura 25 el 20 de diciembre de 2017...	38
Figura 27: Piranómetros de radiación global utilizados en el estudio	39
Figura 28: Radiación horizontal piranómetros CM3 y CM10, sin sensibilidad ajustada	40
Figura 29: Radiación horizontal con sensibilidad de CM3 ajustada	41
Figura 30: Potencia de paneles estudiados ambos sin reflector, misma inclinación	42
Figura 31: Amplificador de voltaje para piranómetros.....	43
Figura 32: Esquema de montaje experimental para estudio del amplificador	43
Figura 33: Factor amplificador en función del voltaje de salida para CM10	44

Figura 34: Factor amplificador en función del voltaje de salida para CM3	44
Figura 35: Relación de voltaje para CM10.....	45
Figura 36: Relación de voltaje para CM3.....	45
Figura 37 Plantas solares disponibles en techo edificio mecánica campus San Joaquín	47
Figura 38: Instalación modificada en techo edificio mecánica, campus San Joaquín	47
Figura 39: Soporte de panel con brazo telescópico y ángulo variable	48
Figura 40: Esquema de posición de instrumentos de medición	49
Figura 41: Trayectoria solar vista desde el hemisferio norte [23]	50
Figura 42: Esquema panel recibiendo reflejo completo.....	50
Figura 43: Esquema panel con inclinación β igual a la latitud, recibiendo reflejo completo	52
Figura 44: Esquema filas de arreglos de paneles con reflectores entre ellos.....	53
Figura 45: Efecto visual del reflector para un día soleado	54
Figura 46: Reflejo sobre panel con 1/3 de reflector sin polvo	55
Figura 47: Radiación y potencia periodo completo con panel inclinado 45° y panel 14°	55
Figura 48: Potencia y radiación en día despejado para ángulo óptimo reflector y panel	56
Figura 49: Grafico de comparación de temperatura en misma ubicación para ambos paneles con T ambiental	58
Figura 51: Diagrama diferencia temperatura panel con reflector, con respecto al panel sin reflector con ubicación de termocuplas, para ángulo óptimo panel y reflector	59
Figura 52: Potencia y radiación en día despejado para ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector	60
Figura 53: Potencia y radiación en día despejado para ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombra	62
Figura 54: Datos meteorológicos 16 Diciembre para Santiago.....	71
Figura 55: Datos meteorológicos 20 Diciembre para Santiago.....	71
Figura 56: Data logger de voltaje TinyTagPlus.....	73
Figura 57: Potencia y radiación en día despejado para ángulo igual latitud panel y óptimo reflector	76
Figura 58: Potencia y radiación en día despejado para ángulo igual latitud panel y reflector sin sombramiento	76

Índice de Tablas

Tabla 1: Datos calibración termocuplas en agua hirviendo y a cero grados	35
Tabla 2: Especificaciones técnicas de los piranómetros	39
Tabla 3: Iteraciones factor amplificador piranómetro CM3	41
Tabla 4: Resultados promedios para ángulo óptimo panel y reflector	57
Tabla 5: Resultados promedios para ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector	61
Tabla 6: Resultados promedio para ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombra	62
Tabla 7: Especificaciones técnicas módulos Reflect High-Yield PV System	67
Tabla 8: Ficha técnica lámina reflectora "Cool Mirror Film 330"	68
Tabla 9: Ficha técnica data logger de temperatura	69
Tabla 10: Ficha técnica termocupla.....	70
Tabla 11: Datos de agua saturada [25].....	72
Tabla 12: Ficha técnica cinta 3M VHB 4910.....	73
Tabla 13: Ficha técnica panel FV Stärkee JS 250M	74
Tabla 14: Ficha técnica micro inversor SunnyBoy SB240-10.....	75
Tabla 15: Detalle cálculo resultados finales ángulo óptimo panel y reflector	77
Tabla 16: Detalle cálculo resultados finales ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector.....	77
Tabla 17: Detalle cálculo resultados finales ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombreamiento.....	78
Tabla 18: Detalle cálculo temperaturas ángulo óptimo panel y reflector	80
Tabla 19: Detalle cálculo temperaturas ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector	81
Tabla 20: Detalle cálculo temperaturas ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombreamiento	82
Tabla 21: Detalle cálculo errores de calibración	82
Tabla 22: Datos de posición solar en Campus San Joaquín para 13 abril.....	83

1. Introducción

1.1. Información General

El consumo de energía en el mundo es una tendencia al alza [1]. Según el Banco Mundial, desde 1971 hasta el año 2013, el consumo per cápita de energía en el mundo anual ha aumentado casi tres veces de 1200 [kWh] a 3104 [kWh]. Chile al igual que la mayoría de los países en el mundo exhibe la misma tendencia, mostrando un incremento de consumo de energía en el transcurso del tiempo. En el mismo periodo, en el país el consumo de energía per cápita ha crecido alrededor de 5 veces, de 776 [kWh] a 3878 [kWh].

En Chile, hasta Junio de 2016 el 56,16% de la capacidad instalada total del país corresponde a petróleo Diesel, carbón y gas natural. El 29,22% se adjudica a energía hidráulica, de embalses, y de centrales de pasada. El 7,66% es producto de parques eólicos y plantas generadoras que tienen como combustible biomasa. Finalmente el resto correspondiente a un 6,96% es producto de plantas de generación de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos [2].

En el año 2012 se comienza a producir energía solar con 185 [Tcal] [3], llegando a 1084 [Tcal] al año 2015 [4], lo cual representó un aumento de un 485% en el periodo, según los registros del Ministerio de Energía.

No es casualidad que se haya registrado un aumento tan grande en la industria de generación de energía solar con paneles fotovoltaicos. Esto se debe principalmente a dos motivos: el primero es que la política energética del país busca como objetivo que al año 2050, al menos el 70% de generación eléctrica nacional provenga de energías renovables [5]. El segundo, y más importante es la evolución de los costos y eficiencias de los paneles fotovoltaicos, los costos han disminuido y la eficiencia ha aumentado [6]–[8], así posicionando esta tecnología entre las más convenientes para su implementación.

En Chile, la empresa 3M dispone de una variada gama de productos destinados a mejorar en distintos ámbitos los arreglos de paneles fotovoltaicos. Uno de estos productos es un film reflector (“Cool Mirror Film”), cuya función es aumentar la radiación incidente sobre el panel, y por ende la producción de energía.

Por consiguiente se procede a realizar un estudio que responde a la necesidad de la empresa 3M de probar en operación el producto “Cool Mirror Film” y los efectos que este produce sobre los parámetros de operación de un panel fotovoltaico

1.2. Descripción del problema

El principal problema es que la empresa 3M llega hasta el desarrollo del producto y no está en su rol el involucrarse en los proyectos en los que podría ser utilizado. La empresa puede proporcionar las características técnicas del film reflector, pero no proporciona detalles en operación de cómo afectará a los paneles ni la forma óptima de utilización.

Al momento de tratar de incluir este producto en el mercado nacional, la falta de conocimiento y de experiencias reales en el país, evita que los potenciales clientes no se vean atraídos a involucrarse con este producto.

1.3. Objetivo General

Se estudiará el efecto de la instalación de una lámina reflectora en las vecindades de un panel fotovoltaico y se comparará con el mismo tipo de panel en ausencia del reflector, ambos ubicados en campus San Joaquín. La lámina reflectora es proporcionada por la empresa 3M y se registrarán mediciones de distintos parámetros de operación.

El objetivo general es estudiar comparativamente el efecto en la producción de energía en paneles fotovoltaicos debido a la instalación de una lámina selectora y reflectora de radiación solar.

1.4. Objetivos Específicos

- Estudio del estado del arte del efecto de láminas reflectoras adyacentes a paneles fotovoltaicos.
- Diseñar la metodología de medición para cuantificar el efecto de la instalación de la lámina sobre el panel.
- Medir experimentalmente los parámetros de operación de paneles fotovoltaicos con y sin láminas por un periodo de tiempo a definir.
- Cuantificar el efecto de la lámina reflectora sobre el panel fotovoltaico, tanto en su eficiencia como producción eléctrica y proponer una metodología de estimación del efecto de la lámina sobre el panel.

1.5. Situación Energética Nacional

1.5.1. Energía Solar

El sol irradia energía la cual viaja por el espacio, y una fracción de ella incide sobre el planeta tierra. El consumo energético mundial anual corresponde aproximadamente a un 0,01% de la energía que recibe la tierra del sol en una hora. El cálculo que se puede apreciar en el Anexo A .

Chile es uno de los países con mayor potencial solar en el mundo y en la región del continente [9], tal como se puede apreciar en la Figura 1. Otro motivo más, además de los mencionados anteriormente para promover la producción de energía con plantas solares y el uso de dispositivos en edificios o casas particulares y comerciales, como lo serían plantas fotovoltaicas de pequeñas dimensiones o los calentadores de agua que puedan ser instaladas o en el techo o patio de los inmuebles

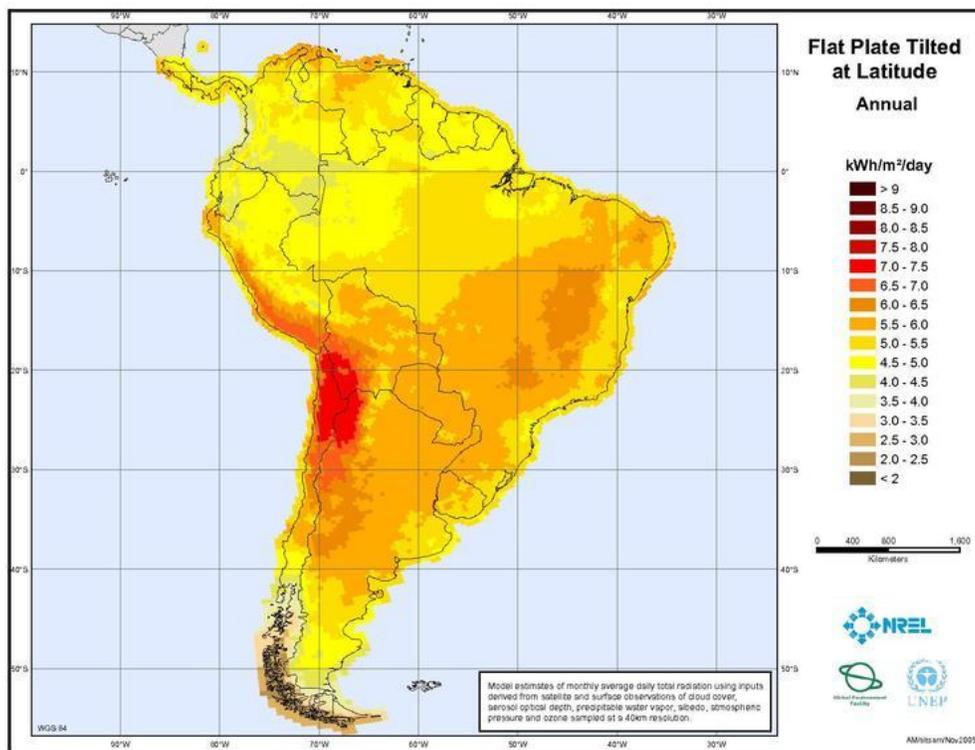


Figura 1: Radiación solar en plano inclinado igual a la latitud para América del Sur [10]

La penetración de las tecnologías de generación eléctrica a partir de energía solar en el mundo va en alza [1], y en Chile se puede apreciar el progreso desde el año 2012 al 2015, en base a los datos publicados por la comisión nacional de energía [11], representados en la Figura 2.

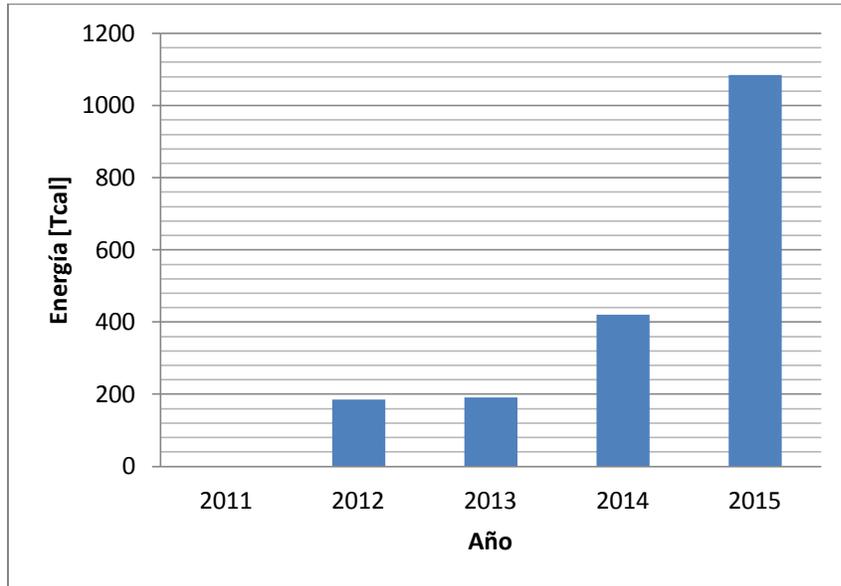


Figura 2: Consumo energético en Chile producido por energía solar. [11]

1.5.2. Capacidad Instalada

El sistema eléctrico en Chile se divide en 4 secciones de norte a sur, tal como se puede apreciar en la Figura 3, siendo los más grandes el SIC (Sistema Interconectado Central) y el SING (Sistema Interconectado del Norte Grande). A Junio de 2016, la capacidad total instalada es de 22.910,95 [MW], y de estos sólo el 6,96% corresponde a plantas de energía solar fotovoltaica [2].

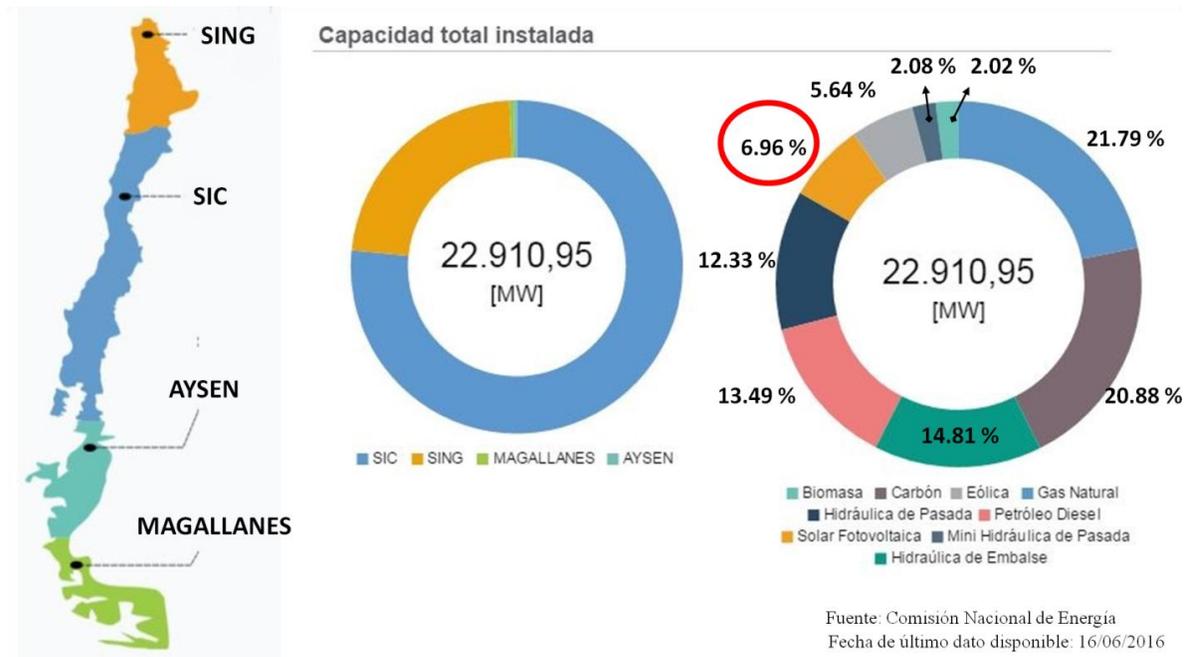


Figura 3: Capacidad total instalada en Chile [2]

En el norte de Chile, se encuentran los mayores niveles de radiación del país y un alto consumo energético por parte de la industria de la minería, sin embargo, sólo el 21,72 % de la capacidad fotovoltaica instalada se ubica en el SING, como se ve en la Figura 4. Esto revela el potencial de crecimiento que tiene la utilización de paneles fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica.

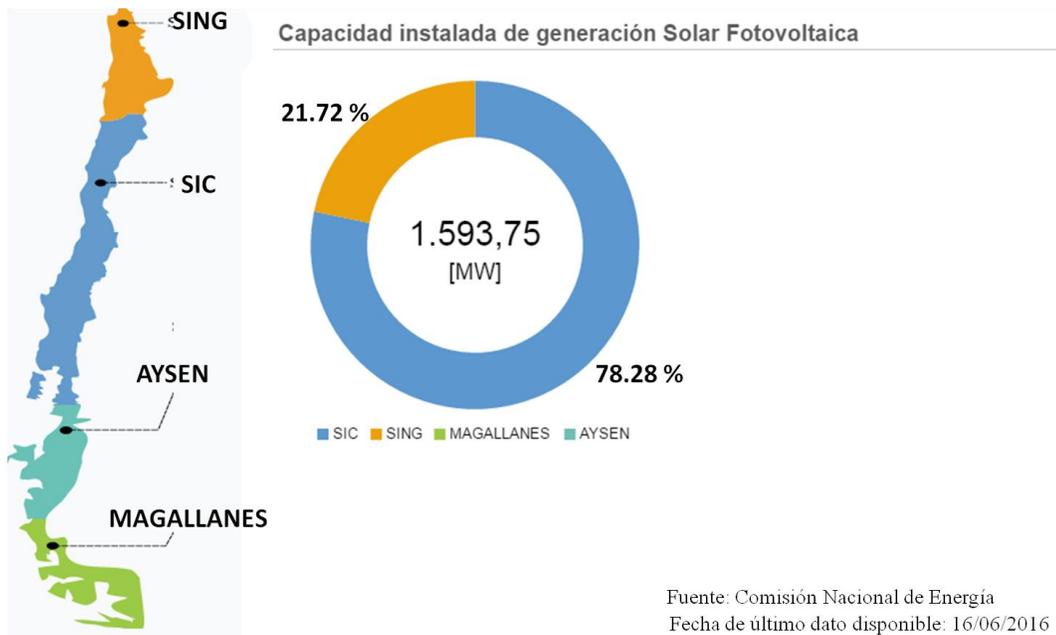


Figura 4: Capacidad instalada de generación solar fotovoltaica [2]

1.5.3. Catastro de Proyectos

Uno de los puntos más importantes que reafirman el interés de realizar el estudio de cómo afecta la lámina reflectora al panel y su producción de energía son los datos del catastro de nuevos proyectos para el SIC, lo cual se puede ver en la Figura 5. Éste indica en detalle la evolución de las capacidades instaladas de distintas tecnologías, convencionales, y renovables no convencionales. La tecnología que presenta mayor crecimiento desde diciembre de 2016 a diciembre de 2017, es la solar, alcanzando casi un 100%, siendo muy superior a la evolución de otras tecnologías. Cabe señalar que la energía solar que se utiliza para procesos térmicos de generación de energía eléctrica es menor a un 10% [12].

CAPACIDAD INSTALADA

Capacidad Instalada

Por Tecnología	2015 Cierre a Diciembre [MW]		2016 Cierre Diciembre [MW]		2017 * Proyección a Diciembre [MW]	
Térmica	8.177,0	51,4%	8.250,0	49,3%	8.375,0	46,0%
Embalse	3.402,0	21,4%	3.402,0	20,3%	3.402,0	18,7%
Pasada	3.068,5	19,3%	3.211,6	19,2%	3.307,8	18,2%
Eólica	819,9	5,2%	940,3	5,6%	1.276,1	7,0%
Solar	443,6	2,8%	938,4	5,6%	1.833,3	10,1%
Total	15.911,1	100,0%	16.742,2	100,0%	18.194,0	100,0%
ERNC	1.983,6	12,5%	2.703,3	16,2%	4.030,1	22,2%

*En construcción según ficha Catastro de Nuevos Proyectos

Capacidad Instalada ERNC

Por Tecnología	2015 Cierre a Diciembre [MW]		2016 Cierre a Diciembre [MW]		2017 * Proyección a Diciembre [MW]	
Minihidro < 20 MW (MW)	345,4	17,4%	441,6	16,3%	537,8	13,3%
Eólica	819,9	41,3%	940,3	34,8%	1.276,1	31,7%
Solar	443,6	22,4%	938,4	34,7%	1.833,3	45,5%
Otras ERNC	374,7	18,9%	383,1	14,2%	383,1	9,5%
Total	1.983,6	100,0%	2.703,3	100,0%	4.030,1	100,0%

*En construcción según ficha Catastro de Nuevos Proyectos

Figura 5: Capacidad instalada en el SIC y su proyección para el año 2017 [12]

1.6. Marco Teórico

1.6.1. Marco Teórico Panel Fotovoltaico

Para comprender un poco más sobre el reflector a utilizar y el efecto que se espera al instalarlo, se debe hacer un pequeño análisis sobre el funcionamiento de una celda fotovoltaica.

Los convertidores fotovoltaicos, mayormente conocidos como celdas solares o celdas fotovoltaicas (PV) son dispositivos semiconductores que convierten parte de la radiación solar incidente directamente en energía eléctrica. La radiación solar incidente se considera como unidades de energía discretas llamadas fotones. La energía de los fotones depende de la

frecuencia y longitud de onda. Los fotones con más energía son aquellos con mayor frecuencia y menor longitud de onda.

La mayoría de las celdas PV son fabricadas con silicio dispuesto de distintas formas como lo son monocristalino, policristalino y amorfo entre otros. La salida de las celdas está limitada por varios factores como la energía incidente, temperatura ambiental y de celda, reflexión en la superficie del panel y resistencia eléctrica de las células. Hay un mínimo nivel de energía y por ende una máxima longitud de onda en los fotones que pueden permitir el fenómeno de generación de energía eléctrica en las celdas PV. Para las celdas de silicio la máxima longitud de onda es de 1,15 $[\mu\text{m}]$, esto significa que radiación incidente con mayor longitud de onda a 1,15 $[\mu\text{m}]$ no podrá ser utilizada por la celda para generar energía eléctrica y será transformada en calor [13].

1.6.2. Modelos Radiación

Es útil saber la distribución espectral de la radiación extraterrestre, es decir, la energía asociada a cada longitud de onda a gran altura en donde no se ve afectada por la atmósfera. Esta distribución se aprecia en la Figura 6.

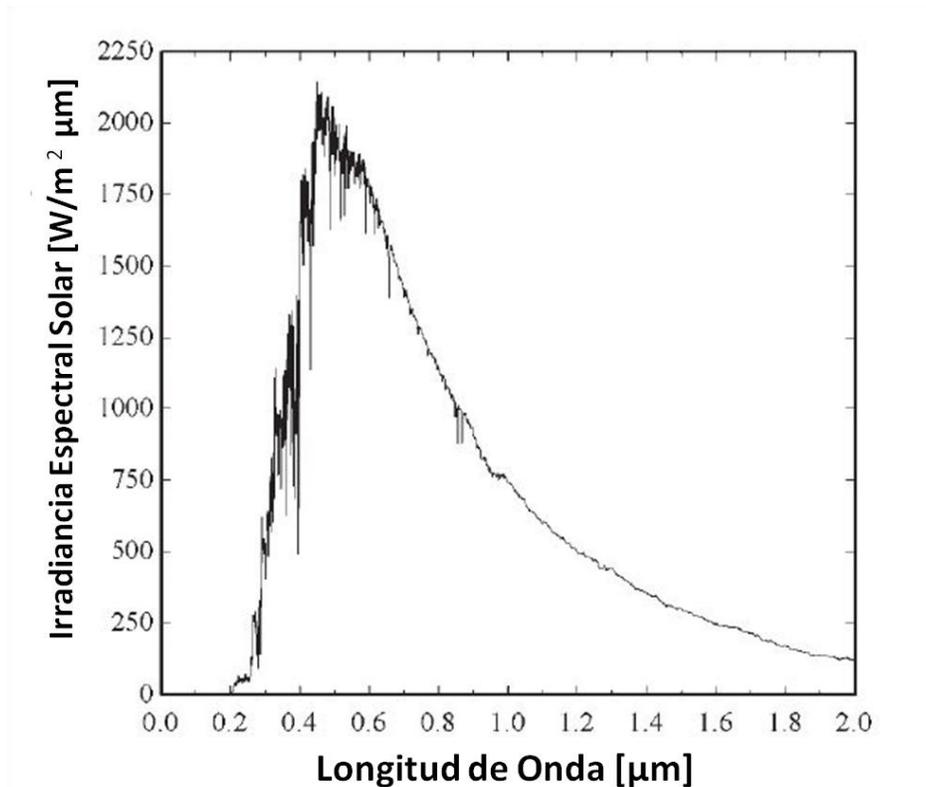


Figura 6: Irradiancia espectral del centro mundial de radiación a distancia media tierra-sol [13]

La curva se divide en 3 secciones, la radiación ultra violeta, visible e infrarroja. La ultra violeta es para longitud de onda inferior a $0,38 \text{ } [\mu\text{m}]$, la visible va desde $0,38$ hasta $0,78 \text{ } [\mu\text{m}]$ y la infrarroja desde $0,78 \text{ } [\mu\text{m}]$ hasta ∞ . En cuanto a la energía que se reparte en el espectro, la ultra violeta se lleva un $6,4\%$ mientras que la visible e infrarroja un $48,0\%$ y $45,6\%$ respectivamente [13].

Existen modelos para estimar la radiación en el plano horizontal en la superficie de la tierra y también para planos inclinados. Los modelos difieren en como estiman las distintas componentes de la radiación global compuesta por radiación directa, difusa y reflejada presentadas en la Figura 7. La radiación directa es aquella que no se dispersa producto de atravesar la atmosfera e incide sobre una superficie en la dirección de los rayos solares. La radiación reflejada es la que incide en alguna superficie como el suelo o algún otro cuerpo solido en la superficie terrestre y luego incide en la superficie de estudio. La radiación difusa es la que cambia su dirección al interactuar con la atmosfera e incide sobre una superficie desde todo el cielo. Esta última es difícil de predecir ya que depende de las condiciones atmosféricas. La radiación difusa está compuesta de radiación circunsolar difusa, radiación isotrópica y radiación de horizonte, y son estas 3 componentes específicamente que se trabajan de forma distinta al momento de modelar. El modelo isotrópico es el más simple ya que asume que la radiación difusa proviene de igual intensidad desde todo el cielo. Los modelos anisotropicos toman en cuenta los distintos componentes de la radiación difusa. Dentro de estos modelos se encuentran el de Olseth, Neuman, Startuieit, Hay & Davies, Klucher, Reindl y el modelo HDKR que es una combinación de Hay & Davies, Klucher y Reindl.

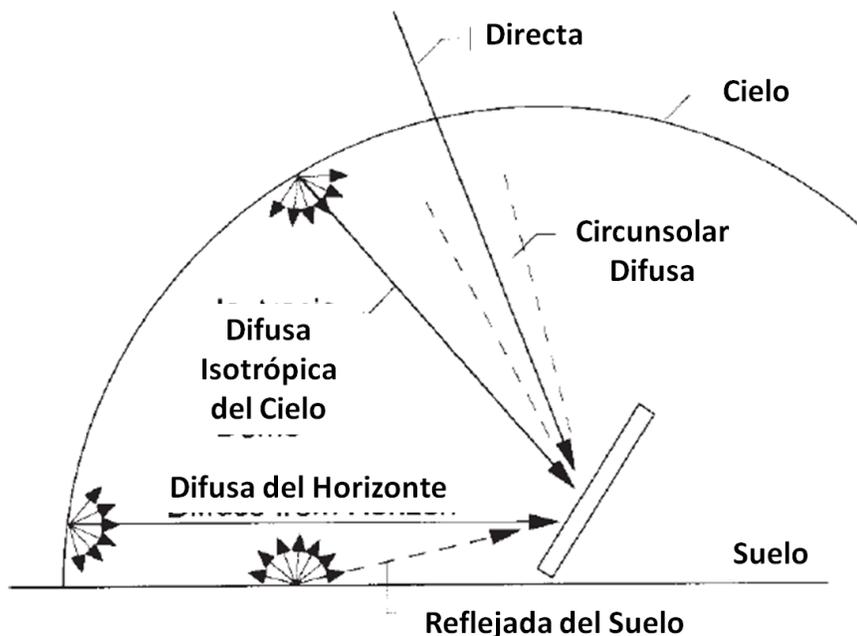


Figura 7: Componentes de radiación solar incidentes en una superficie inclinada [13].

1.6.3. Evolución Tecnologías PV

La tecnología de las celdas solares se está viendo involucrada rápidamente, en el desarrollo tecnológico de celdas más eficientes y de menores costos de manufactura como se ve en la Figura 8. En el mercado se pueden encontrar celdas de alrededor de 15% de eficiencias y con duración por sobre los 10 años [13].

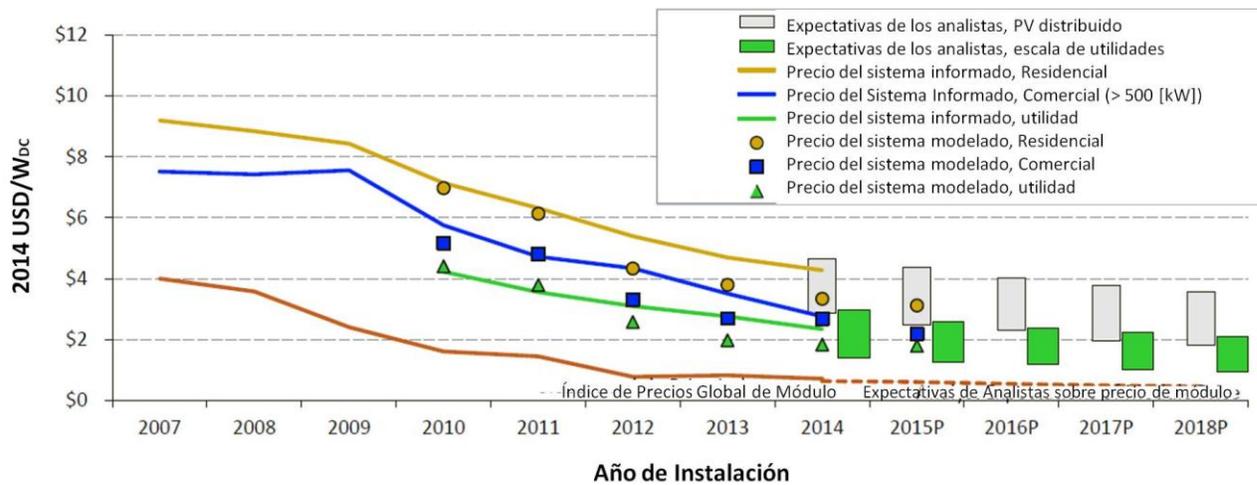


Figura 8: Precio por Watt instalado según sector, y su proyección a partir del año 2014 en Estados Unidos [14]

Las celdas PV se pueden encontrar actualmente en plantas de generación, llamados parques fotovoltaicos, en satélites, boyas marinas, dispositivos aislados, tales como: calculadoras y relojes, estaciones de comunicación, sistemas de bombeo y en pequeñas plantas para edificios particulares, o un conjunto reducido de casas entre otros [15].

2. Estado del Arte

2.1. Film Reflector "Cool Mirror"

"Cool Mirror Film 330" es una lámina cuya finalidad es la de ser utilizada para la construcción de reflectores, especialmente enfocado en paneles fotovoltaicos. Este producto es un film producido por la empresa 3M, el cual al ser instalado sobre un vidrio actúa como un reflector, que refleja radiación con longitud de onda útil para el panel, evitando reflejar la sección del espectro de radiación solar que al incidir sobre el panel solo aumenta su temperatura como lo hace la mayor parte del espectro infrarrojo. En la Figura 9 se aprecia la luz que refleja este film para dos ángulos de incidencia diferentes.

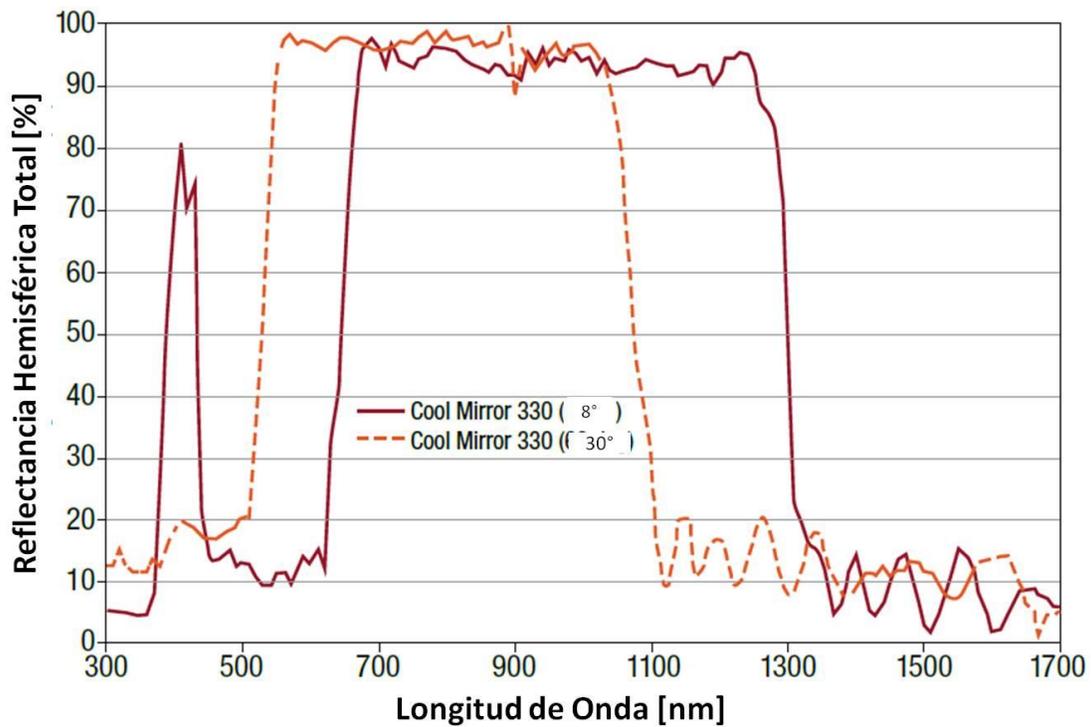


Figura 9: Muestra espectral del reflejo del film para dos ángulos de incidencia [16].

2.2. Tecnologías Existentes

2.2.1. Experimento con Reflector de Aluminio

En la Universidad de Shahid Bahonar (Irán), se realizó un estudio mediante un montaje experimental para cuantificar los efectos en un sistema solar fotovoltaico para bombear agua, utilizando un sistema de enfriamiento para disminuir la temperatura de celda y un reflector para aumentar la radiación incidente de los paneles fotovoltaicos

Se utilizaron 3 paneles de 45 [W], de dimensiones 960 x 460 x 30 [mm] y el reflector se hizo de láminas de aluminio de la misma dimensión que los paneles para que los PV recibieran la radiación reflejada de forma uniforme como se ve en la Figura 10. Los paneles se posicionaron apuntando al sur, con una inclinación igual a la latitud de 30° con respecto al horizonte. Los paneles se conectaron a una bomba de agua utilizando un seguidor de punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés). Esta bomba es la que alimenta el sistema de enfriamiento que consiste en un tubo con perforaciones en la parte superior de los paneles, el cual produce una película de agua sobre los paneles, la que fluye por gravedad. Para medir la temperatura se utilizaron termocuplas de contacto modelo “PT100” posicionadas por sobre y debajo de los paneles. Se detectó una temperatura de 2 [°C] más alta en la parte superior de los paneles. La radiación se midió con un piranómetro modelo “BM 6”, marca Kip&Zonen en la misma inclinación que los paneles. Las mediciones se realizaron durante tres semanas entre junio y julio cada 15 minutos [17].



Figura 10: Configuración panel reflector con reflector de aluminio. 3 paneles de 45 [W] [17].

Primero se determinó de forma experimental el ángulo óptimo del reflector. Se probaron distintos ángulos como se puede ver en la Figura 11 para días completamente soleados.

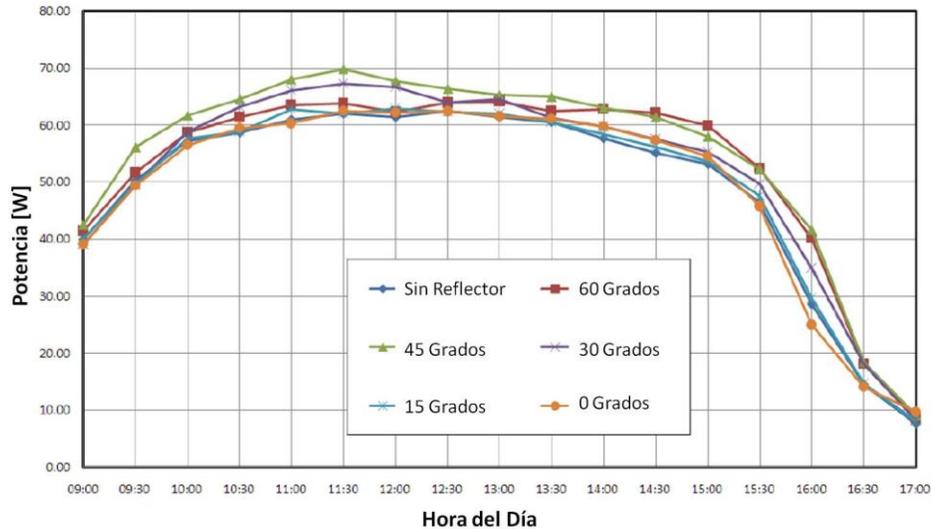


Figura 11: Comparación de la potencia total de los tres módulos en función del ángulo del reflector [18].

Luego de determinar el ángulo óptimo del reflector para esos días correspondiente a 45 [°], se probaron distintas configuraciones, con y sin reflector en presencia y ausencia de la película de agua. Los resultados obtenidos mostraron un aumento de un 14 [%] de producción de energía al utilizar solo reflector, pero con este se registraron temperaturas significativamente más altas que sin el reflector de hasta 20 [°], como se puede apreciar en la Figura 12.

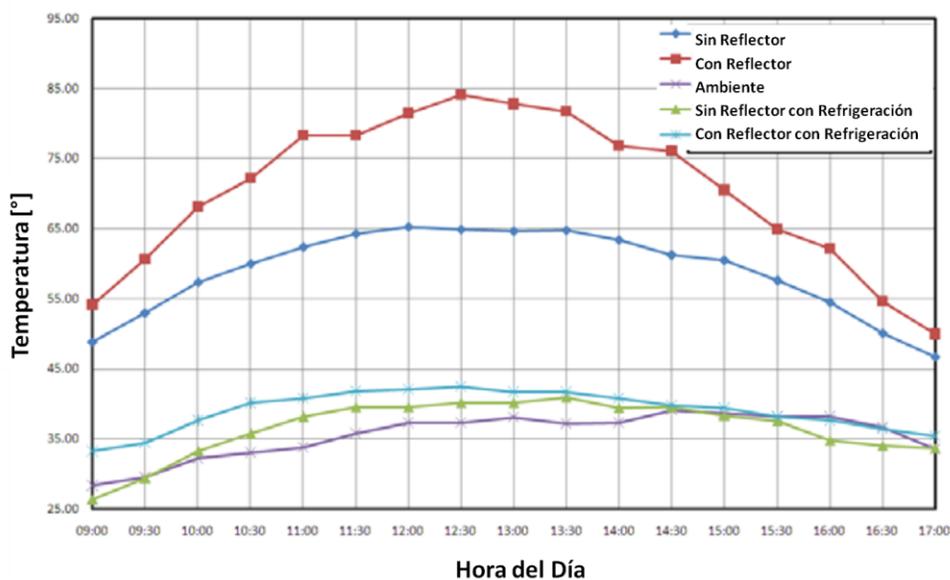


Figura 12: Temperatura de celda para diferentes configuraciones [18]

2.2.2. Sistema “RAIS WAVE”

En Minneapolis, existe una empresa llamada Sundial Solar la cual instala sistemas “RAIS WAVE”, denominados así por su forma de ola, utilizando como reflector el Cool Mirror Film de 3M, los cuales se pueden ver en la Figura 13.

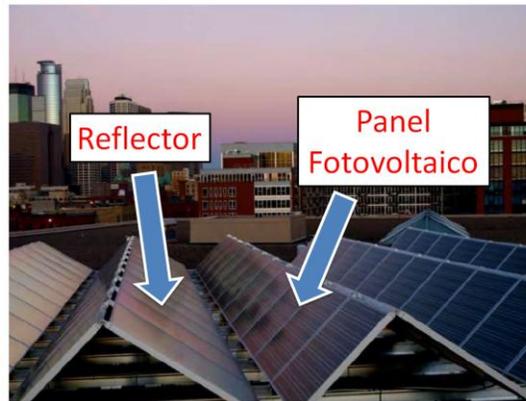


Figura 13: LCPV, sin seguimiento con 3M Cool Mirror Film [18].

En la Figura 14 se muestra la potencia máxima de salida en un día claro de verano en junio de 2010 entre las 11:50 y las 13:20 horas. Para esta instalación se reporta durante una hora un incremento de hasta un 60% en la potencia de salida máxima en comparación a la misma instalación pero en ausencia del reflector.

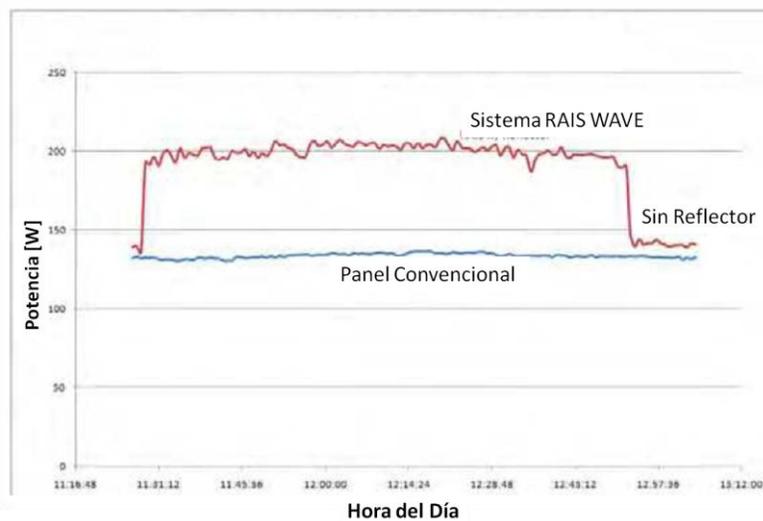


Figura 14: Aumento de potencia máxima de salida con Cool Mirror Film [18]

Los módulos fotovoltaicos RAIS[®] están diseñados para tolerar no solo sombra parcial, sino que también para incrementos no uniformes de radiación proporcionados por los reflectores. Esta empresa estima que para ciertas latitudes en donde es común los módulos fotovoltaicos en filas el costo de instalación de los reflectores puede ser de \$0,4 [US\$/Watt] instalado [18].

2.2.3. Concentrador Solar “3X”

Otra empresa que existe en el mercado es JX Cristals, quienes desarrollaron un concentrador en forma de “acordeón” llamado “Concentrador Solar 3X” para ser utilizado en configuración con seguimiento en un eje. El esquema de esta tecnología se puede ver en la Figura 15. Este concentrador tiene montados entre celdas fotovoltaicas de silicio reflectores contruidos con Cool Mirror Film. Los reflectores son de 1/3 del ancho de las celdas y están separadas 2/3 de ancho de las celdas.

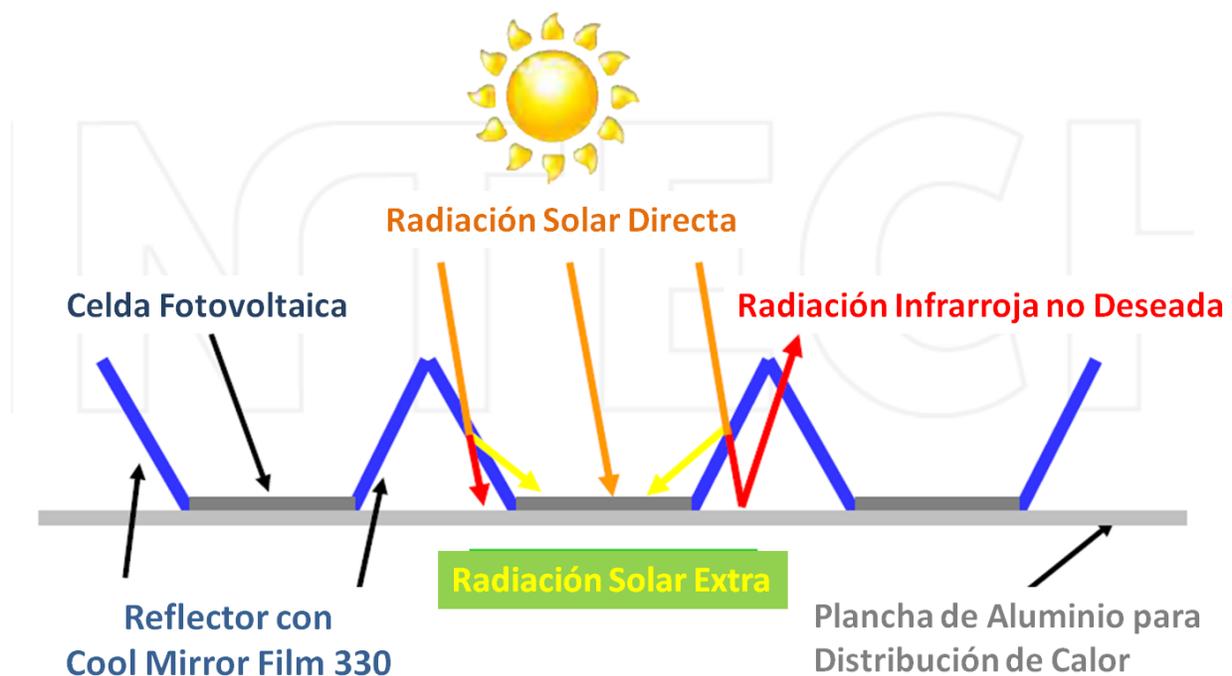


Figura 15: Concentrador solar para celdas fotovoltaicas [18]

En la Figura 16 se aprecia el sistema “3X” con seguimiento en un eje diseñado por JX Crystals para ser utilizado en techos planos. La ubicación es en el techo de la facultad de ciencia e ingeniería de la Universidad de Nevada, Las Vegas.



Figura 16: Concentrador solar fotovoltaico con seguimiento en un eje [18]

En el gráfico presentado a continuación en la Figura 17 se observa el aumento de potencia de un 100 [%] para la misma área de celdas fotovoltaicas de silicio para un día claro en junio de 2011.

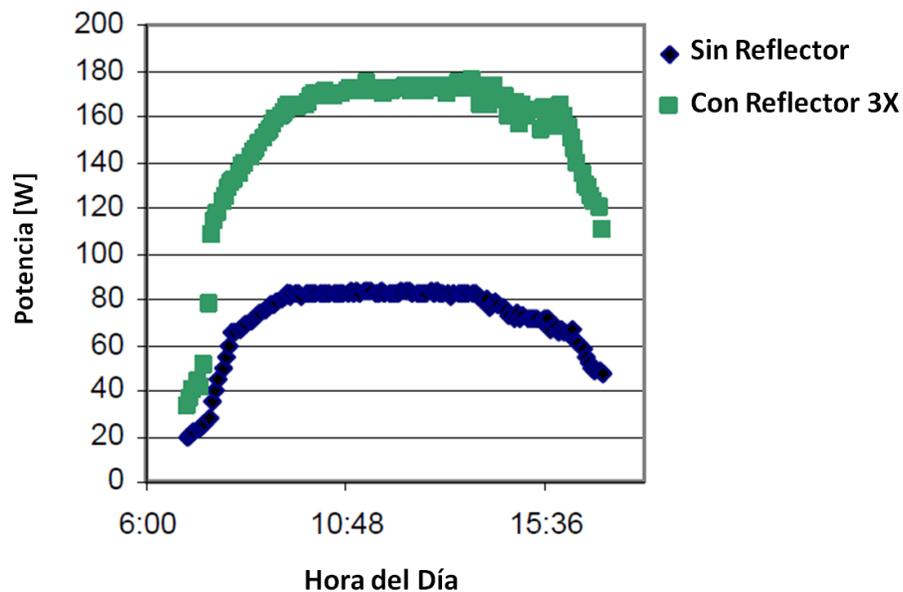


Figura 17: Potencia de salida para celdas con y sin reflectores en sistema 3X, medida en Las Vegas

2.2.4. TenK Solar

La compañía TenkSolar en Estados Unidos se dedica a crear, vender y montar sistemas de producción de energía eléctrica con paneles fotovoltaicos. Tiene instalaciones en más de 10 países del mundo. En Estados Unidos el número de proyectos instalados supera los 500, siendo los más grandes de alrededor de 1,5 [MW]. Dentro de sus creaciones tiene un sistema de módulos de paneles fotovoltaicos que traen entre filas un reflector integrado construido con la lámina reflectora Cool Mirror Film 330 como se ve en la Figura 18.



Figura 18: Módulo “Reflect High – Yield PV System” de la empresa TenK Solar. Ver Anexo B

La empresa proporciona dos casos de estudio basado en instalaciones. Uno de los casos es de una instalación en el techo de un edificio ubicado en Washington, D.C con el sistema tipo “Reflect-26” como se ve en la Figura 19. Este proyecto tiene una potencia instalada de 69,29 [kW]. Según la empresa, se produce un 32% adicional de energía en comparación a un sistema convencional solar y se tiene un 17 % extra de potencia en el mismo espacio producto de los reflectores [19].

El otro caso de estudio es en Frederick, MD con una potencia instalada de 949,69 [kW]. En este proyecto, TenK Solar reportó un 20% más en la producción de energía y un retorno a la inversión del proyecto en menos de 5 años [19].

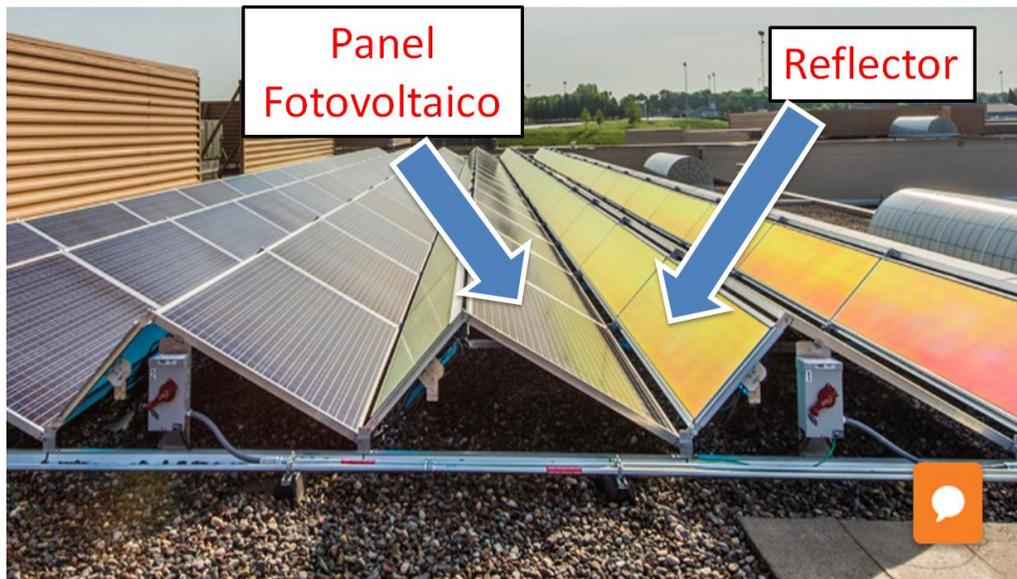


Figura 19: Reflect™ High-Yield PV System para techo plano

3. Metodología de Medición

3.1. Error

En este estudio se utilizaron varios instrumentos para tomar mediciones y estas tienen asociado un error experimental. Los resultados finales se expresan en forma de un valor promedio \pm error.

Para la estimación del error experimental “ σ ” se consideran dos tipos, el aleatorio e instrumental. El error aleatorio de una serie de mediciones puede estimarse como la desviación estándar “ σ_a ” de los datos medidos. El error instrumental σ_i corresponde, en general, a la resolución de instrumento, es decir, la mínima diferencia que es capaz de distinguir. En algunos instrumentos la resolución está dada por el fabricante. Si no es así, puede estimarse como ± 1 en el último dígito, para instrumentos digitales [20].

Cuando se quieren promediar datos cada uno con su error, como se realiza en este estudio para la calibración y obtención de resultados finales se debe calcular un error asociado al cálculo del promedio llamado error estándar. Este se calcula dividiendo la desviación estándar de los datos en la raíz cuadrada del número de mediciones “N” como se aprecia en la ecuación 3.1.

$$\sigma(\bar{X}) = \frac{\sigma(X)}{\sqrt{N}} \quad (3.1)$$

Hay dos hipótesis para trabajar la propagación de los errores. La pesimista que asume que los errores de las mediciones directas no se compensan entre sí, por lo que se estima el error máximo posible y la hipótesis estadística utilizada cuando las variables son aleatorias e independientes entre sí como lo es en este estudio que supone que los errores se compensan parcialmente. Además se considera que la incertidumbre de una variable de medida es una combinación de errores sistemáticos y aleatorios. Los errores sistemáticos determinarán la exactitud de la medición y son obtenidos por un análisis de calibración, resolución del instrumento y las especificaciones de exactitud del fabricante. Los errores aleatorios cuantifican la precisión de la medición y están determinados en este caso por el error estándar [21].

$$\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + \sigma(\bar{X})^2} \quad (3.2)$$

Otro aspecto que se debe considerar es la propagación de error al obtener mediciones indirectas, es decir, aquellas calculadas a partir de operaciones con mediciones directas. Si tenemos las variables $A \pm \sigma_a$, $B \pm \sigma_b$ y $C \pm \sigma_c$, según la hipótesis estadística para la suma y resta se tiene:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_a^2 + \sigma_b^2 + \sigma_c^2} \quad (3.3)$$

Para multiplicación, división potenciación y radiación:

$$Q = \frac{A^m B^n}{C^p} \quad (3.4)$$

$$\sigma = \bar{Q} \sqrt{\left(\frac{m\sigma_a}{A}\right)^2 + \left(\frac{n\sigma_b}{B}\right)^2 + \left(\frac{p\sigma_c}{C}\right)^2} \quad (3.5)$$

La propagación de errores se utiliza para saber que tan certeros son los resultados finales obtenidos. Finalmente el resultado expresado para cada variable es de la forma:

$$X = \bar{X} \pm \sigma \quad (3.6)$$

3.2. Variables de Medición

Para poder cuantificar el efecto de la presencia de un reflector en la producción de energía y evaluar los parámetros de operación del panel fotovoltaico utilizado, las variables a registrar serán radiación global, potencia de salida de los paneles y temperaturas de superficie de panel y medio ambiente.

3.2.1. Temperatura

La variable temperatura es importante en este trabajo, ya que, la eficiencia de las celdas PV disminuyen con el aumento de temperatura, como se puede ver a continuación en la Figura 20.

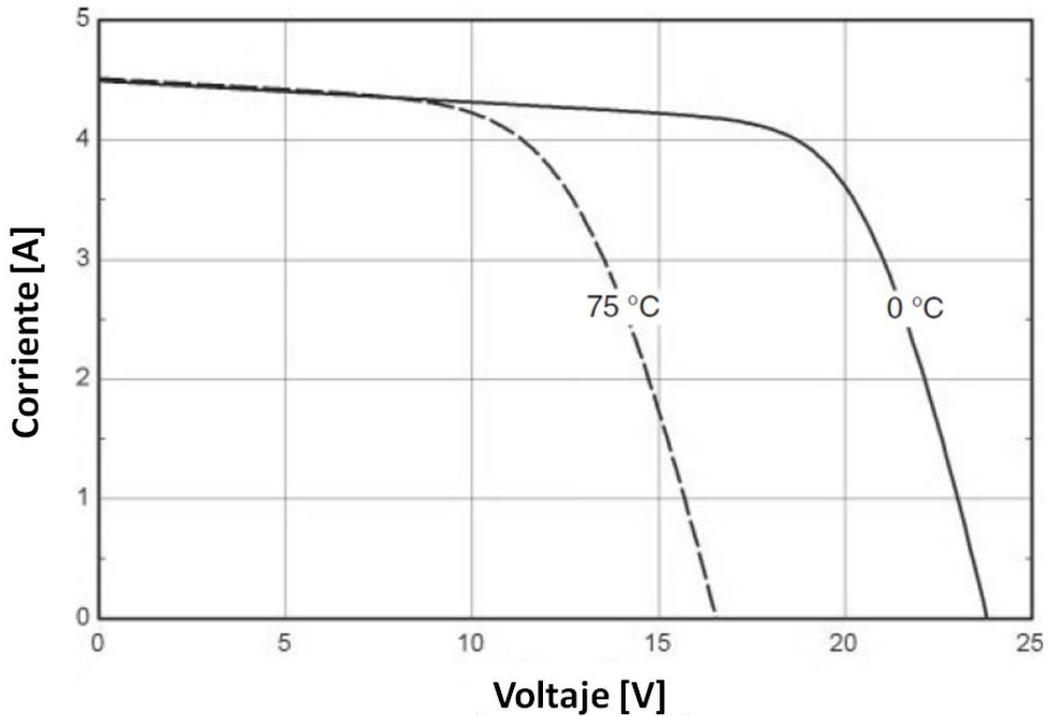


Figura 20: Curva característica I-V de un módulo PV a temperaturas 0 y 75 [°C] [13]

Como se puede apreciar en la Figura 20, con la misma corriente, el voltaje disminuye con el aumento de temperatura. El efecto de la temperatura también se puede apreciar en la Figura 21.

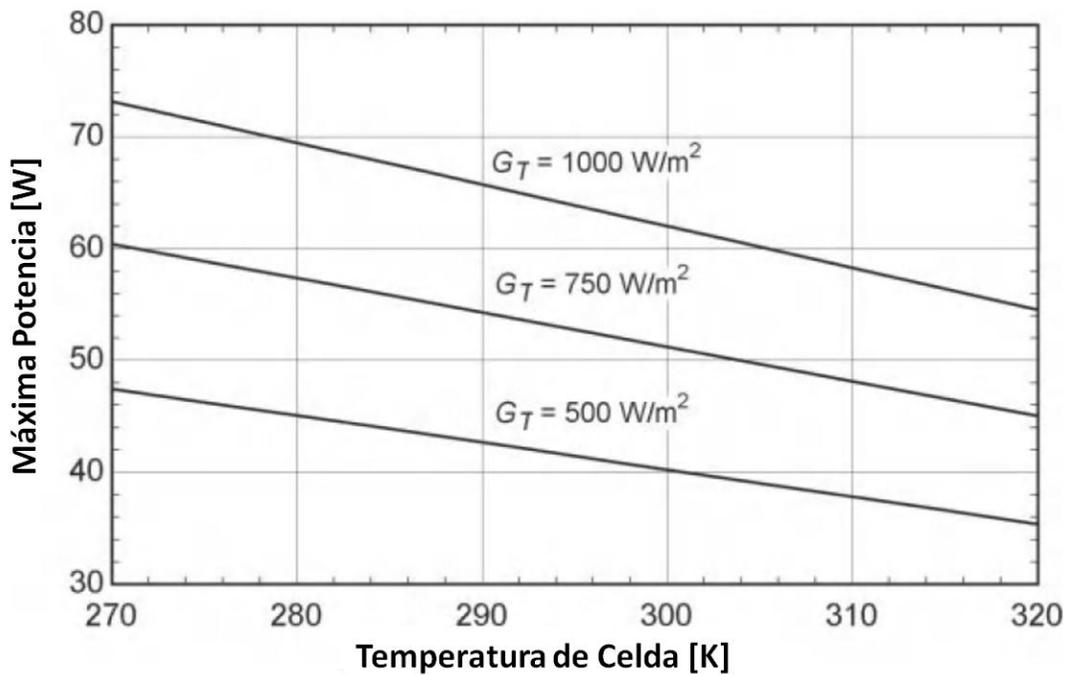


Figura 21: Máxima potencia en función de la temperatura para 3 niveles distintos de radiación [13]

La Figura 21 nos indica lo que podría pasar, que a pesar de tener un aumento de radiación como se espera en el experimento a realizar, en forma simultánea se tenga una pérdida de rendimiento del panel. En un caso extremo, debido al aumento de temperatura se podría generar la misma o incluso menor potencia de salida.

3.2.2. Radiación Incidente

La radiación incidente indica cuanta potencia solar por unidad de área incide sobre el panel. Su unidad corresponde a $[\text{W}/\text{m}^2]$. La cantidad de energía que incide sobre el panel por unidad de tiempo se obtiene a partir de la ecuación 3.7.

$$Potencia_{entrada} = Radiación_{incidente} \cdot Área_{panel} [W] \quad (3.7)$$

3.2.3. Potencia Eléctrica Generada en el Panel

Se mide la potencia de salida de cada panel. El seguidor de punto de máxima potencia (MPPT por sus siglas en inglés) permite que el panel siempre entregue la potencia máxima para las distintas condiciones a las que es sometido durante el periodo de análisis. El sistema de paneles está conectado a la red de consumo de la universidad, por lo que siempre se entrega toda la energía producida.

Los datos son registrados a través de una plataforma online llamada SunnyPortal que está conectada a los inversores de los paneles, registrando la potencia instantánea cada cinco minutos. Estos datos se descargan para luego ser procesados y utilizados en los resultados de este trabajo.

La potencia es el resultado final que más importa a la hora de vender el proyecto, ya que, a pesar de que disminuya la eficiencia, la producción de energía podría ser mayor en el panel con el reflector que en el sin reflector.

3.2.4. Eficiencia Panel

La eficiencia del panel PV es función de la potencia de salida y de entrada al panel. La eficiencia del panel se obtiene de la ecuación 3.8 y es el cociente de las potencias respectivamente. También con las características técnicas del panel, se puede obtener como varía la eficiencia de éste con reflector, del comportamiento esperado teórico. Este parámetro es sumamente importante para evaluar la rentabilidad económica de la instalación del reflector en cuestión.

$$\eta_{Panel} = \frac{Potencia_{salida}}{Potencia_{incidente}} [-] \quad (3.8)$$

3.3. Instrumentos y Calibración

Parte fundamental del experimento realizado fue contrastar y validar los distintos instrumentos de medición. Para esto se desarrollaron distintas configuraciones experimentales que permitieron verificar que los datos recolectados representan la realidad de precisa y repetible.

3.3.1. Termocuplas

Se utilizaron 6 termocuplas de contacto y una de temperatura ambiente. Para registrar las temperaturas se utilizaron data loggers marca TinyTag. Las características técnicas de éstos instrumentos se pueden encontrar en el Anexo D.

Para verificar el estado del sistema de medición de temperatura, se hicieron pruebas sumergiendo las termocuplas en agua destilada hirviendo y en una mezcla de agua destilada con hielo, debido a que en esas condiciones se tiene certeza de las temperaturas. Con este procedimiento lo que se busca es calibrar los datos medidos por las termocuplas.

El procedimiento utilizado consistió, en primer lugar, en sumergir todas las termocuplas de contacto al mismo tiempo en una olla con agua destilada hirviendo. Durante el procedimiento se registraron 70 datos cada 3 segundos de cada termocupla los cuales se promediaron. Finalmente, se corrigió en base a la desviación del promedio con respecto al valor de referencia, como se aprecia en la Tabla 1.

Se utilizó la medición de presión atmosférica de la estación de meteorología de la Universidad de Santiago de Chile para los días de calibración el 16 y 20 de diciembre de 2016. Se calculó la temperatura de agua saturada y el detalle se presenta en el Anexo E.

Adicionalmente para comprobar un segundo punto de referencia de temperatura se hizo una mezcla de agua destilada con hielo a 0 [°C]. Los resultados se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1: Datos calibración termocuplas en agua hirviendo y a cero grados

Termocupla	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Temperatura Agua Saturada Teórica [°C]	98,37						98,45
Promedio Mediciones en Agua Hirviendo [°C]	98,02	98,14	97,73	98,29	97,42	97,82	97,26
Diferencia [°C]	0,43	0,31	0,71	0,16	1,03	0,63	1,11
Temperatura Mezcla Agua con Hielo [°C]	-0,18	-0,18	-0,12	-0,07	-0,25	-0,27	0,10
Error de Medición “σ” (Ver Anexo N) [°C]	± 0,5						

Para corregir los datos medidos con las termocuplas, se sumó la diferencia de la Tabla 1 a los promedios de temperaturas de cada periodo como se puede ver en la sección de Resultados y Conclusiones.

En la Figura 22 muestra la forma en que se registraron las mediciones de la termocupla de temperatura ambiente junto a dos termocuplas de contacto. En el caso de la termocupla de contacto, se realizó la calibración por separado del resto, debido a que fue entregada por separado y posterior a los otros instrumentos de medición



Figura 22: Termocuplas 1 y 2 sumergidas en agua destilada junto a la termocupla ambiental (T7)

Otro montaje experimental realizado para trabajar con las termocuplas de contacto fue el de probar la mejor manera de adherirlas a la superficie de la cual se querían registrar datos. Para esto se probaron configuraciones distintas con tres tipos de cintas de doble contacto 3M. La cinta escogida fue “Cinta Doble Faz VHB 4910, Transparente” (Ver Anexo F de para las características de la cinta). Primero se adhirieron tres termocuplas, con tipos distintos de cintas de doble contacto 3M, posicionando la cinta entre una olla con agua en proceso de calentamiento y las termocuplas como se aprecia en la Figura 23.



Figura 23: Prueba adhesión termocuplas con cinta doble contacto

Analizando las curvas presentadas en la Figura 24 se determinó que la cinta escogida, fue la que mejor resistencia térmica poseía con respecto a las otras cintas de doble contacto al medir la temperatura más baja en la superficie de la olla. De esta primera prueba se descartó la utilización

de la cinta blanca debido a su mal desempeño en superficies a las temperaturas de trabajo esperadas de los paneles, debido a que se desprendió luego de unos minutos.

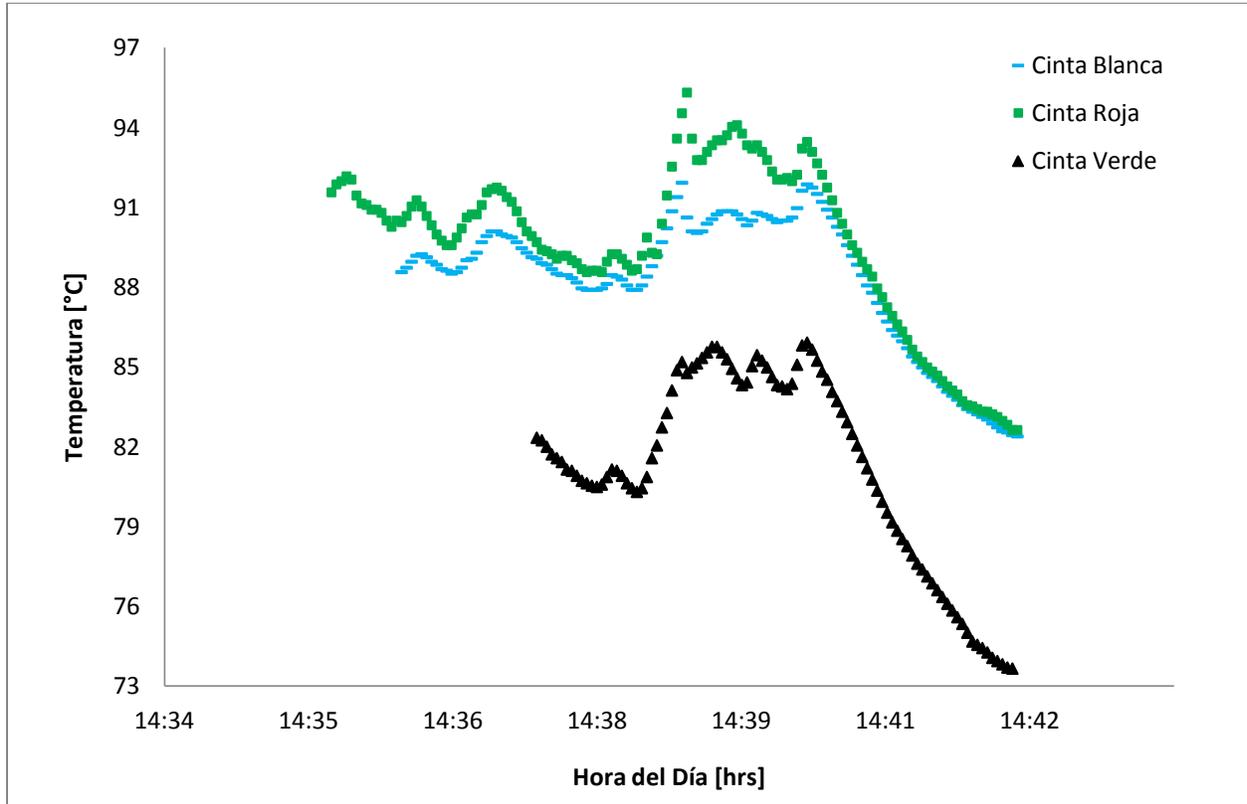


Figura 24: Temperatura de las termocuplas en contacto directo con la superficie el 16 de diciembre 2017.

Como segunda prueba se decidió poner pasta termo conductora entre la termocupla y la superficie de la olla. Esto se hizo para disminuir la resistencia de contacto y facilitar la transferencia de calor entre la superficie y la termocupla para que la temperatura medida represente la más cercana a la de la superficie. En la Figura 25 se muestra la forma de adhesión de las termocuplas .



Figura 25: Adhesión de dos termocuplas con pasta termo conductora.

La Figura 26 presenta los datos registrados. En base a los resultados obtenidos se toma la decisión de utilizar la “Cinta Doble Faz VHB 4910, Transparente” con pasta termo conductora debido a que es la que registra la temperatura más alta, y por ende la configuración que mejor permite la transferencia de calor entre la superficie y la termocupla. Además al ser la que más resistencia opuso al flujo de calor, aislamos la parte de la termocupla expuesta a la intemperie.

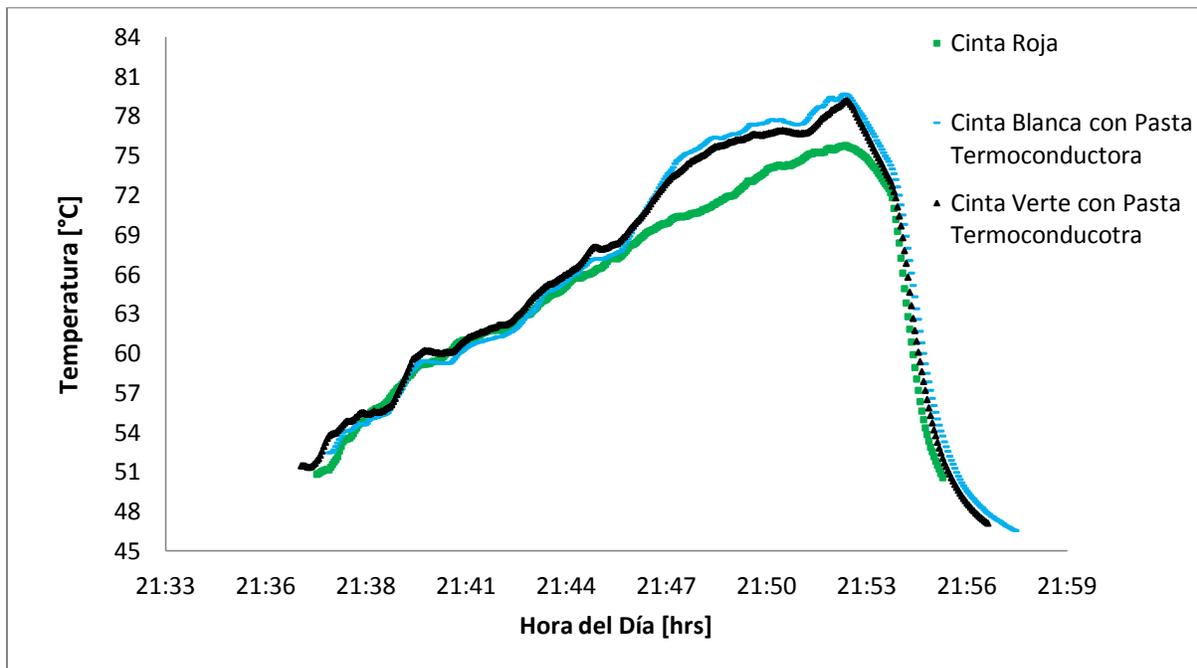


Figura 26: Temperatura en configuración de prueba de Figura 25 el 20 de diciembre de 2017.

3.3.2. Piranómetros

Los instrumentos que se utilizaron para medir radiación solar global fueron dos piranómetros mostrados en la Figura 27. Parte importante del proceso de calibración de instrumentos fue ajustar el factor de conversión del piranómetro modelo CM3. Estos instrumentos entregan una señal proporcional a una diferencia voltaje, el cual se procesa con un factor de conversión propio de cada modelo para así obtener la radiación global. Este factor de conversión corresponde a la sensibilidad.

$$Radiación = \frac{Voltaje}{Sensibilidad} \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (3.9)$$

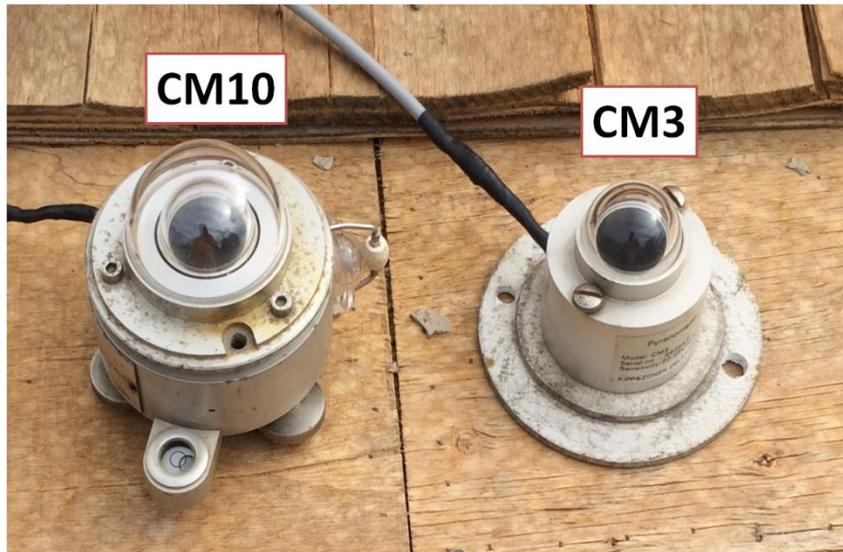


Figura 27: Piranómetros de radiación global utilizados en el estudio

Algunas de las características técnicas más relevantes de los piranómetros utilizados para este estudio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones técnicas de los piranómetros

	CM10	CM3
Sensibilidad [V/Wm⁻²]	4,36 x 10 ⁻⁶	20,45 x 10 ⁻⁶
Marca	Kipp & Zonen	Kipp & Zonen
Error [W/m²]	± 10	± 25

Las razones por las que se utilizó el CM10 como referencia para hacer el ajuste, es debido a que éste ya había sido recalibrado desde su adquisición y además que el CM3 fue sometido a reparaciones producto del corte de un filamento interno. Para hacer el ajuste de sensibilidad se situaron ambos instrumentos en posición horizontal y se registraron los datos de radiación global horizontal durante 3 días. Para estos días se graficaron las radiaciones de ambos como se aprecia en la Figura 28.

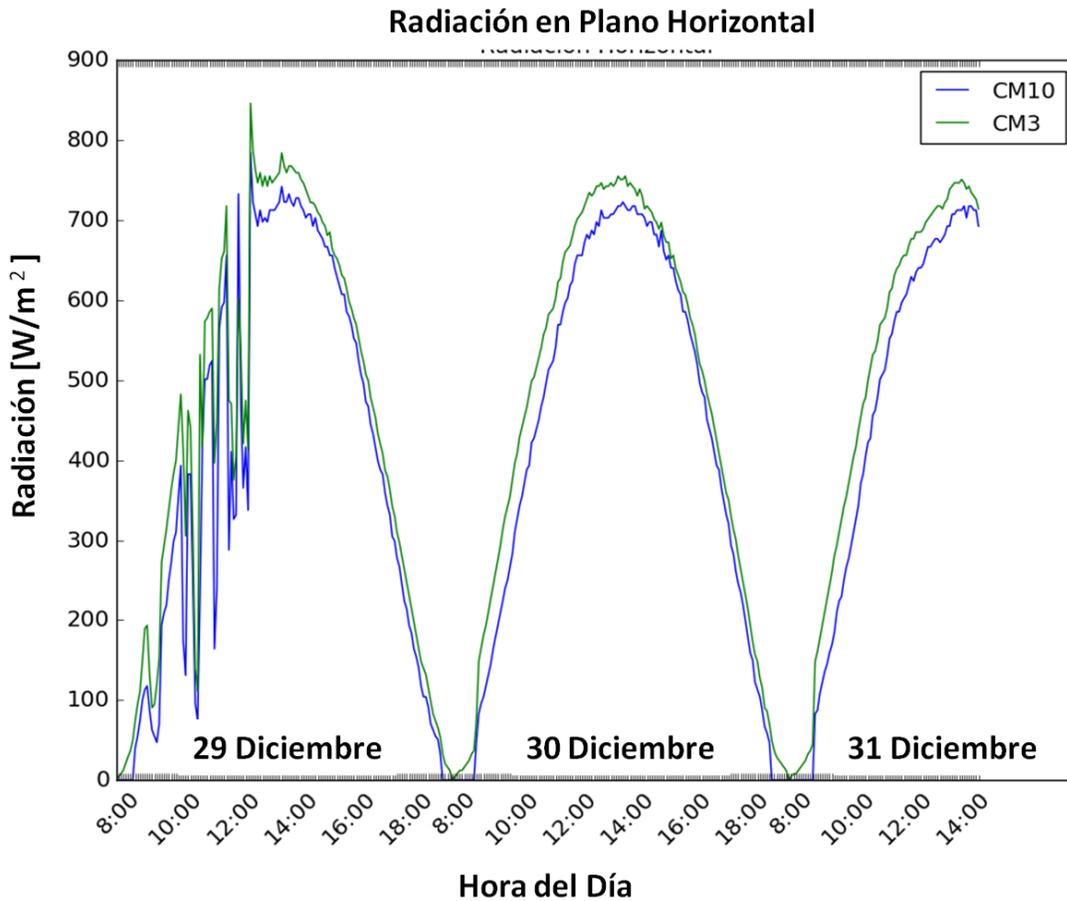


Figura 28: Radiación horizontal piranómetros CM3 y CM10, sin sensibilidad ajustada

El ajuste realizado consistió en fijar como referencia los valores del CM10 e iterar los valores de la sensibilidad del CM3 para encontrar el promedio más bajo de la diferencia absoluta con la radiación referencial. Debido al comportamiento del amplificador de señal utilizado explicado más adelante, se hizo el ajuste con los datos de radiación mayores a 300 [W/m²]. A continuación se muestra los datos de las iteraciones en la Tabla 3.

Tabla 3: Iteraciones factor amplificador piranómetro CM3

Iteraciones Factor CM3	
Factor [-]	Promedio diferencias absolutas [W/m ²]
21,50	25,287
21,55	25,232
21,57	25,22
21,58	25,214
21,59	25,216
21,60	25,222
21,70	25,429

Al hacer el ajuste de sensibilidad del CM3, las mediciones presentadas en la Figura 28 son ajustadas y mostradas en la Figura 29. Las curvas quedan casi superpuestas, que es lo esperado debido, a que ambos piranómetros en posición horizontal deberían entregar niveles de radiación similares.

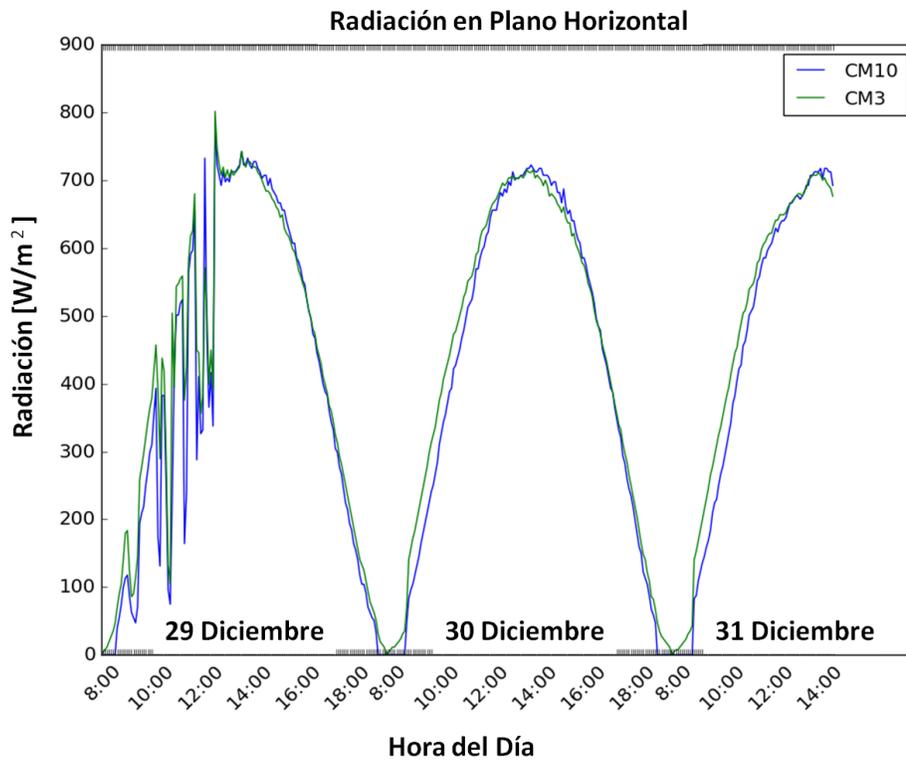


Figura 29: Radiación horizontal con sensibilidad de CM3 ajustada

3.3.3. Inversores

Cada panel posee un inversor, conectado a un sistema de registro en línea de energía y potencia para cada panel, llamado SunnyPortal. El sistema permite registrar la potencia máxima de salida cada 5 minutos del panel con y sin reflector. La Figura 30 presenta la curva de potencia generada por los dos paneles a estudiar a lo largo de un día despejado antes de la instalación del reflector, el cual permite asegurar que ambos inversores tienen el mismo comportamiento. El error del inversor Sunny Boy es de $\pm 3\%$ [22], y considerando el peor de los casos, cuando el panel produce lo máximo registrado se transforma en ± 7 [W].

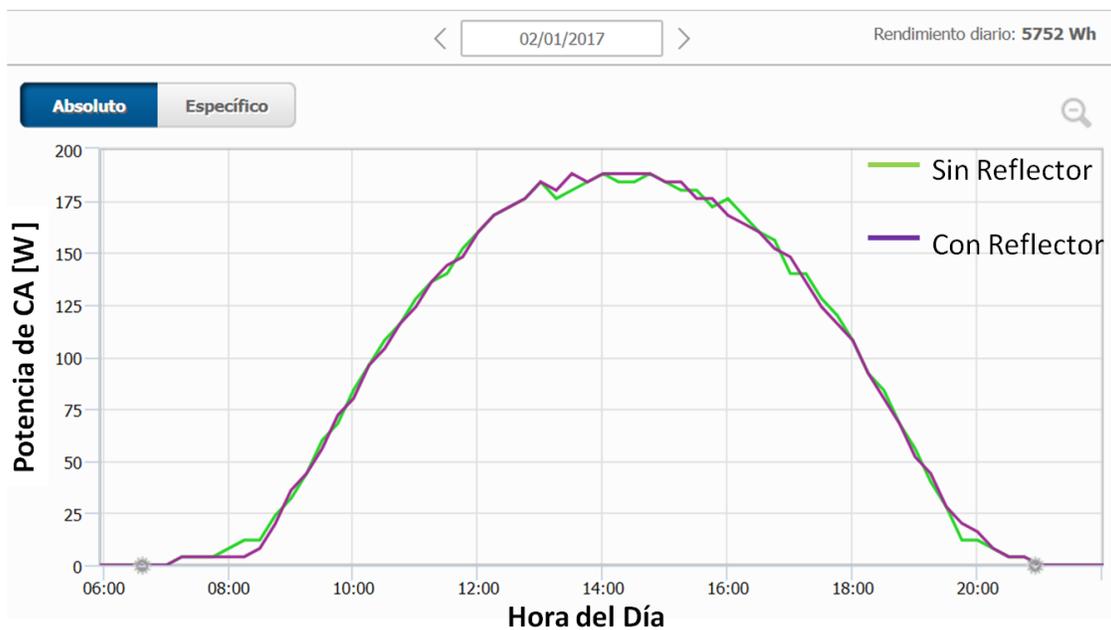


Figura 30: Potencia de paneles estudiados ambos sin reflector, misma inclinación

3.3.4. Amplificador de Señal

Para registrar las mediciones de voltaje de los piranómetros se utilizaron data loggers TinyTag, de rango 0 a 200 [mV] los cuales se pueden ver en Anexo G. Debido a la baja señal entregada por los piranómetros, del orden de 4 y 20 [mV] para el CM10 y CM3 respectivamente con radiación de alrededor de 900 [W/m²], se tuvo que recurrir a construir e implementar el uso de un amplificador de señal, ya que, de lo contrario los errores de medición podrían llegar a ser del orden del 25% y 4% para el CM10 y CM3.

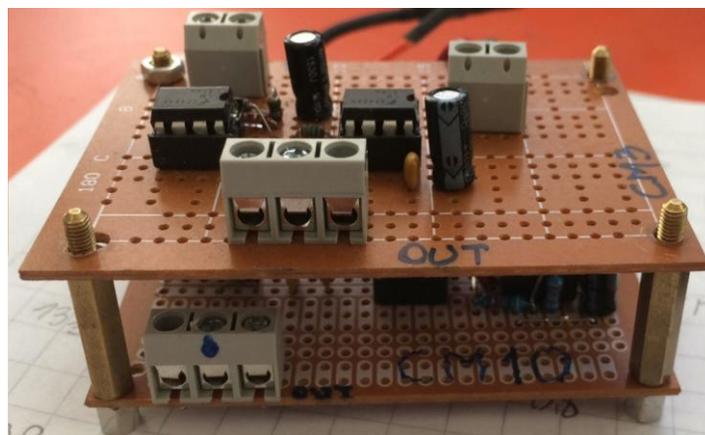


Figura 31: Amplificador de voltaje para piranómetros

El amplificador de señal mostrado en la Figura 31 fue construido en base a requerimientos específicos para ser utilizado con los instrumentos de medición disponibles. La función de este dispositivo es aumentar la señal de salida de cada piranómetro de forma lineal para disminuir el error de medición de los data loggers. El fabricante entregó factores teóricos de amplificación de un 11[-] para el CM3 y de 40 [-] para el CM10.

Para validar las mediciones de voltaje se probó experimentalmente el funcionamiento del amplificador, midiendo el voltaje en la entrada y salida al variar la radiación incidente sobre los piranómetros, modificando la altura de una linterna como se puede ver en la Figura 32. Al ser el voltaje de entrada en el amplificador del orden de los 20 [mV], se utilizó un voltímetro marca BK PRECISION que entrega valores con una precisión de ± 0.01 [mV]. Para medir el voltaje de salida de orden de 200 [mV] se usó otro multítester de marca KEYSIGHT con una precisión de ± 0.1 [mV].

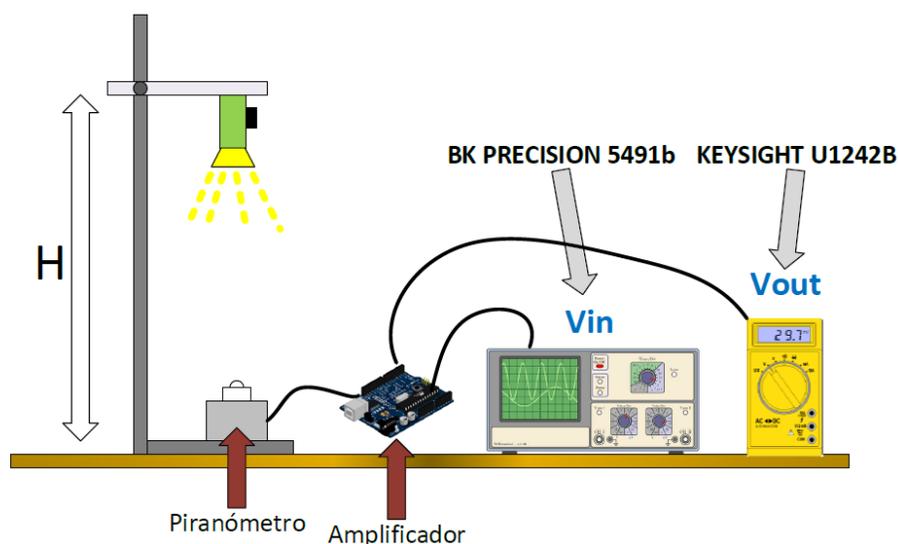


Figura 32: Esquema de montaje experimental para estudio del amplificador

El comportamiento de los factores de amplificación se presenta a continuación y revela que se estabiliza de forma lineal sobre los 40 [mV] en la salida para ambos piranómetros. Este comportamiento es de suma importancia al momento de calibrar los piranómetros, ya que, permitió seleccionar los datos de voltaje en que el factor amplificador se estabiliza como se aprecia en la Figura 33 y Figura 34.

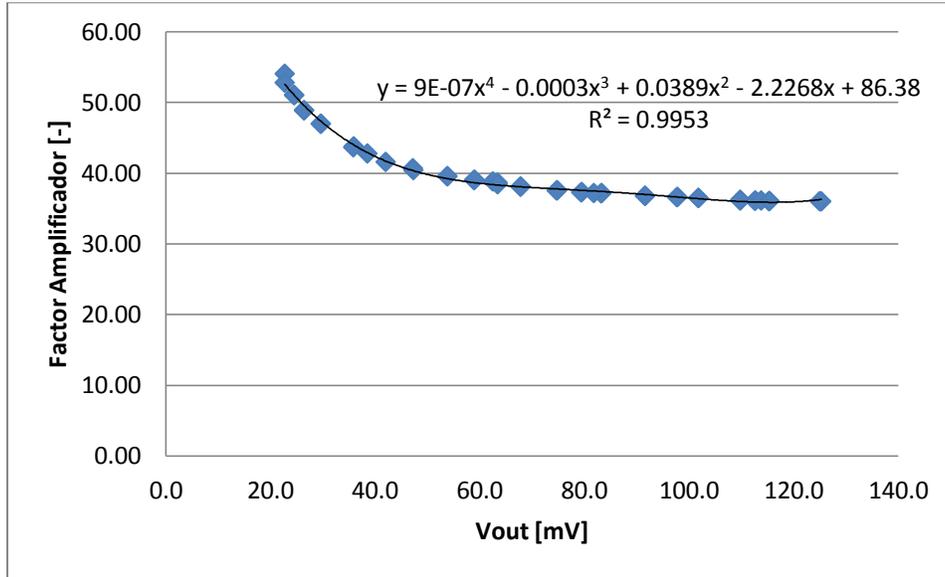


Figura 33: Factor amplificador en función del voltaje de salida para CM10

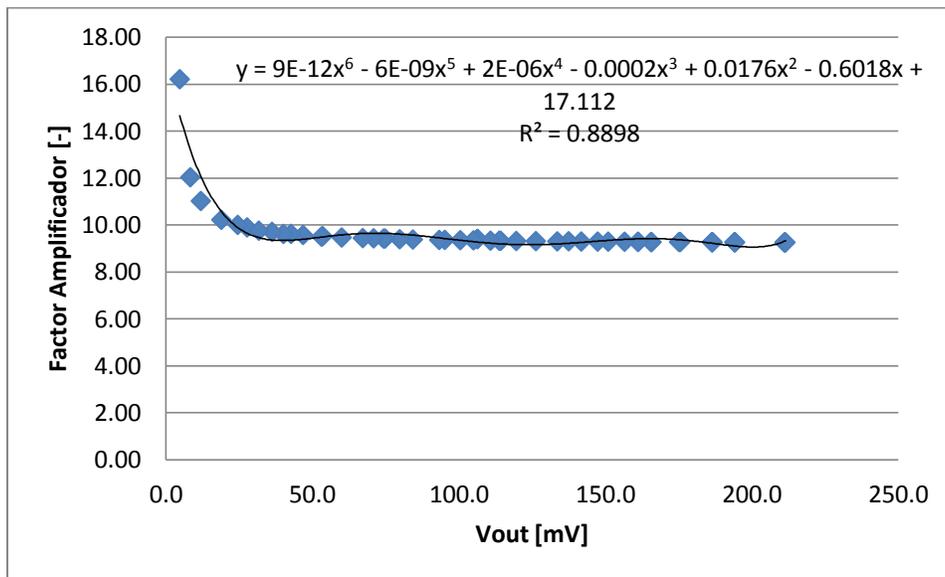


Figura 34: Factor amplificador en función del voltaje de salida para CM3

Los gráficos presentados en la Figura 35 y Figura 36 muestran la relación del voltaje de salida con el de entrada. Con esta relación se obtiene la radiación incidente de cada piranómetro con la ecuación 3.9. Las funciones mostradas en las Figuras 34 y 35 son de suma importancia, debido a que los datos registrados están amplificados, y para obtener la radiación se necesita el voltaje de salida bruto de los piranómetros.

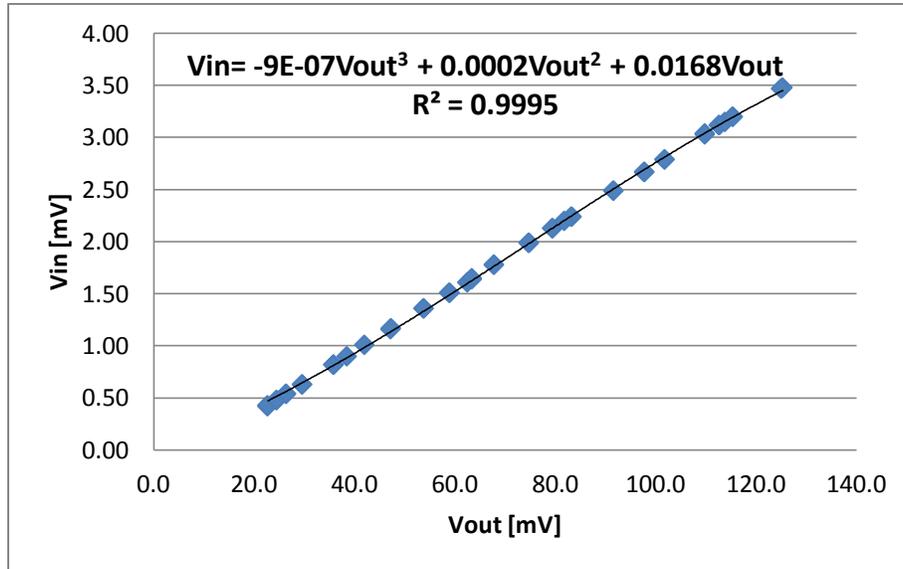


Figura 35: Relación de voltaje para CM10

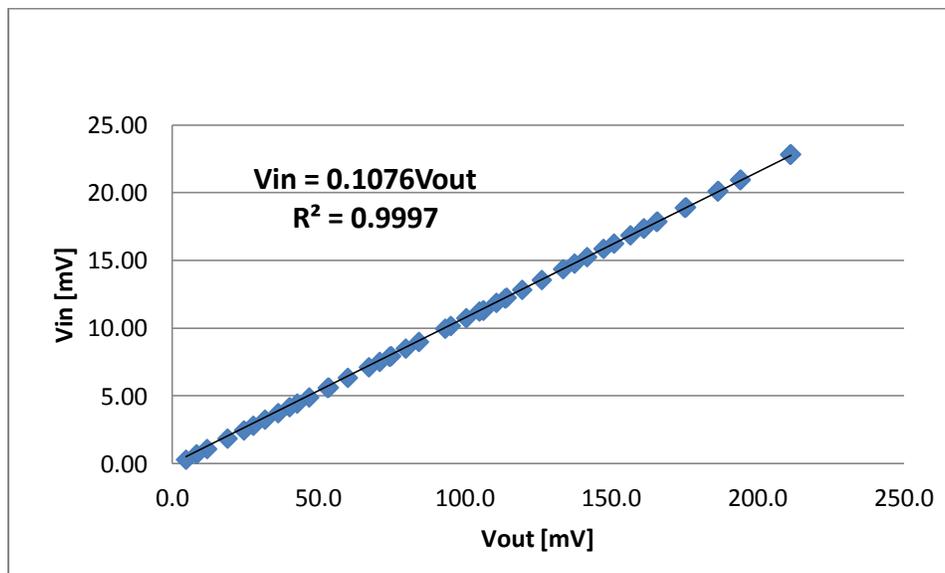


Figura 36: Relación de voltaje para CM3

Se seleccionaron las funciones que mejor relacionan los datos, es decir, con R^2 más cercano a uno en los gráficos que relacionan el voltaje de entrada con el de salida.

En el error de la lectura final de voltaje registrada por el data logger presentados en las ecuaciones 3.10 y 3.11 están inmersos los errores de los voltímetros utilizados para construir la relación de voltaje de entrada con el de salida y el error del data logger.

$$\sigma_{V_{out\ CM3}} = \pm 0,70 [mV] \quad (3.10)$$

$$\sigma_{V_{out\ CM10}} = \pm 0,61 [mV] \quad (3.11)$$

Estos errores son pequeños puesto que los datos registrados durante un día despejado varían aproximadamente entre los 0 y 170 [mV] y que

4. Diseño Experimental

4.1. Montaje disponible

La infraestructura disponible para este estudio en el campus San Joaquín de la Universidad Técnica Federico Santa María consiste en dos plantas solares, una académica con un banco de pruebas integrado para la realización de actividades educativas y la otra de producción con el fin de alimentar el suministro eléctrico del edificio del Departamento de Ingeniería Mecánica donde se encuentra. Los cuatro paneles indicados en la Figura 37 son aquellos que cuentan con inversores individuales, motivo por el cual fueron escogidos para llevar a cabo el estudio. Estos paneles “Stärkee JS250M” tienen una potencia nominal máxima de 250 [W], y están conectados a una plataforma online que registra la potencia generada cada 5 minutos. La ficha técnica se encuentra en el Anexo H.



Figura 37 Plantas solares disponibles en techo edificio mecánica campus San Joaquín

La configuración original fue modificada, ya que los 4 paneles estaban montados en soportes fijos construidos con metalcom con un ángulo de 18° respecto a la horizontal. Los paneles apuntan al norte con una desviación de 10 grados al Oeste.

4.2. Modificación Montaje

El estudio consiste en realizar una comparación de los distintos parámetros de operación de dos paneles iguales, uno en presencia del reflector compuesto por la lámina reflectora “Cool Mirror film” y otro en funcionamiento sin el reflector pero apuntando en la misma dirección y con la misma inclinación. Para eso se diseñó, e implementó un montaje con estructuras móviles que permiten modificar el ángulo con respecto a la horizontal, tanto de los paneles como del reflector. Todo lo que implicó modificar la estructura disponible, desde el rediseño, construcción e instalación fue realizado personalmente por el autor de este trabajo, con apoyo económico y técnico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad y la empresa 3M en Chile.



Figura 38: Instalación modificada en techo edificio mecánica, campus San Joaquín

En la Figura 38, se muestra la izquierda, indicado con el n° 1, el panel en presencia del reflector, y a la derecha el panel sin el reflector. El panel indicado con el n° 2 se posicionó lo más lejos posible del reflector para asegurar que no se viera afectado por éste. Los soportes de los paneles y reflector poseen brazos telescópicos como se aprecia en la Figura 39, utilizados para variar el ángulo con respecto a la horizontal. Adicionalmente se fabricaron e instalaron soportes para los piranómetros en los paneles a estudiar que mantienen la misma inclinación que los paneles. El reflector tiene 3 veces el ancho del panel para simular el funcionamiento en arreglos con paneles, unos al lado del otro, donde cada panel recibe el reflejo por una parte del reflector que se encuentra al exterior de su ancho, en frente de otro panel adyacente.



Figura 39: Soporte de panel con brazo telescópico y ángulo variable

Las estructuras que soportan los paneles y el reflector, tienen alrededor de 10 posiciones distintas en las que el ángulo con respecto a la horizontal se puede fijar entre los 0 y 45 [°]. Basado en el cálculo para las distintas configuraciones de prueba se fijaron al ángulo más cercano permisible por la estructura presentada en la Figura 39.

4.3. Disposición Instrumentos de Medición

La Figura 35 muestra un esquema de la ubicación y nombre de los distintos instrumentos de medición utilizados. En cada panel se pusieron 3 termocuplas y un piranómetro. Adicionalmente se registró la temperatura ambiente.

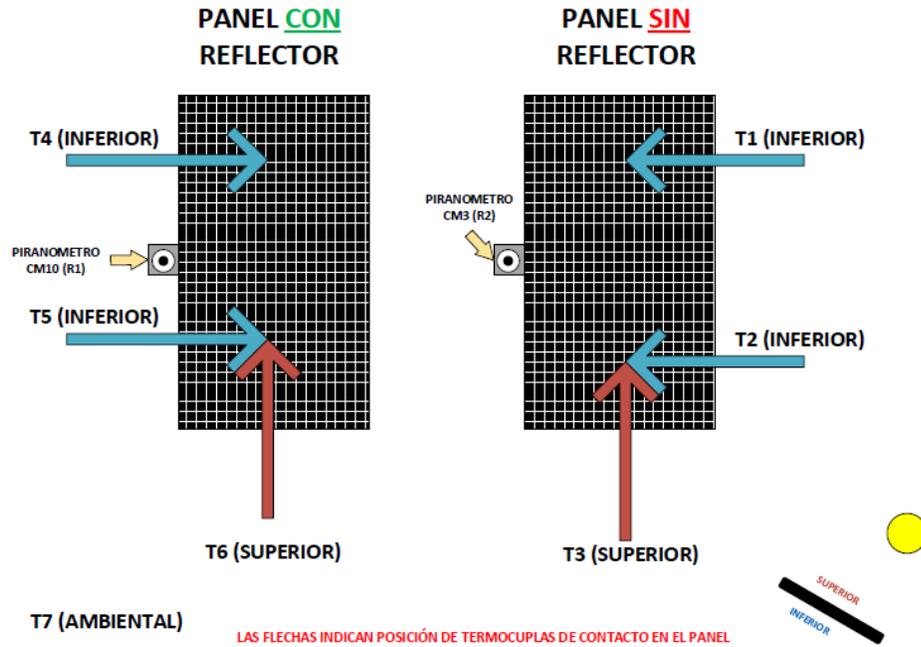


Figura 40: Esquema de posición de instrumentos de medición

4.4. Configuraciones de Prueba

Se probaron tres combinaciones de ángulos distintos para el conjunto panel – reflector. Cada una de las configuraciones responde a situaciones en las que podría ser aplicado este reflector. Los parámetros de posición solar necesarios para determinar las configuraciones son la hora solar “h”, altitud “ α ” y el azimut “Z”, todos en unidades de grados. La altitud es cuánto está elevado el sol con respecto al plano horizontal. El azimut es el ángulo de la posición del sol con respecto al eje norte-sur. La hora solar cero corresponde cuando el sol está en su máxima altitud y alineado con el eje norte-sur, por ende con azimut igual a cero [13] y [23]. De acuerdo a lo mostrado en la Figura 41.

La metodología para obtener el ángulo óptimo del reflector se presenta en las ecuaciones 4.1 a 4.3.

$$\varepsilon = 180 - (\alpha - x) - (90 + \alpha - x) \Rightarrow \varepsilon = 90 - 2\alpha + 2x \quad (4.1)$$

$$\frac{\sin \varepsilon}{1,6} = \frac{\sin(\alpha - x)}{1,6} \Rightarrow 90 - 2\alpha + 2x = (\alpha - x) \quad (4.2)$$

$$x = \frac{3\alpha - 90}{3} \quad (4.3)$$

De la ecuación 4.3 se obtiene la inclinación de reflector óptima con un $x=17$ [°]. Debido a los ángulos permisibles por la estructura, se utilizó para los paneles un ángulo de 45 [°] y para el reflector 14 [°].

4.4.2. Fijo Panel – Óptimo Reflector

Al referirnos a una configuración fija intentamos replicar la mayor parte de las instalaciones PV, las cuales, que no se tienen disponible una estructura con ángulo variable. Cuando se debe poner un ángulo fijo para todo el año en ocasiones se utiliza una inclinación igual a la latitud, debido a que es el valor entre el ángulo óptimo del panel en el solsticio de invierno y el de verano. Las mediciones en esta posición fueron registradas entre el 19 y 27 de abril, y el esquema de la configuración se aprecia en la Figura 43.

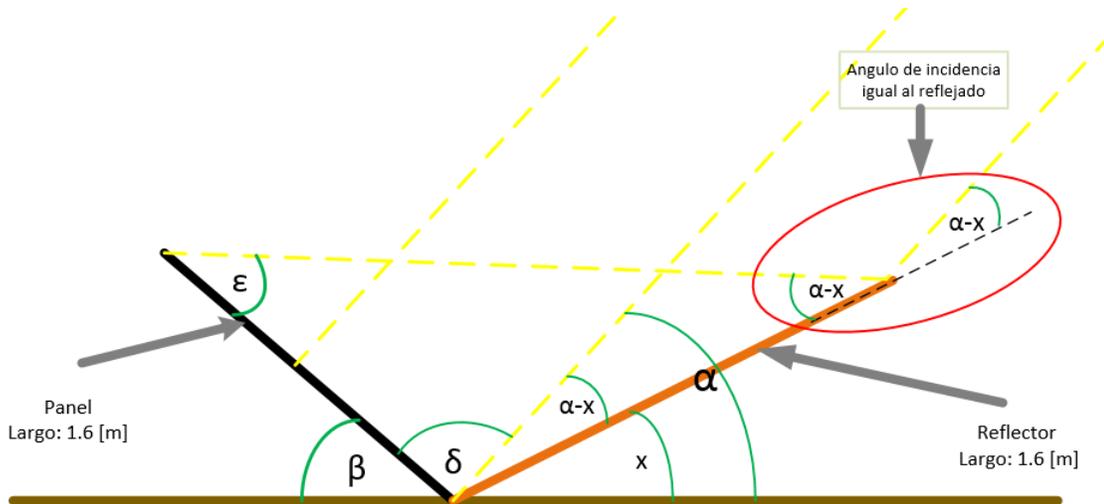


Figura 43: Esquema panel con inclinación β igual a la latitud, recibiendo reflejo completo

$$\delta = 180 - \beta - (\alpha - x) - x \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = 180 - \delta - (\alpha - x) = 180 - 180 + \beta + \alpha - \alpha + x = \beta + x \quad (4.5)$$

$$\frac{\sin \varepsilon}{1,6} = \frac{\sin(\alpha - x)}{1,6} \Rightarrow \beta + x = \alpha - x \Rightarrow x = \frac{\alpha - \beta}{2} \quad (4.6)$$

Utilizando las ecuaciones 4.4 a 4.6 y con el panel inclinado 33° , correspondiente a la latitud de Santiago, cuando el sol este casi en su máxima altitud, 10° hacia el oeste y el reflector inclinado 6° como se obtiene de la ecuación 4.6, todo el panel recibirá el reflejo proporcionado por el reflector. Debido a los ángulos permisibles por el soporte el reflector se inclinó 11° .

4.4.3. Fijo Panel – Reflector sin Sombreamiento

La tercera configuración fue pensada en una planta de mayor magnitud, que posea varias filas de arreglos de paneles fotovoltaicos apuntando en la misma dirección unos al lado de otros, como se aprecia en la Figura 44. Se supuso una distancia “L” entre las bases de los paneles de $3,3$ [m], para que al estar el panel y reflector horizontales, quedara espacio para maniobrar. Se fijó la inclinación del panel “ β ” igual a la latitud, con 33° respecto a la horizontal. El reflector se puso apuntado a la parte superior de la fila de paneles delantera, y no con un ángulo de inclinación mayor para que no se produzca sombra sobre el reflector por la fila de paneles más al norte de él.

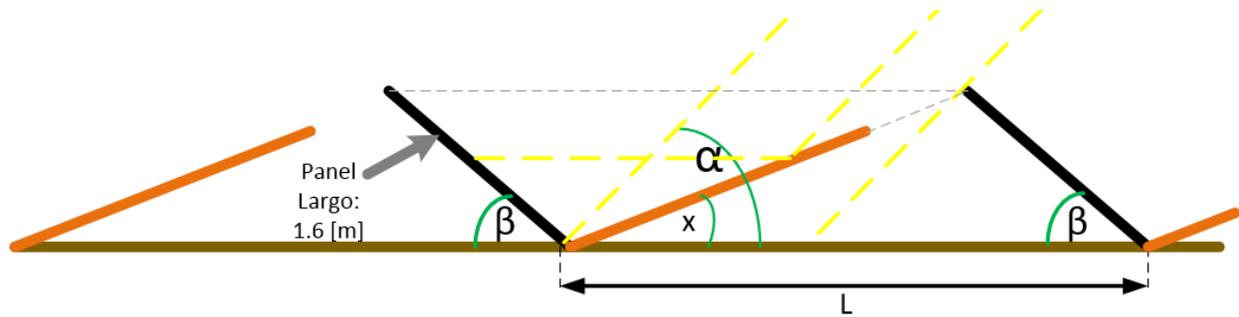


Figura 44: Esquema filas de arreglos de paneles con reflectores entre ellos

$$\frac{\sin(180 - x - \beta)}{L} = \frac{\sin(x)}{1,6} \quad (4.7)$$

La ecuación 4.7 indica cómo se determinó la inclinación del reflector “x” de 24 [°] que garantiza que para los días en que se tomaron las mediciones el sol incidiera en el reflector entre las 10:30 y las 16:30 horas en que la altitud supera los 24 [°]. Esta configuración a diferencia de las otras no garantiza que en algún momento del día todo el panel reciba reflejo producto del reflector, pero si una parte de él.

5. Resultados y Conclusiones

5.1. Efecto Visual

A continuación en la Figura 42 se puede apreciar el reflejo sobre una sección de los paneles, por lo que la radiación recibida por el panel se incrementa (radiación área propia + reflejo desde lámina). Este es el efecto producido por la lámina y las configuraciones explicadas previamente, que tenían como objetivo definir cuanto de ese reflejo incidiría sobre el panel, para una posición definida del sol.



Figura 45: Efecto visual del reflector para un día soleado

Otro aspecto que fue revelado en la operación del reflector, fue el efecto del polvo. No se puede decir con certeza en cuanto tiempo el polvo afecta su rendimiento, puesto que no fue foco de estudio, pero debido a un periodo de inactividad de un mes el efecto es apreciable a simple vista. El efecto de polvo y como este afecta el aporte de las láminas debería estudiarse en futuros estudios. En la Figura 46 se aprecia el contraste al haber limpiado una sección del reflector. También se aprecia como solo hay reflejo producido por la sección limpia. Antes de cada una de las 3 pruebas realizadas se limpiaron los paneles y el reflector.



Figura 46: Reflejo sobre panel con 1/3 de reflector sin polvo

5.2. Óptimo Panel – Óptimo Reflector

Los resultados se presentan con 3 criterios distintos para entregar un aumento de potencia promedio y eficiencia de cada panel, con y sin reflector. Primero se consideró todo el periodo de prueba, el cual se aprecia en la Figura 47. Luego se eligió un día despejado como lo fue el 13 de abril y finalmente se trabajó sólo en el periodo donde hubo un aumento de radiación.

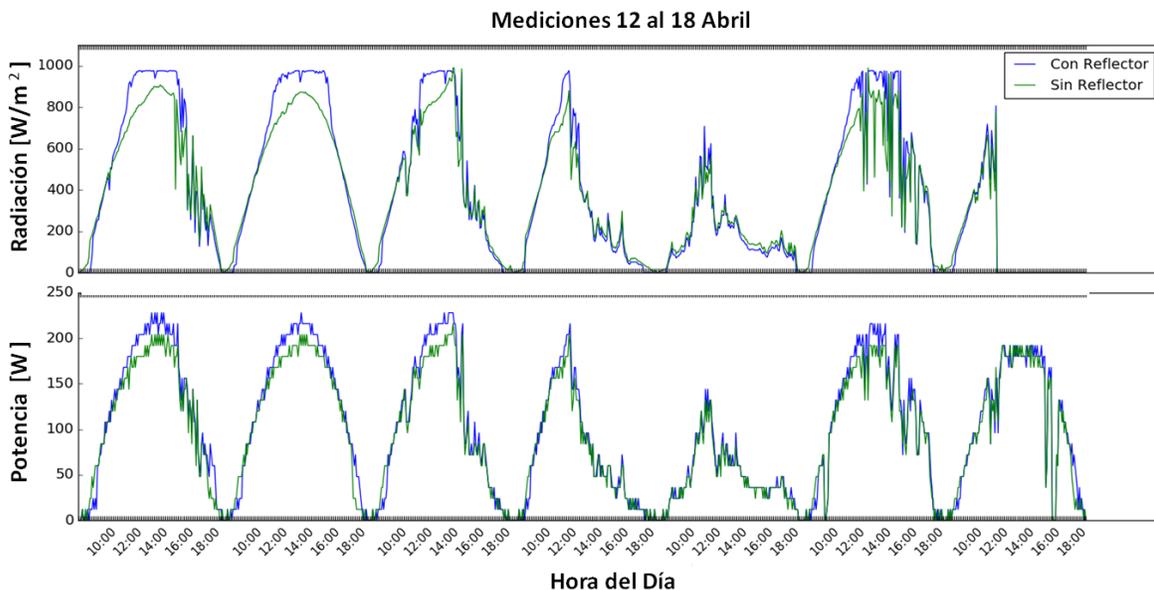


Figura 47: Radiación y potencia periodo completo con panel inclinado 45° y panel 14°

En la Figura 48 se presentan los datos para un día despejado y en el periodo efectivo en que tiene efecto el reflector comprendido entre las líneas verticales cuando se evidencia un aumento de radiación considerable.

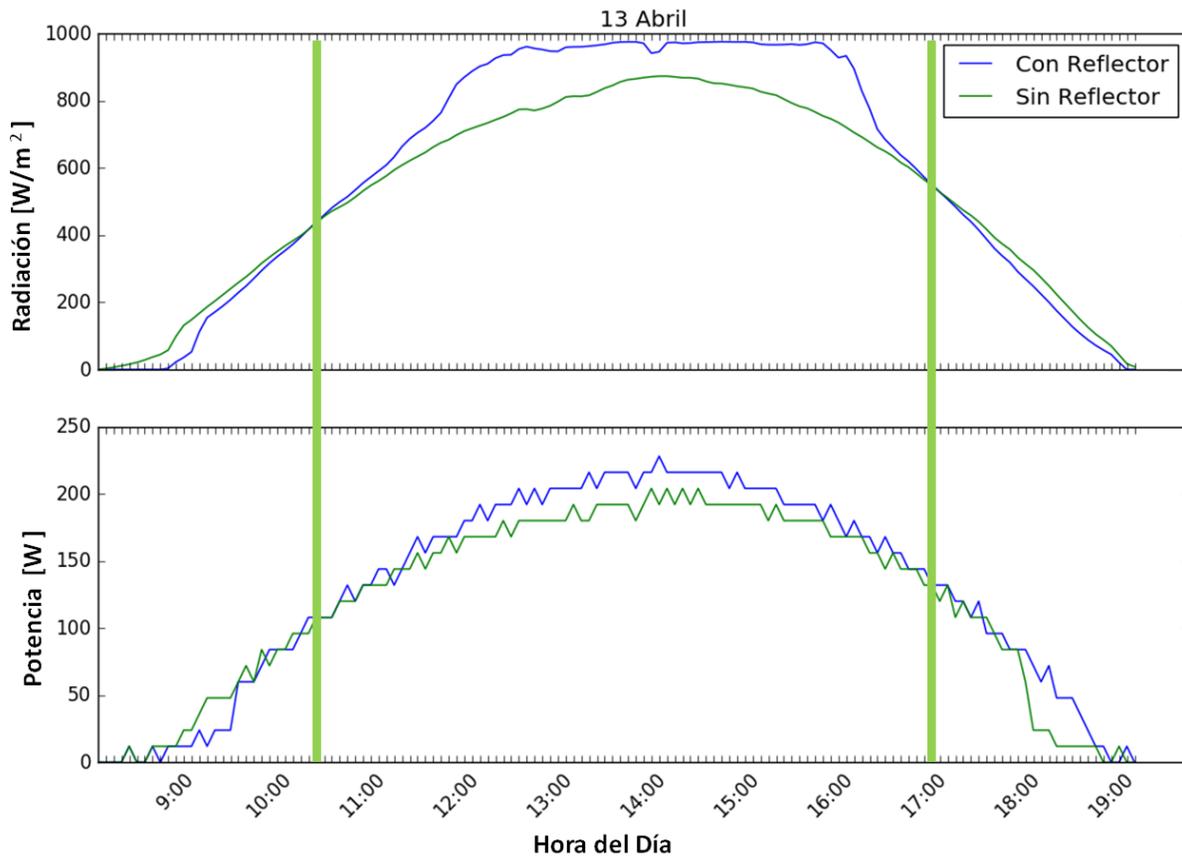


Figura 48: Potencia y radiación en día despejado para ángulo óptimo reflector y panel

Se calculó la radiación incidente y potencia promedio generada para el periodo completo, día despejado y horas efectivas dentro del día despejado. En base a estos cálculos se determinó un aumento de potencia generada del panel con reflector respecto al sin reflector y además se obtuvo la eficiencia para el periodo de mediciones. Para la eficiencia se realizó el siguiente cálculo:

$$\eta = \frac{\text{Radiacion Promedio} \cdot \text{Area Panel}}{\text{Potencia Promedio de Salida}} \quad (5.1)$$

Tabla 4: Resultados promedios para ángulo óptimo panel y reflector

	Óptimo Panel y Reflector					
	Periodo Completo		Día Despejado		Horas Efectivas	
	C/R	S/R	C/ R	S/R	C/R	S/R
Radiación promedio [W/m²]	431,21	401,93	580,27	525,59	911,65	775,78
Error radiación promedio [W/m²]	±10,00	±27,75	±32,60	±35,94	±15,62	±27,04
Potencia Promedio [W]	98,86	92,57	128,33	119,01	193,50	177,75
Error potencia promedio [W]	±3,73	±2,78	±7,48	±6,89	±6,38	±5,70
Aumento Potencia [%]	6,80		7,83		8,86	
Error aumento potencia [%]	±0,33		±0,64		±0,41	
Eficiencia [%]	6,98	6,95	7,23	7,07	7,54	6,98
Error eficiencia [%]	±0,31	±0,52	±0,59	±0,62	±0,28	±0,33

Para la radiación promedio el error se obtuvo considerando el error estándar del periodo y el error de lectura del inversor que es un 3% del valor medido. Para el error del aumento de potencia y eficiencia se utilizó la ecuación 3.5. Los errores estándar se pueden ver en el Anexo K.

Como se mencionó en la sección 4.3 “Disposición Instrumentos de Medición”, se registró la temperatura en 3 posiciones distintas de cada panel. En la Figura 49 se aprecia el comportamiento para un día despejado en comparación con la temperatura ambiente. Las curvas evidencian que en todas las posiciones descritas en la Figura 40 existe un aumento de temperatura. Cada uno de los sub gráficos corresponde a una posición en la cual se midió la temperatura.

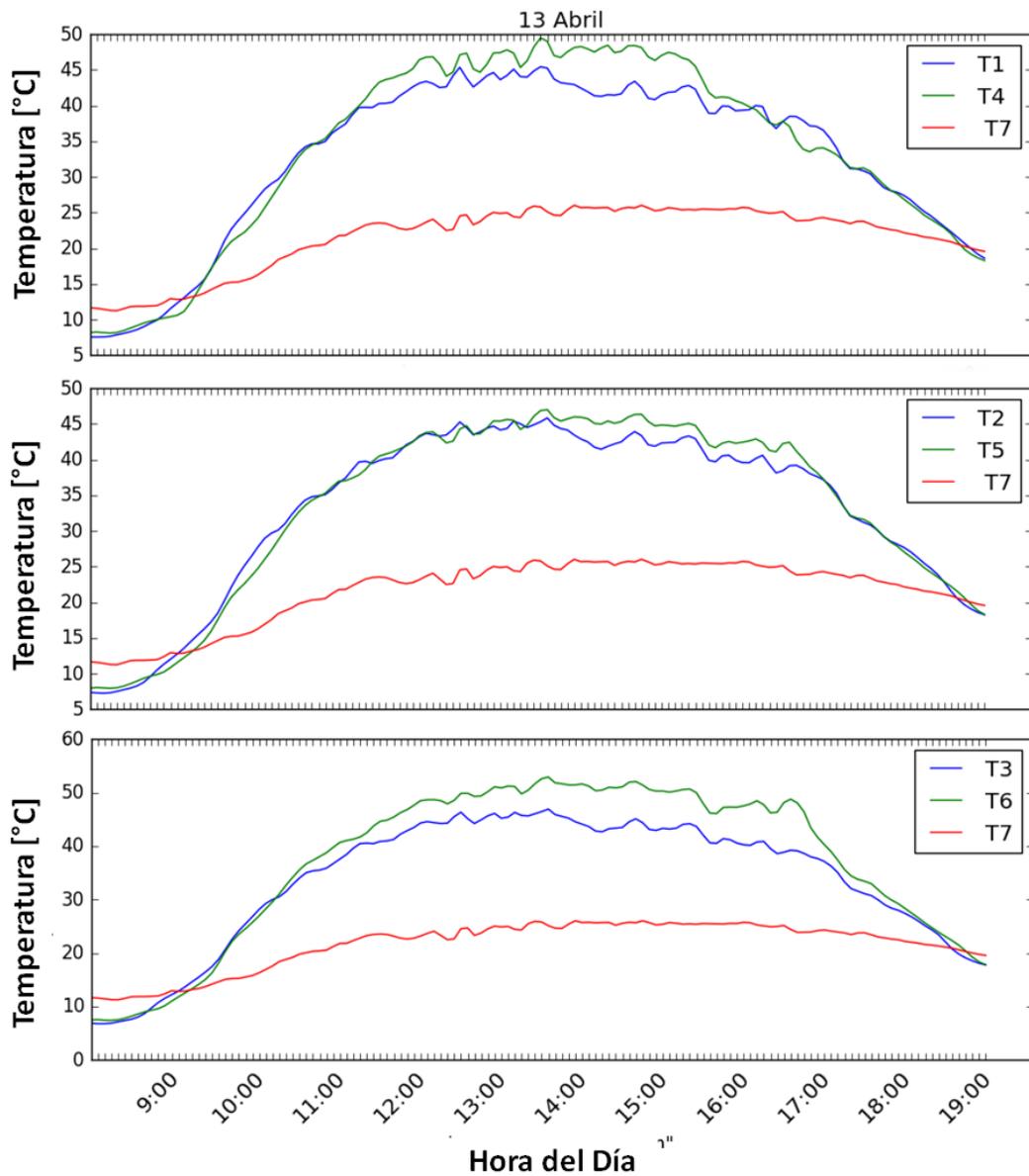


Figura 49: Grafico de comparación de temperatura en misma ubicación para ambos paneles con T ambiental

La Figura 50 representa numéricamente la diferencia de temperatura tomando como referencia el panel sin el reflector. Se indican los promedios de temperatura para cada periodo descrito. Los cálculos y sus errores correspondientes se pueden ver en el Anexo M. La parte inferior corresponde a la superficie trasera del panel que apunta hacia el techo del edificio y la parte superior corresponde a la superficie del panel que apunta hacia el sol.

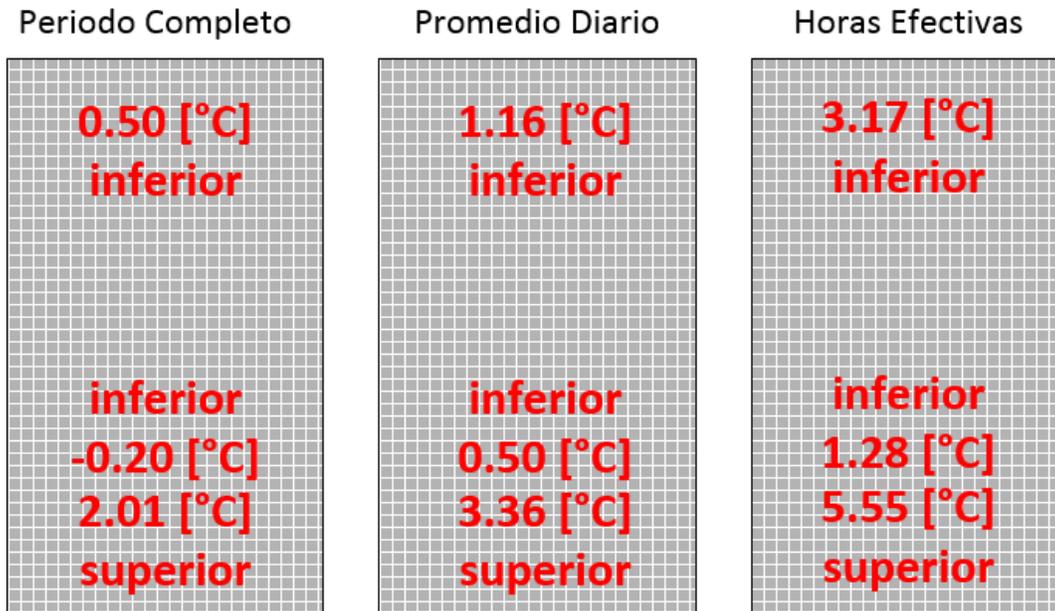


Figura 50: Diagrama diferencia temperatura panel con reflector, con respecto al panel sin reflector con ubicación de termocuplas, para ángulo óptimo panel y reflector

Para esta configuración, en el periodo de horas efectivas todo el panel recibe en una fracción de tiempo un aumento de radiación incidente producto del reflector y su ángulo con respecto a la horizontal, y por ende es cuándo mayor se debería registrar un aumento de temperatura. Los resultados confirman lo estipulado, y como se ve en el esquema anterior se registra un aumento de temperatura de hasta 5,55 [°C], un 75% menos que la máxima diferencia en el caso mencionado anteriormente en la sección 2.2.1 en donde un panel con reflector de aluminio presentó temperaturas de hasta 20 [°C] más alta que el mismo panel sin reflector . En el periodo completo se registra la máxima diferencia en eficiencia, siendo un 0,35 % menos eficiente el panel con el reflector.

5.3. Fijo Panel – Óptimo Reflector

Para las siguientes configuraciones en las que se registraron datos a partir del 29 de Abril, se presentan solo los gráficos de días más despejados del periodo en la Figura 51 . Los gráficos de todo el periodo se pueden ver en el Anexo J.

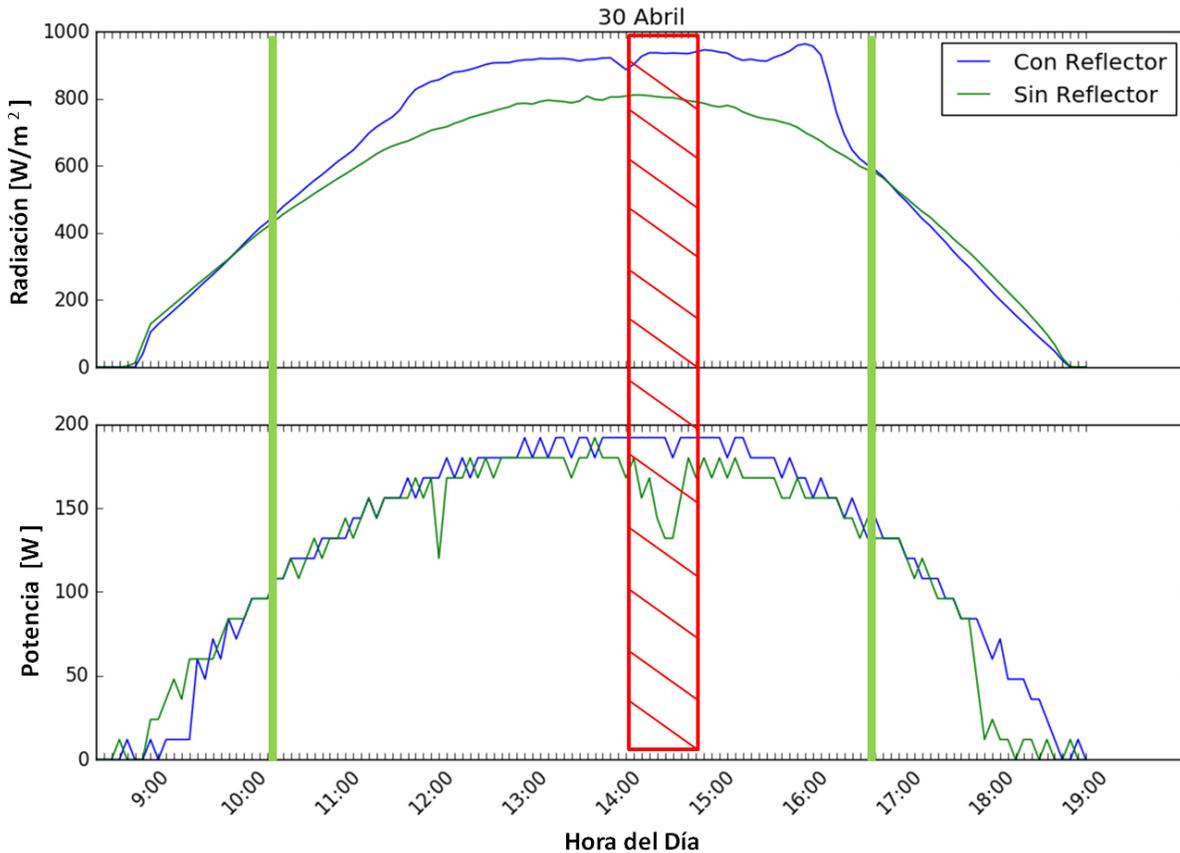


Figura 51: Potencia y radiación en día despejado para ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector

Para el 30 de abril, las horas efectivas se consideran entre las líneas horizontales, excluyendo los datos dentro de la zona achurada. Debido a la época del año, las restricciones espaciales y los otros elementos que se encuentran en el techo junto con los paneles, el panel sin el reflector sufre sombra parcial por aproximadamente 45 minutos. Este efecto se ve de forma clara en la Figura 51, en el gráfico de potencia.

Tabla 5: Resultados promedios para ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector

	panel fijo y óptimo Reflector					
	Periodo Completo		Día Despejado		Horas Efectivas	
	C/R	S/R	C/ R	S/R	C/R	S/R
Radiación promedio [W/m²]	463,48	423,96	591,79	525,12	847,92	717,17
Error radiación promedio [W/m²]	±18,02	±28,05	±31,04	±34,98	±17,61	±27,22
Potencia Promedio [W]	103,23	97,08	123,84	116,16	171,14	163,57
Error potencia promedio [W]	±4,22	±4,02	±6,64	±6,52	±5,70	±5,36
Aumento Potencia [%]	6,33		6,62		4,63	
Error aumento potencia [%]	±0,37		±0,51		±0,22	
Eficiencia [%]	7,18	6,99	7,65	7,23	7,93	7,02
Error eficiencia [%]	±0,41	±0,54	±0,57	±0,62	±0,31	±0,35

El resultado más representativo para esta configuración es el del periodo de horas efectivas, ya que en éste no se consideran los datos en que el panel sin reflector recibe sombra, por otro objeto ubicado en el techo. Es de esperar que esta misma prueba pero sin sombra, ni datos suprimidos entregue un aumento de potencia mayor a un 4,63% porque alrededor de las 14:00 horas es cuando el sol se encuentra en su máxima altitud, y el reflector afecta toda la superficie del panel. El motivo por el cual el aumento de potencia en el día completo y para todo el periodo es debido a la sombra producida sobre el panel sin reflector por objetos en el techo del edificio.

5.4. Fijo Panel – Reflector sin Sombreamiento

Con la finalidad de demostrar la variación entre los resultados brutos y procesados es que se entregan los promedios para el periodo completo y efectivo. Es el periodo de horas efectivas el que mejor representa el efecto del reflector sobre el panel, para esta configuración. Los datos brutos están registrados y ordenados, para futuros estudios que pudieran continuar con lo presentado en este trabajo. El comportamiento de la radiación y potencia para la configuración de panel fijo y reflector sin sombreamiento se presentan en la Figura 52.

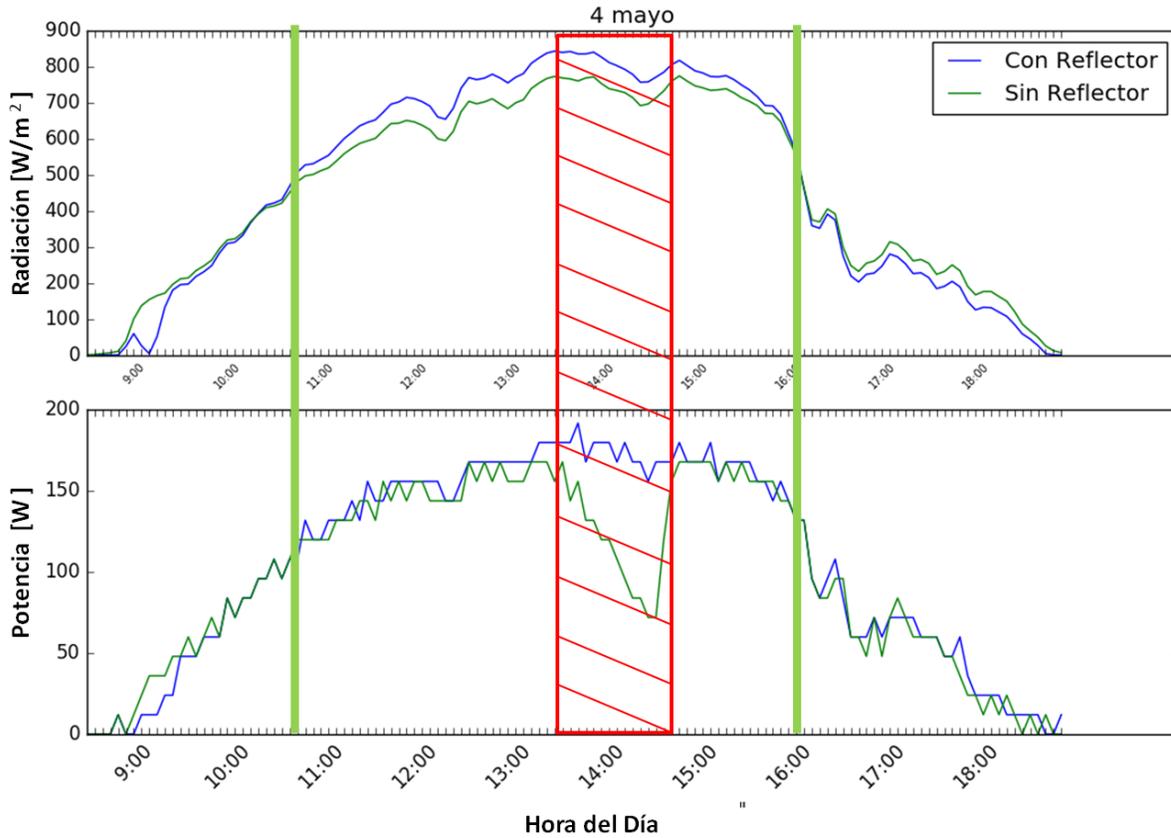


Figura 52: Potencia y radiación en día despejado para ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombra

El 4 de mayo fue el día más despejado durante este periodo. Como se refleja en la Figura 57, el tiempo de la sombra parcial sobre el panel es más prolongado, esto debido a que hasta el solsticio de invierno la altitud del sol disminuye, haciendo más grande la sombra proyectada. Los resultados de este periodo se presentan a continuación.

Tabla 6: Resultados promedio para ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombra

	Periodo Completo		Día Despejado		Horas Efectivas	
	C/R	S/R	C/R	S/R	C/R	S/R
Radiación promedio [W/m²]	331,08	333,07	469,74	455,53	668,90	629,08
Error radiación promedio [W/m²]	± 16,15	± 27,74	± 27,81	± 34,40	± 20,91	± 30,00
Potencia Promedio [W]	78,89	73,39	106	97,62	149,73	145,64
Error potencia promedio [W]	± 3,58	± 3,30	± 6,37	± 5,75	± 5,56	± 5,48
Aumento Potencia [%]	7,49		8,58		2,81	
Error aumento potencia [%]	± 0,48		± 0,72		± 0,15	
Eficiencia [%]	6,72	7,26	7,09	7,47	7,15	6,91
Error eficiencia [%]	± 0,45	± 0,68	± 0,60	± 0,70	± 0,35	± 0,42

El promedio de diferencia de temperatura más alta registrado durante este estudio fue para el día completo del 4 de mayo con un aumento de 7,53 [°C] entre las termocuplas T6 y T3.

Se aprecia un fenómeno que se repite en todos los gráficos de radiación para la salida y puesta de sol. Siempre el piranómetro del panel sin reflector comienza a registrar datos en aumento antes que el piranómetro del panel con reflector, y viceversa para la puesta de sol. Esto se debe a que el edificio ubicado al este de donde se encuentran los paneles produce sombra sobre el panel con reflector en la mañana y los edificios al oeste de donde se encuentran los paneles produce sombra sobre el panel sin reflector en el atardecer.

5.5. Conclusiones

Se estudió el efecto de la instalación de una lámina reflectora y selectora de radiación en las vecindades de un panel fotovoltaico y se comparó con el mismo tipo de panel en ausencia de reflector. Ambos paneles y el reflector ubicados en el techo del edificio del departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María, Campus San Joaquín.

Primero se realizó un levantamiento de información de la utilización de la tecnología de film reflector en paneles fotovoltaicos en donde se encontraron diversas empresas principalmente ubicadas en Estados Unidos, con distintas formas de aplicación del film. Una de ellas, “TenK Solar” tiene proyectos de plantas fotovoltaicas dentro de los cuales se encuentra una con una potencia instalada de 949,69 [kW] que reporta un 20 % más en la producción de energía debido a la instalación de reflectores construidos con “Cool Mirror Film 330”.

Se modificó las instalaciones presentes, se separaron los paneles a estudiar alrededor de 5 metros y se agregó el reflector frente a uno de los paneles. Se decidió medir parámetros de potencia, radiación en el plano de inclinación del panel y temperatura de cada uno de los paneles. Fueron estudiadas tres configuraciones distintas que se diferenciaron en los ángulos de los paneles y el reflector con respecto al plano horizontal con la finalidad de replicar situaciones de operación existentes en el mercado.

Para medir radiación se utilizaron dos piranómetros, para la temperatura una siete sensores de temperatura resistivos, para la potencia de corriente alterna se utilizó una plataforma en línea de monitoreo en intervalos de 5 minutos. Todos los instrumentos de medición fueron sometidos a procesos de calibración para una posterior corrección de los datos medidos.

En base a los resultados presentados se puede asegurar que existe un aumento de radiación incidente sobre el panel producto de la presencia del reflector construido con la lámina reflectora “Cool Mirror Film 330” y el reflejo que este produce debido a la radiación proveniente del sol.

Las distintas configuraciones probadas del panel con el reflector reflejaron lo esperado, ya que efectivamente para lo que se consideró como configuración óptima se obtuvieron los mejores resultados, logrando producir 16 [W] mas de potencia en un panel de potencia nominal de 250 [W].

El aumento máximo registrado fue debido a que una mayor región del panel recibió el reflejo producido por el reflector en comparación a las configuraciones en que se simularon situaciones reales en donde no se disponen de soportes con ángulos variables o para cuando se tienen filas de paneles unas tras de otras en que se podría producir sombra entre paneles.

En la configuración óptima la eficiencia fue de 7.54 %, un 0.5 % más alta en el panel con reflector que en el panel sin reflector.

El comportamiento del parámetro de eficiencia del panel pone en evidencia la característica más relevante del film reflector, que no refleja radiación solar no desaseada al panel puesto que aumenta su temperatura y disminuye su eficiencia. Para proyectar estos resultados y poder aplicarlos en un proyecto de similares características se debe tener en cuenta que depende de la eficiencia del panel cuanto podría ser el aumento de potencia puesto que a mayor eficiencia un mayor porcentaje de la radiación incidente será convertida en energía eléctrica por el panel. En este estudio se registró en promedio por un periodo de 5 horas un aumento de 135 [w/m²] en el panel con el reflector.

Debido a los resultados obtenidos se recomienda continuar con estudios para revelar cómo afecta el reflector en detalle en diferentes aspectos como el efecto del polvo, o como se comporta la curva característica que relaciona la intensidad de corriente con el voltaje de salida del panel. También se podría trabajar en una mejora del diseño del reflector para aumentar el tiempo e intensidad del reflejo que incide sobre el panel.

Finalmente con los datos obtenidos se podría realizar un modelo que prediga el comportamiento del panel en presencia del reflector y luego hacer una validación que contraste con la realidad.

6. Bibliografía

- [1] World Bank, “World Electric power consumption.” [Online]. Available: <http://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2013&start=1971&view=chart>. [Accessed: 15-Feb-2017].
- [2] “Capacidad instalada Total.” [Online]. Available: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>. [Accessed: 14-Feb-2017].
- [3] “BNE 2012 - Variación Consumo Bruto Energía Primaria · Comisión Nacional de Energía,” *Comision Nacional de Energia*. [Online]. Available: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/91926/bne-2012-variacion-consumo-bruto-energia-primaria/>. [Accessed: 16-Feb-2017].
- [4] “BNE 2015 - Balance Energía Global · Comisión Nacional de Energía,” *Comision Nacional de Energia*. [Online]. Available: <http://datos.energiaabierta.cl/dataviews/236845/bne-2015-balance-energia-global/>. [Accessed: 15-Feb-2017].
- [5] “Política Energética de Chile.” [Online]. Available: http://www.energia2050.cl/uploads/libros/libro_energia_2050.pdf. [Accessed: 16-Feb-2017].
- [6] “National Renewable Energy Laboratory (NREL).” [Online]. Available: <http://www.nrel.gov/>. [Accessed: 16-Feb-2017].
- [7] “Photovoltaic System Pricing Trends.pdf.” .
- [8] “U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark Q1 2016.pdf.” .
- [9] D. Heimiller, “Global Horizontal Solar Radiation Annual,” 23-Nov-2005. [Online]. Available: <http://en.openei.org/w/index.php?title=File:NREL-sam-glo.pdf>. [Accessed: 17-Feb-2017].
- [10] D. Heimiller, “Flat Plate Tilted at Latitude Annual,” 23-Nov-2005. [Online]. Available: <http://en.openei.org/w/index.php?title=File:NREL-sam-tilt.pdf>. [Accessed: 17-Feb-2017].
- [11] “Electricidad – Energía Abierta | Comisión Nacional de Energía.” .
- [12] “Proyectos y conexiones - CDEC SIC,” *Sistema Interconectado Central*. [Online]. Available: <http://sic.coordinadorelectrico.cl/es/informes-y-documentos/proyectos-y-conexiones/>. [Accessed: 14-Feb-2017].
- [13] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition. John Wiley & Sons, 2013.
- [14] “SunShot Initiative | Department of Energy.” [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/sunshot/sunshot-initiative>. [Accessed: 15-Feb-2017].
- [15] “Photovoltaics,” *Wikipedia*. 27-Feb-2017.
- [16] 3M, “3M Cool Mirror Film 330.” .
- [17] H. Tabaei and M. Ameri, “IMPROVING THE EFFECTIVENESS OF A PHOTOVOLTAIC WATER PUMPING SYSTEM BY USING BOOSTER REFLECTOR AND COOLING ARRAY SURFACE BY A FILM OF WATER,” *Iran. J. Sci. Technol. Trans. Mech. Eng.*, vol. 39, no. 0, pp. 51–60, Apr. 2015.
- [18] T. J. Hebrink, “Durable Polymeric Films for Increasing the Performance of Concentrators,” 2012.

- [19] Ten-K Solar, “REFLECT PV System – Ten K Solar.” [Online]. Available: <http://tenksolar.com/products/reflect/>. [Accessed: 24-Jan-2017].
- [20] B. O. Noda, *Introduccion al analisis grafico de datos experimentales*. UNAM, 2005.
- [21] P. F. Dunn, *Measurement and Data Analysis for Engineering and Science, Third Edition*. CRC Press, 2014.
- [22] SMA Solar Technology AG, “Measurement Accuracy for Sunny Boy PV Inverter.” .
- [23] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2013.
- [24] “Key World 2016,” 06-Jun-2016. [Online]. Available: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2016.pdf>.
- [25] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*. McGraw-Hill, 2002.
- [26] “Model 5491B, True RMS Bench Digital Multimeters - B&K Precision.” [Online]. Available: <http://www.bkprecision.com/products/multimeters/5491B-50000-count-true-rms-bench-digital-multimeter.html>. [Accessed: 23-Jun-2017].
- [27] “U1242B Handheld Digital Multimeter, 4-digit | Keysight (formerly Agilent’s Electronic Measurement).” [Online]. Available: <http://www.keysight.com/en/pd-1765023-pn-U1242B/handheld-digital-multimeter-4-digit?cc=CL&lc=eng>. [Accessed: 23-Jun-2017].

7. Anexos

Anexo A: Energía incidente anual sobre la tierra:

$$E_{solar} = A_T \cdot G_{SC} \cdot t \quad (7.1)$$

$$E_{solar} = \pi \cdot \left(\frac{1,27 \cdot 10^7}{2} \right)^2 \cdot 1367 \cdot 8760 \cdot 3600 \quad (7.2)$$

$$E_{solar} = 5,46 \cdot 10^{24} [J] = 5460000 [EJ] \quad (7.3)$$

Consumo mundial [24]: 13699 [Mtoe] = 573,55 [EJ] = 0,01% E_{solar}

Anexo B: Módulos Reflect High-Yield PV System:

Tabla 7: Especificaciones técnicas módulos Reflect High-Yield PV System

Especificaciones Mecánicas	Reflect 26	Reflect 28
Aplicación	Techo Plano	Montaje en el Suelo
Ángulo Panel	26°	28°
Ángulo Reflector	45°	33°
Máxima Densidad de Potencia	12,7 [Wp/ft ²]	10,4 [Wp/ft ²]
Material del Reflector	Vidrio Templado – 3M™ Cool Mirror film	
Material del Modulo	Aluminio Estructural	
Resistencia al Viento	Hasta 120 [mph]	

Anexo C : Lámina Reflectora "Cool Mirror 330"

Tabla 8: Ficha técnica lámina reflectora "Cool Mirror Film 330"

Ficha Técnica Lámina Reflectora “Cool Mirror Film 330”	
Descripción	<p>3M™ Cool Mirror Film 330 es una película espejo polimérica con una reflectancia media de 89% o mayor en incidencia normal. Refleja la luz que es útil para módulos fotovoltaicos (PV) y transmite luz infrarroja (IR). Cool Mirror Film 330 se puede utilizar para aumentar significativamente la potencia de los módulos PV aumentando la cantidad de luz útil sobre el módulo mientras se limita la cantidad de la luz IR generadora de calor.</p>
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Baja reflectividad visible en incidencia normal • Alta reflectividad visible a alto ángulo de incidencia • Reflexión ajustada al espectro solar para las celdas de PV silicio en aplicaciones LCPV • Construcción totalmente polimérica que elimina la corrosión • Sin plomo
Propiedades Ópticas	<ul style="list-style-type: none"> • Reflectancia promedio en incidencia normal (700 - 1250 [nm]): 89% el mínimo • Reflectancia fotopica en incidencia normal: 25% máximo
Propiedades Físicas	<ul style="list-style-type: none"> • Grosor: 0,107 [mm] • Ancho máximo: 1,22 [m]

Anexo D : Data Logger de Temperatura y Termocupla:

Tabla 9: Ficha técnica data logger de temperatura



Mechanical Data

Case Style : IP68 Style

Case Dimensions

Height : 34mm / 1.34"
 Width : 59mm / 2.32"
 Depth : 80mm / 3.15"
 Weight : 110g / 3.9 oz.

Features

Memory Size : 32k (Non-volatile)
 No. of Readings : 16000 (approx)
 Resolution : 12 bit
 Trigger Start : Magnetic reed switch
 Delayed Start : Relative / Actual
 up to 45 days
 Stop Options : When Full
 After n Readings
 Never (Wrap around)
 Reading Types : Actual, Min, Max.
 Logging Interval : 1 sec to 10 days
 Offload : While stopped or
 when logging in
 minute multiples
 Alarms : Two, fully
 Programmable
 Functional Range : -40°C → +85°C /
 -40°F → +185°F
 IP Rating : IP68 waterproof
 Battery Life : Up to 5 years

Notes:

Battery replacement is recommended every 2 years. It may be replaced with Saft 3.6V 1/2AA Lithium cells. Stop the unit logging before replacing the battery.

Functional Range describes the range over which the logger will function, **not** the sensor range over which it will record.

Sensor Details

Range : -40°C → +125°C /
 -40°F → +257°F
 Sensor Type : Standard Probe with
 10k NTC Thermistor
 Resolution : 0.03°C at 25°C /
 0.054°F at 77°F

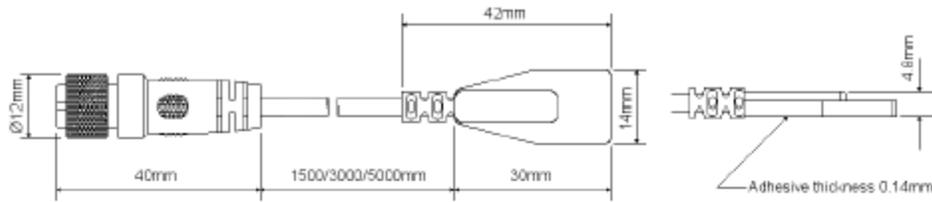
Choice of probe depends on the application. See individual data sheets for detailed probe specifications.

Approvals

This equipment complies with part 15 of the FCC Rules. Operation is subject to the following two conditions: (1) this device may not cause any harmful interference, and (2) this device must accept any interference received, including interference that may cause undesired operation.

This product is manufactured by Gemini Data Loggers (UK) Ltd to BS EN ISO 9001:2000 (Certificate No. 6134), and is CE approved to EN50081 part 1:1992 and EN50082 part 1 and 2:1992/95 with any standard leads or probes supplied.

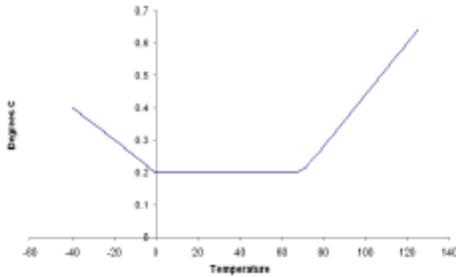
Tabla 10: Ficha técnica termocupla



Sensor Specification

Measuring Range -40 °C to +125 °C (-40 °F to +257 °F)
Sensor Type 10K NTC Thermistor

Sensor Accuracy



Physical Specification

IP Rating IP68 (waterproof)
Weight 40g

Response Time
Water 30 Seconds (to 90% FSD)

Pad
Material Silicone
Adhesive 3M9731
Temperature rating -40 °C to +125 °C (-40 °F to +257 °F)

Cable
Material Silicone rubber
Temperature rating -60 °C to +200 °C (-76 °F to +392 °F)

Connector
Material L-104 (TPU)
Temperature rating -40 °C to 85 °C (-40 °F to 185 °F)

Notes

This probe can be supplied with either a 1.5m, 3m or 5m cable.

For specialist use, for example applications bringing the product into direct contact with food, we can supply material data sheets so you can assess the suitability of this product for your application.

Calibration

A certificate of calibration, traceable to a national standard, can be supplied for an additional charge either at the point of purchase, or if the probe is returned for a service calibration.

Approvals

Gemini Data Loggers (UK) Ltd. operates a Business Management System which conforms to ISO 9001 and ISO 14001.



Related Products

This probe is suitable for use with the following products:

Tinytag Ultra 2 model numbers:

TGU-4020, TGU-4510

Tinytag Plus 2 model numbers:

TGP-4020, TGP-4510, TGP-4520

Tinytag View 2 model numbers:

TV-4020, TV-4510

Tinytag Plus Radio model numbers:

TGRF-4021, TGRF-4022, TGRF-4024

Anexo E: Ajuste Termocuplas:

16/12/2016

Meteorología Usach



Estación Meteorológica de la Usach

Ubicada al interior del Campus Usach

[Ver Mapa y Fotos de la Estación >>](#)

[Ver datos Meteorológicos históricos >>](#)

Vínculos relacionados

[Índice Ultravioleta en Chile >>](#)

[Monitor de carbono negro ambiental >>](#)

Temperatura Ambiental:	27.62 (C)	Humedad relativa:	38.25 (%)
Velocidad del viento:	0.86 (m/s)	Dirección del viento:	159.10 (°)
Presión:	960.60 (mb)	Radiación solar:	0.0 (W/m ²)
Precipitación últimos 15 min.: 0.00 (mm)			

Figura 53: Datos meteorológicos 16 Diciembre para Santiago

Presión atmosférica: $960,60 [mb] = 96,06 [kPa]$

20/12/2016

Meteorología Usach



Estación Meteorológica de la Usach

Ubicada al interior del Campus Usach

[Ver Mapa y Fotos de la Estación >>](#)

[Ver datos Meteorológicos históricos >>](#)

Vínculos relacionados

[Índice Ultravioleta en Chile >>](#)

[Monitor de carbono negro ambiental >>](#)

Temperatura Ambiental:	16.78 (C)	Humedad relativa:	48.25 (%)
Velocidad del viento:	1.07 (m/s)	Dirección del viento:	157.20 (°)
Presión:	963.00 (mb)	Radiación solar:	0.0 (W/m ²)
Precipitación últimos 15 min.: 0.00 (mm)			

Figura 54: Datos meteorológicos 20 Diciembre para Santiago

Presión atmosférica: $963,00 [mb] = 96,30 [kPa]$

Tabla 11: Datos de agua saturada [25]

Presión [kPa]	Temperatura Saturación [°C]
75	91,76
100	99,61

Se interpola para sacar la T_{sat} correspondiente:

$$Pendiente = \frac{T_2 - T_1}{P_2 - P_1} = \frac{99,61 - 91,76}{100 - 75} = 0,314 \left[\frac{°C}{kPa} \right]$$

Para el 16 de Diciembre

$$T_{sat} = Pendiente \cdot (Presión - 75) + 91,76 = 98,37 [°C] \quad (7.4)$$

Para el 20 de Diciembre

$$T_{sat} = Pendiente \cdot (Presión - 75) + 91,76 = 98,45 [°C] \quad (7.5)$$

Anexo F: Cinta 3M VHB 4910:

Tabla 12: Ficha técnica cinta 3M VHB 4910

Respaldo	Poliéster Transparente
Adhesivo	Caucho pigmentado
Color	Transparente
Medidas de Rollos	6mmx33mt 12mmx33mt

ASTM TEST METHOD		
Adhesión al Acero	54 N/100 mm	D-3330
Fuerza de Tensión al Rompimiento	43 lb/pulg ancho 754 N/100 mm	D-3759
Elongación al rompimiento	138%	D-3759
Espesor del respaldo	1,4 mils (0,03 mm)	D-3652
Espesor total	2,5 mils (0,06 mm)	D-3652
Rango de T° a usar	Frecuentemente usada en baños químicos a 66°C	

Anexo G: Data Logger Voltaje:



Figura 55: Data logger de voltaje TinyTagPlus

No se tiene ficha técnica de este data logger

Anexo H: Ficha Técnica Panel:

Tabla 13: Ficha técnica panel FV Stärkee JS 250M

Datos Generales	
Dimensiones (ancho x alto x fondo) [mm]	1640 x 992 x 40
Peso [kg]	20
Tipo de vidrio y espesor [mm]	3,2/4,0 (vidrio templado / revestimiento de vidrio AR)
Largo de cable [mm]	900
Tipo de conector	MC4 o conector compatible
Características Eléctricas (STC)	
Potencia nominal (P _{máx}) [W]	250
Voltaje de máxima potencia (V _{mp}) [V]	30,70
Corriente de máxima potencia (I _{mp}) [A]	8,15
Voltaje de circuito abierto (V _{oc}) [V]	36,8
Corriente de cortocircuito (I _{sc}) [A]	8,87
Tolerancia de potencia	0-3%
Eficiencia del módulo	15,32%
Rendimiento Eléctrico (NOCT)	
Potencia de salida (P _{máx}) [W]	181
Voltaje de máxima potencia (V _{mp}) [V]	27,0
Corriente de máxima potencia (I _{mp}) [A]	6,70
Voltaje de circuito abierto (V _{oc}) [V]	34,8
Corriente de corto circuito (I _{sc}) [A]	7,23
Temperaturas Características	
NOCT [°C]	45±2
Coefficiente de temperatura de P _{máx}	-0,45%/°C
Coefficiente de temperatura de V _{oc}	-0,32%/°C
Coefficiente de temperatura de I _{sc}	0,06%/°C
Capacidad máxima del fusible [A]	15
Temperatura de operación [°C]	-40 a 85
Temperatura de almacenaje [°C]	-40 a 85

Anexo I : Ficha Técnica Micro Inversor

Tabla 14: Ficha técnica micro inversor SunnyBoy SB240-10

Rango MPPT DC 230V	23,0-32,0 [V]
Corriente máxima de entrada	8,5 [A]
Corriente alterna de salida (min/nom/max)	184/230/270 [V]
Máxima potencia de salida continua	230 [W]
Máximo voltaje de circuito abierto de entrada	45 [V]
Frecuencia Operativa (min/nom/max)	45,5/50/63 [Hz]
Corriente continua de salida máxima	1 [A]
Factor de salida de potencia	1 [-]
Tipo de protección	IP65
Temperatura de trabajo	-40 [°C] / 65 [°C]

Anexo J: Gráficos Periodo Completo Potencia y Radiación:

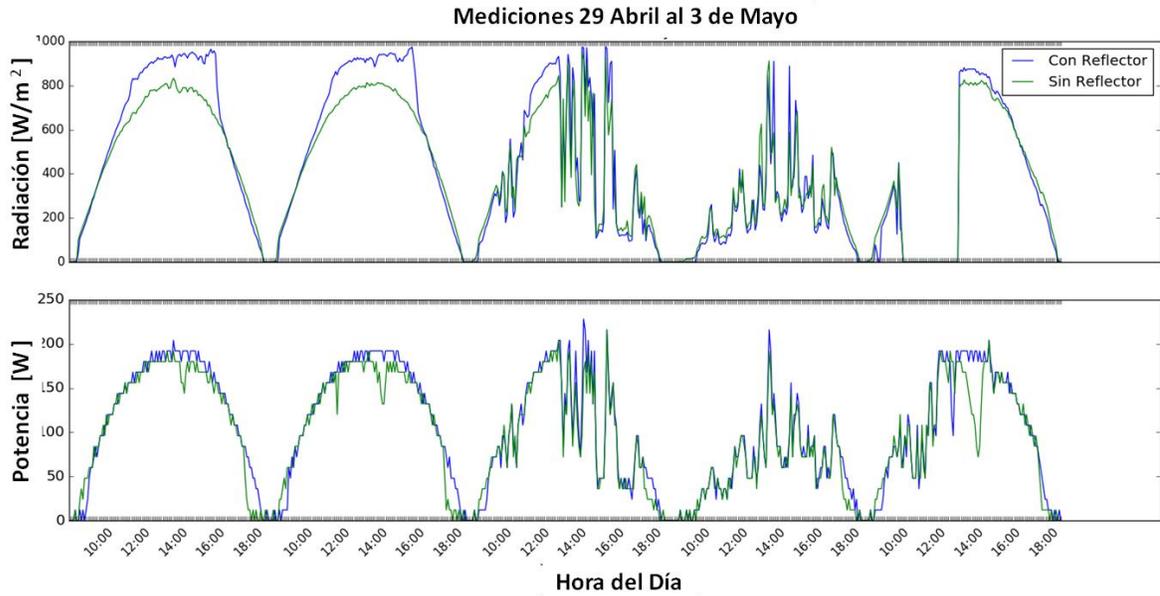


Figura 56: Potencia y radiación en día despejado para ángulo igual latitud panel y óptimo reflector

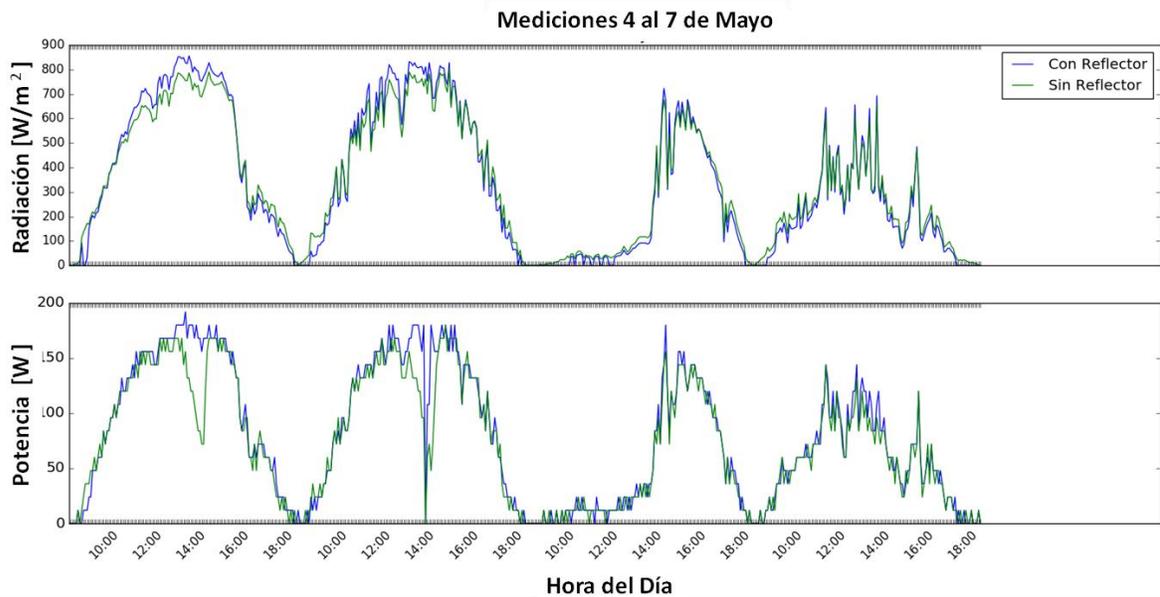


Figura 57: Potencia y radiación en día despejado para ángulo igual latitud panel y reflector sin sombramiento

Anexo K: Detalle Cálculo de errores de resultados Potencia y Radiación:

Tabla 15: Detalle cálculo resultados finales ángulo óptimo panel y reflector

Óptimo Panel y Reflector						
	Periodo Completo		Día Despejado		Horas Efectivas	
	C/R	S/R	C/ R	S/R	C/R	S/R
Radiación promedio [W/m²]	431,21	401,93	580,27	525,59	911,65	775,78
Error estándar radiación promedio [W/m²]	0,16	12,05	31,02	25,82	12,00	9,76
Error radiación promedio [W/m²]	10,00	27,75	32,60	34,98	15,62	26,84
Potencia Promedio [W]	98,86	92,57	128,33	119,01	193,50	177,75
Error estándar potencia promedio [W]	2,27	0,00	6,42	5,89	2,65	2,02
Error potencia promedio [W]	3,73	2,78	7,48	6,89	6,38	5,70
Aumento Potencia [%]	6,80		7,83		8,86	
Eficiencia [%]	6,98	6,95	7,23	7,07	7,54	6,98
error aumento potencia [%]	0,33		0,64		0,41	
error eficiencia [%]	0,31	0,52	0,59	0,62	0,28	0,33

Tabla 16: Detalle cálculo resultados finales ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector

	panel fijo y óptimo Reflector					
	Periodo Completo		Día Despejado		Horas Efectivas	
	C/R	S/R	C/ R	S/R	C/R	S/R
Radiación promedio [W/m²]	463,48	423,96	591,79	525,12	847,92	717,17
Error estándar radiación promedio [W/m²]	14,99	12,06	29,39	23,19	14,49	10,19
Error radiación promedio [W/m²]	18,02	27,76	31,04	34,10	17,61	27,00
Potencia Promedio [W]	103,23	97,08	123,84	116,16	171,14	163,57
Error estándar potencia promedio [W]	2,87	2,77	5,51	5,51	2,49	2,15
Error potencia promedio [W]	4,22	4,02	6,64	6,52	5,70	5,36
Aumento Potencia [%]	6,33		6,62		4,63	
Eficiencia [%]	7,18	6,99	7,65	7,23	7,93	7,02
error aumento potencia [%]	0,37		0,51		0,22	
error eficiencia [%]	0,41	0,54	0,57	0,62	0,31	0,35

Tabla 17: Detalle cálculo resultados finales ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombreado

	fijo panel fijo reflector					
	Periodo Completo		Día Despejado		Horas Efectivas	
	C/R	S/R	C/ R	S/R	C/R	S/R
Radiación promedio [W/m²]	331,08	333,07	469,74	455,53	668,90	629,08
Error estándar radiación promedio [W/m²]	12,69	11,40	25,95	22,39	18,36	15,71
Error radiación promedio [W/m²]	16,15	27,47	27,81	33,56	20,91	29,53
Potencia Promedio [W]	78,89	73,39	106,00	97,62	149,73	145,64
Error estándar potencia promedio [W]	2,69	2,45	5,52	4,95	3,28	3,30
Error potencia promedio [W]	3,58	3,30	6,37	5,75	5,56	5,48
Aumento Potencia [%]	7,49		8,59		2,81	
Eficiencia [%]	6,72	7,26	7,09	7,47	7,15	6,91
Error aumento potencia [%]	0,48		0,72		0,15	
Error eficiencia [%]	0,45	0,68	0,60	0,70	0,35	0,42

Anexo L: Error amplificador:

$$\sigma_{V_{out} \text{ final}} = \sqrt{(\sigma_{V_{in}})^2 + (\sigma_{V_{out}})^2 + (\sigma_{data \text{ logger}})^2} \quad (7.6)$$

Multitester BK PRECISION modelo 5491b [26]

$$\sigma_{V_{in}} = \pm 0,02 [\%] \quad (7.7)$$

Multitester KEYSIGHT modelo U1242B [27]

$$\sigma_{V_{out}} = \pm 0,09 [\%] \pm 5 \text{ (digito mas insignificante)} \quad (7.8)$$

CM10

$$\sigma_{CM10} = \sqrt{\left(\frac{0,02}{100} \cdot 3,2\right)^2 + \left(\frac{0,09}{100} \cdot 115,4 + 0,5\right)^2} + 0,1^2 = \pm 0,60 [mV] \quad (7.9)$$

CM3

$$\sigma_{CM3} = \sqrt{\left(\frac{0,02}{100} \cdot 22,83\right)^2 + \left(\frac{0,09}{100} \cdot 211,5 + 0,5\right)^2} + 0,1^2 = \pm 0,69 [mV] \quad (7.10)$$

Para ambos cálculos se fue pesimista y se considero el valor más alto de voltaje medido para los errores de de los voltímetros al momento de la calibración.

Anexo M: Cálculo de temperatura y sus errores:

Tabla 18: Detalle cálculo temperaturas ángulo óptimo panel y reflector

	Óptimo Panel y Reflector						
	T1	T4	T3	T6	T2	T5	T7
Promedio periodo [°C]	30,66	31,16	31,22	33,23	30.97	30.77	21.36
Promedio diario [°C]	32,70	33,86	33,47	36,83	33.03	33.53	24.66
Promedio horas efectivas [°C]	41,94	45,11	43,32	48,86	42.39	43.66	28.57
Error estándar periodo [°C]	2,51	0,41	0,40	0,42	0.40	0.44	0.49
Error estantal diario [°C]	1,19	1,22	1,25	1,64	1.20	1.41	0.58
Error estándar Efectivo [°C]	0,53	0,47	0,54	0,81	0.53	0.60	0.33
" σ " Error periodo [°C]	2,56	0,65	0,64	0,65	0.64	0.67	0.70
" σ " Error diario [°C]	0,99	1,12	1,05	1,26	1.01	1.07	0.40
" σ " Error efectivo [°C]	0,25	0,39	0,26	0,35	0.25	0.29	0.14
Aumento "T" periodo [%]	1,64		6,43		-0,66		
Error aumento "T" periodo [%]	0,14		0,18		0,02		
Aumento "T" periodo [°C]	0,50		2,01		-0,20		
Error aumento "T" periodo [°C]	2,64		0,91		0,92		
Aumento "T" diario [%]	13,32		20,55		6,27		
Error aumento "T" diario [%]	0,60		0,96		0,28		
Aumento "T" diario [°C]	1,16		3,36		0,50		
Error aumento "T" diario [°C]	1,50		1,64		1,47		
Aumento "T" efectivo [%]	7,56		12,80		3,02		
Error aumento "T" efectivo [%]	0,08		0,12		0,03		
Aumento "T" efectivo [°C]	3,17		5,55		1,28		
Error aumento "T" efectivo [°C]	0,46		0,44		0,38		

Tabla 19: Detalle cálculo temperaturas ángulo panel igual a latitud y óptimo reflector

	Fijo Panel, óptimo reflector						
	T1	T4	T3	T6	T2	T5	T7
Promedio periodo [°C]	32,14	33,04	32,82	35,28	32.29	32.59	22.03
Promedio diario [°C]	38,24	39,33	39,26	42,32	38.51	38.88	25.96
Promedio horas efectivas [°C]	47,44	49,76	49,17	53,18	47.90	48.21	29.65
Error estándar periodo [°C]	0,60	0,65	0,64	0,72	0.61	0.63	0.32
Error estándar diario [°C]	1,24	1,35	1,30	1,49	1.25	1.30	0.65
Error Estándar Efectivo [°C]	0,59	0,70	0,60	0,71	0.57	0.60	0.42
"σ" Error periodo [°C]	0,78	0,82	0,81	0,88	0.79	0.80	0.60
"σ" Error diario [°C]	1,34	1,44	1,40	1,57	1.35	1.39	0.82
"σ" Error efectivo [°C]	0,77	0,86	0,78	0,87	0.76	0.78	0.65
Aumento "T" periodo [%]	2,81		7,50		0,93		
Error aumento "T" periodo [%]	0,10		0,26		0,03		
Aumento "T" periodo [°C]	0,90		2,46		0,30		
Error aumento "T" periodo [°C]	1,13		1,19		1,13		
Aumento "T" diario [%]	2,85		7,81		0,96		
Error aumento "T" diario [%]	0,14		0,38		0,04		
Aumento "T" diario [°C]	1,09		3,07		0,37		
Error aumento "T" diario [°C]	1,96		2,10		1,94		
Aumento "T" efectivo [%]	4,89		8,14		0,66		
Error aumento "T" efectivo [%]	0,12		0,19		0,01		
Aumento "T" efectivo [°C]	2,32		4,00		0,31		
Error aumento "T" efectivo [°C]	1,16		1,17		1,09		

Tabla 20: Detalle cálculo temperaturas ángulo panel igual a latitud y reflector sin sombreado

	Fijo panel - Reflector sin sombra						
	T1	T4	T3	T6	T2	T5	T7
Promedio periodo [°C]	26,23	25,97	26,73	29,24	26.40	26.97	18.44
Promedio diario [°C]	34,07	34,34	35,04	39,85	34.41	36.55	23.85
Promedio horas efectivas [°C]	42,47	43,17	43,88	51,41	42.88	46.57	27.42
Error estándar periodo [°C]	0,55	0,56	0,58	0,73	0.56	0.64	0.28
Error estándar diario [°C]	1,19	1,22	1,25	1,64	1.20	1.41	0.58
Error Estándar Efectivo [°C]	0,65	0,63	0,66	1,09	0.63	0.82	0.43
"σ" Error periodo [°C]	0,75	0,75	0,77	0,89	0.75	0.81	0.57
"σ" Error diario [°C]	1,29	1,32	1,34	1,72	1.30	1.49	0.76
"σ" Error efectivo [°C]	0,82	0,81	0,83	1,20	0.80	0.96	0.66
Aumento "T" periodo [%]	-0,98		9,38		2,13		
Error aumento "T" periodo [%]	-0,04		0,39		0,09		
Aumento "T" periodo [°C]	-0,26		2,51		0,56		
Error aumento "T" periodo [°C]	1,06		1,17		1,10		
Aumento "T" diario [%]	0,79		13,73		6,22		
Error aumento "T" diario [%]	0,04		0,75		0,32		
Aumento "T" diario [°C]	0,27		4,81		2,14		
Error aumento "T" diario [°C]	1,84		2,18		1,98		
Aumento "T" efectivo [%]	1,65		17,16		8,60		
Error aumento "T" efectivo [%]	0,04		0,52		0,24		
Aumento "T" efectivo [°C]	0,70		7,53		3,69		
Error aumento "T" efectivo [°C]	1,15		1,46		1,25		

Anexo N: Error en calibración termocuplas:

Tabla 21: Detalle cálculo errores de calibración

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
"σ" Error termocupla [°C]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
"σ" Error data logger [°C]	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
"σ" Error estándar de calibración [°C]	0,01	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02
"σ" Error variable [°C]	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

Anexo O: Datos de posición solar para Campus San Joaquin

Tabla 22: Datos de posición solar en Campus San Joaquín para 13 abril

Año	Mes	Día	Hora solar H	Altitud	Azimut	Hora TLE	Minuto TLE
2017	4	13	-11.75	46.38546	-16.9684	12	55
2017	4	13	-10.5	46.67449	-15.222	13	0
2017	4	13	-9.25	46.93269	-13.4565	13	5
2017	4	13	-8	47.1595	-11.6738	13	10
2017	4	13	-6.75	47.3544	-9.87587	13	15
2017	4	13	-5.5	47.51696	-8.06485	13	20
2017	4	13	-4.25	47.64679	-6.243	13	25
2017	4	13	-3	47.7436	-4.41267	13	30
2017	4	13	-1.75	47.80715	-2.5763	13	35
2017	4	13	-0.5	47.83728	-0.73639	13	40
2017	4	13	0.75	47.83393	1.104535	13	45
2017	4	13	2	47.79711	2.943938	13	50
2017	4	13	3.25	47.72689	4.779295	13	55
2017	4	13	4.5	47.62346	6.608121	14	0
2017	4	13	5.75	47.48706	8.427993	14	5
2017	4	13	7	47.318	10.23657	14	10
2017	4	13	8.25	47.11667	12.03163	14	15
2017	4	13	9.5	46.88355	13.81104	14	20
2017	4	13	10.75	46.61913	15.57284	14	25
2017	4	13	12	46.32401	17.3152	14	30
2017	4	13	13.25	45.99881	19.03645	14	35
2017	4	13	14.5	45.6442	20.73508	14	40
2017	4	13	15.75	45.26088	22.40976	14	45
2017	4	13	17	44.8496	24.05933	14	50