



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**Termografía aplicada al análisis del defecto de
ensuciamiento de paneles solares fotovoltaicos de la
universidad de Talca e implementación de un plan de
mantenimiento**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: FRANCISCO FUENTES SALCEDO

CRISTÓBAL A. OLAVE MIÑO

CURICÓ - CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular stamps and signatures are present. The left stamp is blue and contains the text "UNIVERSIDAD DE TALCA", "DIRECCIÓN", and "SISTEMA DE BIBLIOTECAS". A signature is written over it. The right stamp is grey and contains the text "SISTEMA DE BIBLIOTECAS", "CAMPUS CURICO", and the university logo. A signature is written over it.

Curicó, 2023

AGRADECIMIENTOS

“El éxito es la suma de pequeños esfuerzos, repetidos día tras día” (Rober Collier) y que hoy es reflejo de esta meta en mi vida que sin duda no existiría sin el apoyo y entrega de mis padres, y por ello, agradezco infinitamente su incondicionalidad en todo sentido hacia mí, por vencer barreras y mantenerse a mi lado a pesar de las adversidades. Agradecer a mi familia, compañeros, amigos y pareja por formar parte de mi vida y formarme como persona en esta gran trayectoria.

Agradezco especialmente a Francisco Fuentes y Leonardo Albornoz por ser ambos grandes guías y mentores, compartiendo lo más valioso que una persona puede entregar; sus conocimientos y tiempo conmigo.

También agradecer a José Rojas quien en su momento fue mi profesor y me brindó su consejo y apoyo para continuar en esta carrera tan hermosa, hoy es el director de escuela y su trabajo ha sido destacable.

A mi compañero y amigo Sebastián Mac-Namara por esas jornadas de estudio y apoyo durante toda la carrera en especial en este último paso, por su ayuda en las muestras y su tiempo para/conmigo.

Y a todos aquellos que sin pensarlo formaron un pequeño “gran esfuerzo” para verme feliz. Espero seguir aprendiendo para poder ayudar y en un futuro compartir ese conocimiento.

Por la suma de todas estas fuerzas GRACIAS TOTALES.

La ciencia es orgullosa por lo mucho que ha aprendido; la sabiduría es humilde porque no sabe más. (William Cowper)

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre Carmen Miño y mi padre Carlos Olave por confiar en su hijo y darle la oportunidad de seguir su sueño.

Dedicado a mi tío, Gabriel Gonzales por apoyarme cada día para verme como profesional.

Dedicado a mi pareja Valentina Fuentes quien me apoyó en los momentos más duros de mi carrera y persona.

Dedicado a mi hermano Fernando Olave, que espero forme su camino y siga sus sueños.

Dedicado a todos mis amigos y cercanos que permanecieron a mi lado, confiaron y apoyaron.

Dedicado a todo el que quiera aportar a la humanidad con la ciencia y tecnología.

En memoria de José Valericio Miño Cabrera

RESUMEN

El estudio consistió en dos series muestrales térmicas y analíticas de producción de la planta FV de la Universidad de Talca en Curicó, a una determinada horas del día con una irradiación mínima de $500 \frac{w}{m^2}$. La comprobación de la radiación fue hecha gracias a la información de redmeteo.cl que toma los datos climáticos desde la estación de Curicó administrada por Francisco Zúñiga. Los resultados de la primera sección mostraron que existe ineficiencias de hasta 24% en algunos paneles solares que presentaban temperaturas mayores que sus pares. Para la comparación de estas temperaturas y rendimientos siempre se tomaron 2 paneles que presentaban la mejor condición descritos como 2-14 y 2-15. Se destaca el uso de las recomendaciones del fabricante testo para el análisis térmico y el instructivo de normativa eléctrica de la SEC ITG N°01/2020. El análisis del sistema completo no mostró daños por temperaturas ni tampoco las muestras superaron los $10^{\circ} C$ sobre la media para establecer un correlación de daño por puntos calientes.

La segunda parte de las muestras contempla 3 forma las cueles son en modo de ensuciado natural, abrasivo con 350 gramos de polvo aproximadamente y limpio total. Cada una de ellas con su termografía y medición correspondiente para las placas solares 2-14 y 2-15. Con ayuda del software FLUKE se muestran resultados de daño por temperatura debido al soiling. Para adecuar los rendimientos se considera el factor de forma y el ajuste por temperatura.

Se establece la relación directa de los rendimiento determinando así una ineficiencia media de las 5 muestras de 61%. También se analizaron los elementos eléctricos comparados con los pares con la norma NETA ATS 2017 obteniendo que se encuentran en optimo estado.

Finalmente establecen recomendaciones del plan de mantenimiento con datos específicos para el uso futuro de la termografía. Además de la continuación del estudio para establecer plazos fijos de mejoras continuas en relación con los rendimientos.

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiii
Capítulo 1 . INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	2
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4 OBJETIVOS.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
1.5 RESULTADOS ESPERADOS.....	5
1.6 METODOLOGÍA.....	5
Capítulo 2 . MARCO TEÓRICO.....	7
2.1 Chile en materia energética.....	8
2.1.1 Cambio climático.....	8
2.1.1.1 Cambio climático en Chile y sus consecuencias.....	9
2.1.1.2 Proyecciones climáticas futuras en Chile.....	11
2.1.2 Matriz energética y eléctrica en Chile.....	13
2.1.2.1 Sector eléctrico: Energías RNC, principalmente solar.....	15
2.2 Energía solar fotovoltaica.....	18

2.2.1	Ángulos solares	22
2.2.2	Ecuaciones de generación eléctrica	23
2.3	paneles solares fotovoltaicos	27
2.3.1.1	clasificación de paneles solares fotovoltaicos	28
2.3.2	Funcionamiento de los módulos solares	30
2.3.3	Banda prohibida o band gap	31
2.3.4	Mecanismos de degradación y fallos en módulos FV	34
2.4	parametros de funcionamiento.....	37
2.4.1	Curva I-V	38
2.4.2	Efectos influyentes en el desempeño de módulos solares FV	39
2.5	mantenimiento industrial	42
2.6	termografía infrarroja aplicada	43
2.6.1	Principios básicos de la radiación térmica.....	47
2.6.1.1	Correlación entre emisión y reflexión.....	49
2.6.2	Manejo de la emisividad en termografías.....	49
2.6.3	Punto de medición y distancia de medición distancia	50
2.6.4	radiación en termografía.....	51
2.6.5	Termografía en vidrios	52
2.6.6	Especulación de reflexión.....	53
2.6.7	Otras recomendaciones.....	54
2.7	normativa vigente para el estudio.....	55
Capítulo 3 . DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA.....		58
3.1	Data-sheet: planta de enrgía fotovoltaica “on-grid” Universidad de talca	59
3.2	caracteristicas geograficas y radiantes.....	60
3.2.1	Ubicación de la planta	60

3.2.2	Recursos solares y meteorológicos.....	61
3.3	aplicación de termografía	62
3.3.1	Nomenclatura de referencia para paneles solares.....	64
3.3.2	Metodología de la aplicación de la termografía	67
3.4	resultados de la primera parte del estudio (MUESTRAS)	74
3.5	resultados de la segunda parte del estudio (muestras).....	78
Capítulo 4 .	ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
4.1	cálculos previos de análisis	85
4.1.1	Cálculo de las eficiencias	85
4.1.2	En relación con la primera sección de muestras.....	86
4.1.3	Comparativa de efectividad en barridos con respecto a eficiencia en las primeras 5 muestras.	92
4.1.4	Segunda parte de muestras en soiling.....	95
4.2	análisis sistema eléctrico	101
4.3	balance de pérdida económica.....	103
4.4	recomendaciones de mantenimiento.....	105
	CONCLUSIONES.....	107
	Bibliografía.....	110
	ANEXOS	112
	ANEXO 1: ficha técnica panel solar tiger mono-facial 450-470 e informe de planta Los NICHES, CURICO, UtaIca.	112
	ANEXO 2: medición del ifov -meas	114
	ANEXO 3: informe técnico primera parte y segunda parte	115
	ANEXO 4: código de ejecución en mathLab. Autor: ING. Héctor Torres Ortega	172
	ANEXO 5: muestra de análisis primera parte en barridos y fallas.....	175

ANEXO 6: datos ajustados de soiling con análisis.176

ANEXO 7: TARIFA DE CONSUMO, DISTRIBUCION Y MANEJO DE ENEFIA
ELECTRICA CGE CURICÓ. fuente: ministerio de economia, fomento y reconstrucción, cec.

178

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Emisiones de gases efecto invernadero por sectores. Fuente: World Resources Institute, Historical country-level and sectoral GHG emisión	9
Figura 2.2: Proyecciones de Temperatura para un escenario en Chile y parte de LATAM. Fuente: CEPAL 2012	12
Figura 2.3: Resumen del impacto climático en Chile. Fuente: COP25 2019	13
Figura 2.4: Capacidad instalada de energía neta por tecnología. Fuente: Energía abierta 2022	16
Figura 2.5: Capacidad instalada neta de generación de energía eléctrica en ERNC. Fuente: energía Abierta 2022	17
Figura 2.6: Ángulos presentes para la correcta ubicación de un panel solar. Fuente: (Garrido, 2020).....	20
Figura 2.7: Radiación espectral de cuerpos a diferentes temperaturas. Fuente: (Garrido, 2020)	21
Figura 2.8: Radiación en paneles solares. Fuente: (Garrido, 2020)	22
Figura 2.9: Funcionamiento de paneles solares domiciliarios. Fuente: (Arancibia, 2016)	27
Figura 2.10: Celda solar monocristalina. Fuente: (Pereda, 2005)	28
Figura 2.11: Celdas solares policristalina. Fuente: (Pereda, 2005)	29
Figura 2.12: Celda solar de silicio amorfo. Fuente: Hogartech.....	30
Figura 2.13: Estructura interna mono facial y bifacial para módulos fotovoltaicos. Fuente: (Garrido, 2020).....	30
Figura 2.14: Átomo de Silicio. Fuente: (Pereda, 2005).....	31
Figura 2.15: Energía vs momentum de un electrón libre para Ge, Si y GaAs. Fuente: Pereda,2005	32
Figura 2.16: Esquema del recorrido de los electrones en un panel solar fotovoltaica. Fuente: (Garrido, 2020).....	33
Figura 2.17: Materiales semiconductores con diferentes bandas prohibidas. Fuente: (Pereda, 2005).....	34
Figura 2.18: Modos de degradación en relación con factores ambientales. Fuente: (Reguera Gil, 2015).....	37

Figura 2.19: Curva I-V Típica de un módulo solar. Fuente: (Castro , 2019)	38
Figura 2.20: Potencia (Pmp) de un módulo solar. Fuente: (Rau Andrade, 2017)	39
Figura 2.21: Potencia en Función de la Irradiancia. Fuente: (Hurtado Valenzuela, 2016)	39
Figura 2.22: Efecto de la temperatura en módulos soleares FV. Fuente: (Rau Andrade, 2017)	40
Figura 2.23: Efecto de nombramiento en el desempeño de un módulo FV. Fuente: (Rau Andrade, 2017)	41
Figura 2.24: Estudio de la influencia del sombreado en paneles solares. Fuente: Solar energy International,2015.....	41
Figura 2.25:Espectro electromagnético. Fuente: (Hurtado Valenzuela, 2016)	44
Figura 2.26: Tipos de detectores infrarrojos. Fuente: (Balageas, 2007).....	45
Figura 2.27: Funcionamiento general de una Cámara Termográfica. Fuente: The Ultimate infrared Handbook for R&D Professionals, FLIR Systems	46
Figura 2.28: Indicatrices de emisión del cuerpo negro, del cuerpo gris y de los dos tipos de materiales (dieléctrico y metálico). Fuente: Balageas,2007	47
Figura 2.29: Radiación incidente, absorbida, reflejada y transmitida. Fuente: Guía de la Termografía Infrarroja.....	48
Figura 2.30: Efectos de un ajuste incorrecto de la emisividad en la medición de la temperatura. Fuente: Pocket Guide Thermography.....	50
Figura 2.31: Campo de visión de un solo píxel. Fuente: (TESTO AG, 2012)	51
Figura 2.32: Radiacion en exteriores. Fuente: (TESTO AG, 2012)	52
Figura 2.33: Termografía errónea a través de un vidrio. Fuente: (TESTO AG, 2012)	53
Figura 2.34: Especulación y difusión de reflexión. Fuente: (TESTO AG, 2012).....	54
Figura 2.35: Cámara descalibrada o mal ajuste de escala terma. Fuente: (TESTO AG, 2012).....	55
Figura 2.36: Interpretación de imagen IR testo. Fuente: (TESTO AG, 2012)	56
Figura 2.37: criterio de diagnóstico térmico eléctrico. Fuente: thermographiccsas.com/ats2017	57
Figura 3.1: Especificaciones técnicas de módulos solares. Fuente: Jinkosolar.com.....	59
Figura 3.2: Ubicación de la planta de energía fotovoltaica, Los niches, Curicó. Fuente: Explorador.mienergia.cl.	61
Figura 3.3: Información Climática de la zona. Fuente: Explorador.mienergia.cl.	61

Figura 3.4: Radiación global horizontal, Los niches, Curicó. Fuente: Explorador.mienergia.cl.	62
Figura 3.5: Ejemplo para pronóstico de radiación solar. Fuente: Tutiempo.net	63
Figura 3.6: Radiación solar minuto a minuto. Fuente: Redmeteo.cl	64
Figura 3.7: Parámetros de muestreo minuto a minuto. Fuente: Redmeteo.cl.....	64
Figura 3.8: Nomenclatura para los paneles solares. Fuente Propia	65
Figura 3.9: Esquematización de la sub-planta 1. Fuente: propia.....	66
Figura 3.10: Barrido térmico para la detección de fallas. Fuente: propia	66
Figura 3.11: Ejemplo de barrido con falla célula. Fuente propia.	67
Figura 3.12: comparativa panel limpio total con panel de 1 semana de ensuciado natural sin presencia de lluvia. Fuente propia.	72
Figura 3.13: Tabla con valores muestra 1. Fuente propia.	75
Figura 3.14: tabla de datos de barridos en la muestra 1. Fuente propia.	76
Figura 3.15 información eléctrica de los paneles sanos en muestra 1. Fuente propia.....	76
Figura 4.1: Grafico de la curva I-V y Potencia para ejemplo de 1 voltio. Fuente propia.....	87
Figura 4.2: Gráficos de voltajes y amperajes para cada caso en soiling. Fuente propia	98

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1: Anomalías en el tiempo de temperaturas en Chile. Fuente: M. Falvey y R. D. Garreaud, “Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast	10
Gráfico 2.2: matriz energética primaria en Chile 2019. Fuente: Ministerio de energía,2020 ...	14
Gráfico 2.3: Uso de recursos energéticos 2010. Fuente: Energía abierta 2022.....	17
Gráfico 2.4: Uso de recursos energéticos 2022. Fuente: energía abierta 2022	18
Gráfico 2.5: Irradiación espectral en W/m ² respecto a las longitudes de onda. Fuente: (Garrido, 2020).....	19
Gráfico 4.1: Comparativa de las muestras 1, 2 y 4 en relación con las curvas I-V. Fuente propia.....	89
Gráfico 4.2: Comparativa de las muestras 1, 2 y 4 en relación con las curvas I-V panel 2-15. Fuente propia	91
Gráfico 4.3: Temperaturas máximas en panel 2-14 para muestras soiling. Fuente propia.....	96
Gráfico 4.4: Temperaturas máximas en panel 2-15 para muestras soiling, Fuente propia.....	97
Gráfico 4.5: Temperaturas medias panel 2-14 para muestras soiling. Fuente propia	97
Gráfico 4.6: Temperaturas medias panel 2-15 para muestras soiling. Fuente propia	98
Gráfico 4.7: Eficiencias por cada caso en todas las muestras panel 2-14. Fuente propia	99
Gráfico 4.8: Eficiencia por cada caso en todas las muestras panel 2-15. Fuente propia.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Impacto de temporales, 1997-2003. Fuente: BID y CEPAL (Banco Interamericano de Desarrollo y Comisión Económica para América Latina y el Caribe)	11
Tabla 2.2: Matriz energética primaria, valores del año 2019 en Tcal. Fuente: Energía abierta (2021)	14
Tabla 2.3: Efectos influyentes en el rendimiento de equipos solares Fotovoltaicos. Fuente: (Hurtado Valenzuela, 2016)	42
Tabla 2.4: Normativa o reglamentos en el que se basa el estudio y su descripción. Fuente propia	55
Tabla 3.1: Comparativa imagen limpia y de irradiación térmica. Fuente propia	68
Tabla 3.2: Comparativa imágenes IR y limpias para conectores e interruptores. Fuente propia	69
Tabla 3.3: Comparativa de los 3 modos de soiling del estudio. Fuente propia.	71
Tabla 3.4: Comparativa de temperaturas en paneles solares, ejemplo de muestra clasificado en panel con ensuciamiento natural, sobre ensuciado, y completamente limpio respectivamente de izquierda a derecha. Fuente propia.	73
Tabla 3.5: Datos generales de las muestras 1-7. Fuente propia.....	74
Tabla 3.6: Ejemplo de datos de muestra 1. Fuente propia.....	75
Tabla 3.7: Barridos pautados con información técnica (ejemplo de muestra 1). Fuente propia.	76
Tabla 3.8: muestra soiling 2 ejemplo. Fuente Propia	78
Tabla 3.9: Tabla de muestra soiling 2 con parámetros eléctricos. Fuente propia.....	79
Tabla 3.10: Especificaciones de datos de elementos eléctricos. Fuente propia	81
Tabla 3.11: Ejemplificado de muestra en elementos eléctricos. Fuente propia.	82
Tabla 4.1: Valores de intensidad para curva I-V muestra 1 panel 2-14. Fuente propia.	88
Tabla 4.2: Valores de intensidad para curva I-V muestra 2 panel 2-14. Fuente propia.	88
Tabla 4.3: Valores de intensidad para curva I-V muestra 4 panel 2-14. Fuente propia.	89
Tabla 4.4: Valores de intensidad para curva I-V muestra 1 panel 2-15. Fuente propia	90
Tabla 4.5:Valores de intensidad para curva I-V muestra 2 panel 2-15. Fuente propia	90
Tabla 4.6: Valores de intensidad para curva I-V muestra 4 panel 2-15. Fuente propia	91

Tabla 4.7: muestra 1 de barridos analizados. Fuente propia	92
Tabla 4.8: muestra 2 de barridos analizados. Fuente propia	93
Tabla 4.9: Información de muestra 1 en soiling a 7 días para cada estado. Fuente propia	95
Tabla 4.10: Diferencia de eficiencias en cada caso para cada panel. Fuente propia	100
Tabla 4.11: Temperaturas en sistemas eléctricos. Fuente Propia	101
Tabla 4.12: Valores de venta de kW/h para los casos estudiados. Fuente propia	103
Tabla 4.13: Valores de ganancias y pérdidas en producción de energía solar. Fuente propia	104
Tabla 4.14: Valores de riesgo en paneles solares. Fuente propia	105
Tabla 4.15: Valores de riesgo en sistemas eléctricos. Fuente propia	105
Tabla 4.16: Tareas recomendadas para mantenimiento de la planta. Fuente propia	106

CAPÍTULO 1 . INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Parte de la ingeniería busca abordar nuevos horizontes y encontrar nuevas tecnologías para el desarrollo de la vida, pero otra parte busca que sigan un curso viable a través de estudios y mejoras, es decir, mantener viva las ideas principales generando actualizaciones conforme al desarrollo de las tecnologías pero que a su vez mantengan los enfoques originales.

En la actualidad, se lucha con diferentes factores que afectan la calidad de vida y han llevado a explorar diferentes recursos. Un ejemplo sería las pandemias que sin importar la procedencia siempre se necesitará combatirlas con lo más avanzado en tecnología y biotecnología para lograr salvar la mayor cantidad de vidas posibles. Otro factor sería el calentamiento global que como centro de investigación Greenpeace dicta que, la temperatura media mundial ha aumentado ya 1,2°C desde la época preindustrial y desde el 2015 en los siguientes 6 años se han registrado los datos de temperaturas más altos en la historia de la humanidad (Greenpeace, 2021). Es así como también lo ha aumentado la huella de carbono y la contaminación dando producto a la situación anterior.

La contextualización general del problema actual es que se busca reemplazar las energías convencionales por opciones que sean más limpias y eficientes. Una de las alternativas viable para la geolocalización actual de la universidad de Talca con sede en Curicó fue la implementación de paneles fotovoltaicos que buscan abastecer de energía una parte de las dependencias del campus. Y es que en Chile desde el año 2005 ha crecido de forma exponencial el uso de este recurso renovable comenzando tan solo con el 1 % de la energía nacional. Hoy en día esta cifra ha aumentado hasta un 10,7% y se espera que al año 2025 llegue hasta un 20% según la comisión nacional de energía (CNE) (Normativa aplicable a energía solar en Chile, 2021).

La eficiencia de este método de generación de energía eléctrica es aceptable bajo ciertos parámetros descritos y en un ambiente con rangos aptos. Además, se debe considerar los diversos puntos que podrían alterar tanto el rendimiento como la vida útil de los paneles.

Se han hecho estudios que reflejan resultados negativos al comparar la eficiencia eléctrica con las temperaturas que puede llegar a alcanzar los paneles solares, así como la influencia del viento, la estructura cristalina de las celdas, el factor de reflexión y la suciedad. Debido a lo anterior los ingenieros mecánicos Juan Cepeda y Adriana Sierra de la universidad Santo Tomas de Bogotá demostraron diversos factores que alteran la generación de energía eléctrica con datos

verídicos (Cepeda & Sierra, 2017). Como solución para el ensuciamiento de los paneles fotovoltaicos se lleva a cabo una limpieza con frecuencias determinadas, pero no se sabe con exactitud la influencia del polvo en el sistema.

Dado lo expuesto, es motivo de estudio el impacto que puede y se está generando por la influencia de ensuciamiento en los paneles solares, sobre todo una correcta metodología de aplicación tanto para el estudio como para determinar el mantenimiento adecuado. Además de determinar si es correcto el uso de termografía infrarroja para un análisis de mantenimiento de la “planta fotovoltaica On-Grid¹ facultada de ingeniería universidad de Talca”.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Los últimos 60 años de la historia en relación con la energía solar están marcados por aumentos muy poco significativos en la eficiencia de los paneles solares, desde la célula solar creada por el fabricante Hoffman Electronics en 1960 hasta la actualidad (cambio energetico, 2021). Algunos de los principales problemas que enfrenta esta tecnología de los paneles fotovoltaicos es que su eficiencia es afectada por múltiples factores como la inclinación del mismo panel, el estado climático, el sistema recolector fotovoltaico y el estado de la limpieza de estos mismos. Si bien se sabe que el soiling² o ensuciamiento por material particulado en los paneles solares afecta su rendimiento y eficiencia, no existen estudios específicos que describan el comportamiento o impacto de este factor a través de una metodología de análisis infrarrojo. Actualmente existen investigaciones de múltiples influencias, sin embargo, estas no tienen un resultado específico que no sean de parametrizaciones acotadas. Tampoco se ha determinado un plan de mantenimiento específico para estos sistemas basándose en estudios que correlacione los métodos de mantenimiento industrial con los sistemas fotovoltaicos.

¹ Sistema On-Grid: Se refiere al sistema que contempla la conexión de paneles solares a sistemas domiciliarios que permiten el uso de energía proveniente de la compañía eléctrica de servicio en caso de necesitarlo.

² Soiling: En paneles solares, corresponde al ensuciamiento que pueda presentarse en placa fotovoltaica.

1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

Dado lo anterior es que la solución propuesta es un estudio del comportamiento de los paneles solares a través de la metodología de muestreo infrarrojo para determinar el factor de ensuciamiento que pueda producirse por contaminación particulada, midiendo la eficiencia y relacionándola a este. Es importante considerar que dentro de los parámetros de alcance el estudio se llevará a cabo con las mediciones correspondientes al mes de julio, agosto y septiembre del año 2022 expresando así que, en la región del Maule, comuna de Curicó se presentan los índices más bajos de radiación solar correspondientes a 1,62; 1,75 y 2.59 $\frac{kW/hora}{m^2}$ (dia) para cada mes mencionado respectivamente en relación al año anterior (2019), información que es obtenida con el explorador solar “miEnergia” del gobierno de Chile (ministerio de energia Chile, 2021).

El estudio además contempla que es posible que los parámetros meteorológicos creen incerteza que serán ajustadas.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el comportamiento de la planta fotovoltaica “On-grid” de la Universidad de Talca en la sede Curicó afectados por soiling, utilizando la metodología de análisis infrarroja, cuantificando la perdida energética y el impacto en los componentes. Además, implementar un plan de mantenimiento referente a los resultados obtenidos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Investigar el estado de utilización de energías renovables en Chile y caracterización de energías.
- Estudiar el comportamiento de los diferentes tipos de paneles solares fotovoltaicos a través de investigación bibliográfica.
- Aplicar técnicas de termografía en la planta solar fotovoltaica de la universidad de Talca “On-grid” e interpretar resultados con el software FLUKE®
- Generar un informe técnico con los datos obtenidos para mantener un historial de estudio

- Cuantificar las pérdidas energéticas producto del soiling en los paneles solares estudiados.
- Implementar plan de mantenimiento (recomendaciones) específico para el ensuciamiento en los paneles fotovoltaicos referente a los resultados obtenidos.

1.5 RESULTADOS ESPERADOS

Se espera obtener como resultados un indicador o porcentajes relevantes que demuestren que el ensuciamiento por material particulado en los paneles solares fotovoltaicos afecta el rendimiento a pesar de las condiciones climáticas, tomando en cuenta también el daño que podría provocar internamente al sistema. El análisis termográfico también revelará la condición de las celdas de cilicio y en conjunto con la metodología de generación de barridos termográficos (toma de muestras por sector localizado) se espera demostrar los puntos críticos e irreversibles en funcionalidad, es decir, la celda dañada no podrá generar una potencia mínima para superar el rendimiento esperado por la normativa vigente. Además, se espera que la técnica de termografía infrarroja sea adecuada para el estudio, dado que es un factor experimental y podría presentar incertezas que definan el estudio como inconcluso.

Finalmente se espera establecer un periodo de limpieza correspondiente a un mantenimiento simple con un criterio de periodicidad adecuada en relación con el estudio. Asimismo, se espera que la presente información contribuya a una modernización para una futura tecnología en un sistema automatizado de limpieza para celdas fotovoltaicas.

1.6 METODOLOGÍA

Para implementar un estudio se debe sustentar la investigación principal bajo parámetros que demuestren y concreten que es viable. Es por ello por lo que en primera instancia se debe establecer una investigación previa que demuestre el crecimiento de la matriz energética en Chile, específicamente en la sección de energía renovables no convencionales que aborda el aprovechamiento de los recursos solares y la transformación de la radiación solar en energía eléctrica. De la misma forma es necesario una investigación de los diferentes recolectores fotovoltaicos para establecer diferencias su funcionalidad y rendimiento de manera que, se demuestre un estado del arte. Por otra parte, se debe establecer las relaciones adecuadas a los

Capítulo 1. Introducción

diferentes tipos de mantenimiento y las técnicas empleadas a modos de fallas, conformación de planes y estrategias para el desarrollo del estudio.

Par entrar a la ingeniería de detalle es necesario la investigación de la planta a estudiar, en este caso la planta de generación eléctrica de paneles fotovoltaicos tipo On-Grid ubicada en la universidad de Talca con sede Curicó la cual posee una superficie de recolección de $52,2 \text{ m}^2$.

Levantada una investigación detallada inicial se procederá a la toma de datos y mediciones infra rojas de los paneles, la cual por el tipo se establece que los cuadros de divisiones fotovoltaicas abarcados por la cámara termográfica son de 6×4 , es decir, una superficie aproximada de 15 m^2 los cuales por su inclinación de 20° es lo máximo por muestra que podría captar la cámara.

Una vez creada una base de datos, se procederá a ingresar los datos al software de “FLUKE” para ser analizados y establecer comparativas entre rendimientos, amperaje y la generación de los Watt/hora en comparación con diferentes estados de un mismo panel. Dicha base de datos será la base para generar informes individuales para mantener un historial y fijar parámetros nominales de trabajo en relación con el uso y ubicación de los módulos fotovoltaicos. Realizado lo anterior se analizan nueva mente los datos, pero esta vez aplicando un factor de soiling en los mismos y estableciendo nuevos parámetros de funcionamiento en relación con las curvas de rendimiento V-I.

Ya con los principales resultados y análisis comparativos se puede cuantificar la pérdida energética, establecer factibilidad y eficiencia referente a los marcos teóricos que se puedan demostrar mediante un modelo matemático simple.

Finalmente, con los resultados obtenidos se pueden establecer un periodo de limpieza de los paneles solares mediante una pauta de mantenibilidad de estos, de tal forma que se maximicen los parámetros de rendimiento y eficiencia sin la necesidad de utilizar o invertir tiempo de forma ineficiente.

CAPÍTULO 2 . MARCO TEÓRICO

2.1 CHILE EN MATERIA ENERGÉTICA

El presente apartado enmarca y contextualiza a Chile bajo la condición en usos y recursos energéticos, partiendo de una base mundial y la situación actual con el cambio climático, que ha desencadenado que los avances tecnológicos en materia energética sean un requerimiento de necesidad a una solución propuesta.

2.1.1 Cambio climático

En 1988, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) crean el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), con la función de evaluar, analizar y compartir al público de manera clara, la información sobre el cambio climático y sus posibles impactos a nivel ambiental, social y económico. (Gonzalez Celis, 2021). Desde entonces se han creado informes mundiales con respecto al tema, el primero en 1990 y el último en el año 2014 identificando la progresividad que ha tomado el cambio climático.

La IPCC ha demostrado con datos realistas como desde 1950 ha comenzado un calentamiento global producto de los gases de invernadero que envuelven a la Tierra. Además, enfatiza como como se ha incrementado en un 40% la concentración de dióxido de carbono por el uso de combustibles fósiles y emisiones derivadas de los cambios de uso de suelos (Gonzalez Celis, 2021).

Los GEI (gases de efecto invernadero) antropógenos emitidos provienen del metano, óxido nítrico, gases fluorados y dióxido de carbono, siendo este último el principal con una participación del 76% (CH₄ 17%, N₂O 6%, F_Gas 2,1%). El aumento en emisiones de CO₂ se ve potenciado por el crecimiento poblacional y el crecimiento económico, siendo este particularmente relevante para el crecimiento de emisiones de CO₂ debidas a la quema de combustibles fósiles. (Gonzalez Celis, 2021)

En un marco mundial, la figura a continuación demuestra la emisión de gases de efecto invernadero por sectores evidenciando como el uso de energías es el principal responsable del efecto invernadero que se vive en la actualidad.

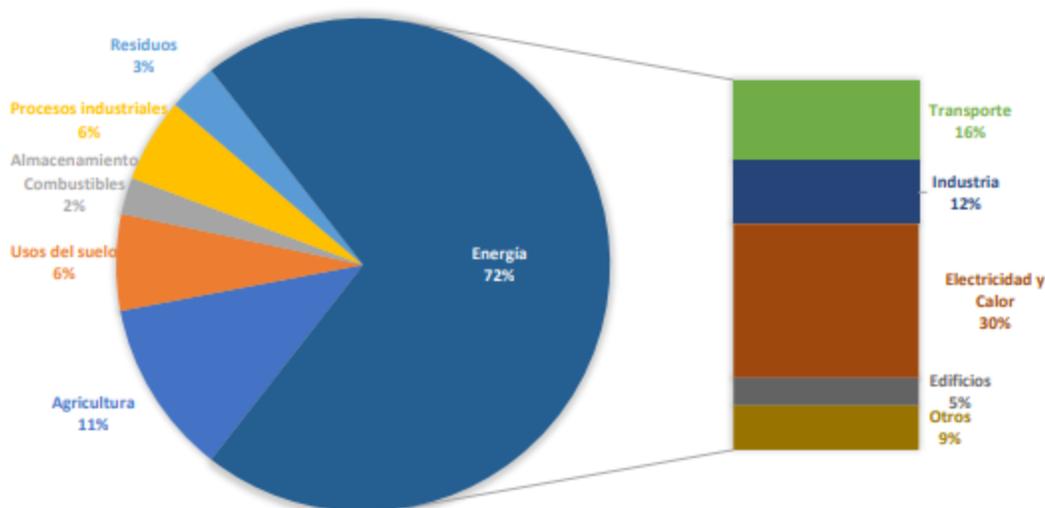


Figura 2.1: Emisiones de gases efecto invernadero por sectores. Fuente: World Resources Institute, Historical country-level and sectoral GHG emission

2.1.1.1 Cambio climático en Chile y sus consecuencias

Chile no ha sido la excepción por afecto del cambio climático y se ha visto directamente relacionado un impacto en la escases hídrica que ah remecido la economía de los agricultores y sector ganadero, lo que a su vez repercute en la economía nacional.

Se espera que estas amenazas sigan aumentando y afecten de forma diferenciada a la población, la infraestructura y los sistemas naturales en función de la intensidad de la amenaza, los distintos niveles de exposición, las capacidades de adaptación y los niveles de vulnerabilidad y resiliencia de los afectados. (Rojas, 2019).

La influencia oceánica en la costas de Chile es un modular de amplitud térmica en el país. Debido a esta las temperaturas para estos sectores es levemente oscilatoria. Por otro lado, las zonas intermedias y alejadas de la costa presentan más cambios referentes a su latitud, sectores de la depresión intermedia pueden presentar oscilaciones de hasta 22° C en relación con el punto más alto y bajo durante un día en temperaturas.

Con respecto a las precipitaciones, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) (2007) observaron en Chile

Capítulo 2. Marco teórico

una disminución significativa en las precipitaciones de la región subtropical. La evolución del régimen pluviométrico en la región centro-sur y austral del país ha sido muy diferente, con una tendencia positiva dominante en esta región hasta mediados de los años setenta (CEPAL, 2012). Aun así, la tendencia es de alza en las temperaturas y bajas precipitaciones para todo el sector centro sur del país. El grafico I presenta las anomalías de temperaturas según un estudio de Falvey en EE. UU.

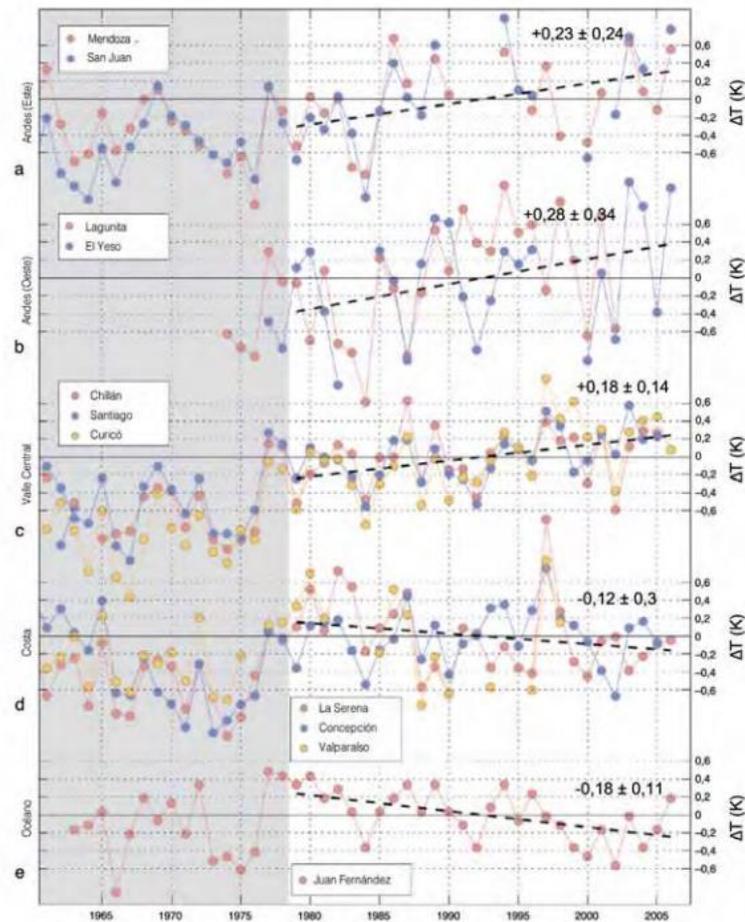


Gráfico 2.1: Anomalías en el tiempo de temperaturas en Chile. Fuente: M. Falvey y R. D. Garreaud, “Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast

Capítulo 2. Marco teórico

Chile, a lo largo de su historia, ha sido afectado recurrentemente por distintos fenómenos naturales. Debido a la posición geográfica, los más comunes han sido sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, sequías e intensas lluvias que han desencadenado inundaciones y procesos aluvionales, entre otras consecuencias. A pesar de la relevancia de estos fenómenos y sus daños sobre la población, no existen registros históricos adecuados, por lo que es difícil obtener información integral de sus efectos (CEPAL, 2012). el banco Interamericano de desarrollo y el Cepal a cuantificado ciertas perdidas a lo largo de los año, un registro desde el 97 hasta el año 2003 presentada en la tabla I.

Tabla 2.1: Impacto de temporales, 1997-2003. Fuente: BID y CEPAL (Banco Interamericano de Desarrollo y Comisión Económica para América Latina y el Caribe)

Año	Población afectada		Viviendas		
	Albergados	Damnificados	Daño menor	Daño mayor	Destruídas
1997	18 323	77 981	-	-	-
1998	6	68	-	-	-
1999	806	252	-	-	-
2000	6 711	101 491	39 563	5 582	1 114
2001	2 444	22 051	9 904	752	312
2002	15 212	163	48 735	8 305	4 134
2003	1 388	6 574	6 849	1 329	50

2.1.1.2 Proyecciones climáticas futuras en Chile

El análisis de impactos del cambio climático en el país se basa en las proyecciones del modelo de clima global HadCM3 de la Oficina Meteorológica de Inglaterra. Las proyecciones climáticas futuras se analizan considerando tres períodos distintos: uno temprano, que va de 2010 a 2040, uno intermedio, de 2040 a 2070 y uno tardío, de 2070 a 2100. En este trabajo se hace referencia de manera recurrente a estos períodos de análisis (CEPAL, 2012). La figura a continuación muestra las proyecciones futuras que proporciona CEPAL, haciendo inca pie en la base histórica de las elevaciones de temperatura.

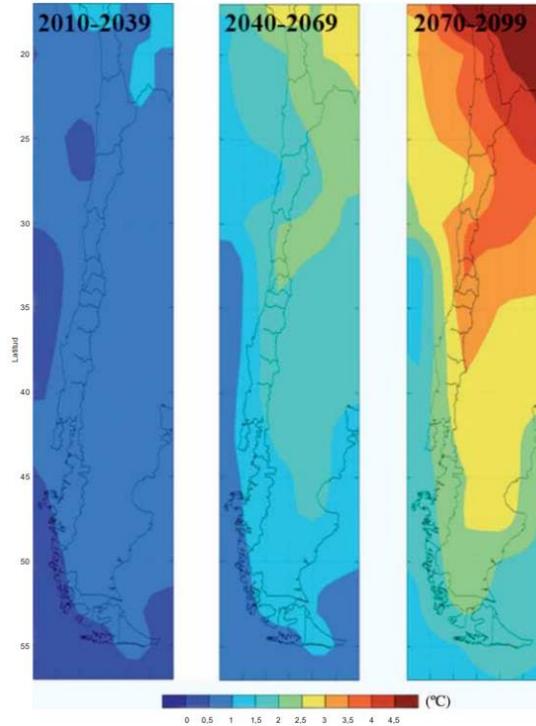


Figura 2.2: Proyecciones de Temperatura para un escenario en Chile y parte de LATAM.

Fuente: CEPAL 2012

En resumen la decadencia climática dentro del país llevaría a no solo empeorar la calidad del medio ambiente, si no también, un factor económico trascendental que por las especulaciones e incrementos de la población garantizan que, Chile perdería parte de sus sectores agrícolas, comenzaría un periodo irreversible a partir del año 2030 si se sigue en la misma trayectoria, el incremento del volumen del mar terminaría con las costas y la sectores focalizados serian prácticamente inevitables (Rojas, 2019)

Al figura a continuación muestra un resumen del cambio esperado para el presente siglo, cuantificando el aumento de temperaturas y el aumento o disminución de las precipitaciones. Representación esquemática de los impactos actuales y futuros en diversos sectores del Chile y su relación con las proyecciones climáticas futuras. Los cambios en precipitación (%) y de temperatura (°C) se basan en las proyecciones futuras siguiendo un escenario alto de emisiones de gases de efecto invernadero, denominado RCP8.5. Las diferencias son respecto a un periodo base: 1985-2005. Actualizado en base a CEPAL (2009): La economía del cambio climático en Chile.

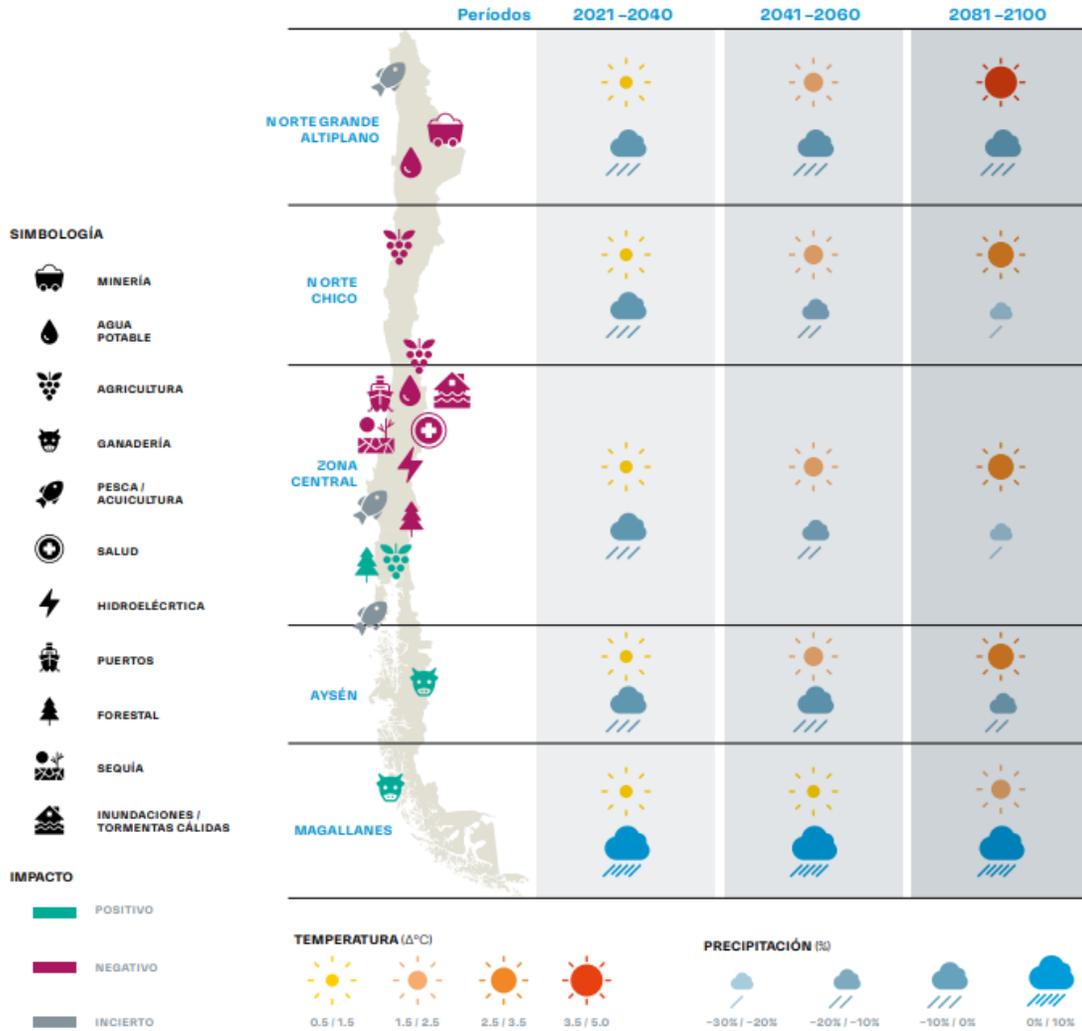


Figura 2.3: Resumen del impacto climático en Chile. Fuente: COP25 2019

2.1.2 Matriz energética y eléctrica en Chile

Según el Ministerio de Energía (2021), se entiende por energía primaria aquella obtenida de fuentes en su estado natural, es decir, que no han sufrido ningún tipo de transformación física o química mediante la intervención humana. Se pueden obtener, por lo tanto, desde la naturaleza, ya sea; en forma directa, como la energía hidráulica, solar, leña y otros combustibles vegetales; o después de un proceso de extracción, como el petróleo, carbón mineral y geoenergía, entre otras. (García, 2021).

Capítulo 2. Marco teórico

Una matriz energética primaria muestra la participación que tiene los diferentes energéticos capturados de los recursos naturales en un consumo total, evidenciando cómo se comporta la demanda por energía en un periodo determinado. En Chile según el ministerio de energía la matriz energética ascendió a 345.645 Tcal.

La energía primaria en Chile esta proporcionada de la siguiente manera: los recursos fósiles concentran la mayor parte, representando el 68% del total, que corresponde a la suma del petróleo crudo (30%), carbón mineral (22%) y gas natural (16%). Como se observa en el gráfico con menor participación destaca la energía primaria proveniente de la biomasa (23%), seguida por aquellas de origen hídrico (5%), solar (2%) y eólico (1%). (García, 2021).

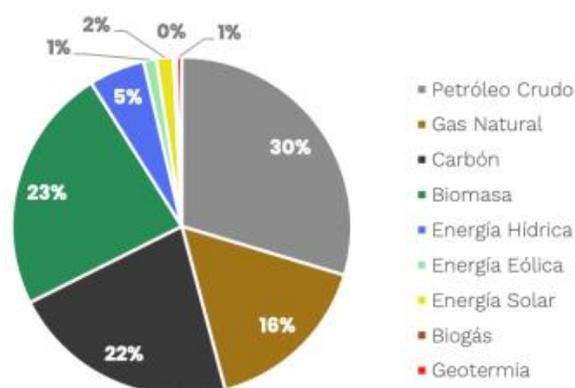


Gráfico 2.2: matriz energética primaria en Chile 2019. Fuente: Ministerio de energía, 2020

Los valores presentados para la matriz primaria en Chile para el año 2019 se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Matriz energética primaria, valores del año 2019 en Tcal. Fuente: Energía abierta (2021)

Energético	Producción bruta	Importación	Exportación	Variación de stock	Oferta Primaria
Petróleo Crudo	1.814,68	101.073,63	-	352,33	102.535,98
Gas Natural	14.257,15	42.259,88	-	514,80	56.002,23
Carbón	5.992,69	67.045,03	-	-1.979,56	75.017,28
Biomasa	80.747,58	-	-	-427,03	81.174,61
E. Hídrica	18.438,68	-	-	-	18.438,68
E. Eólica	4.209,89	-	-	-	4.209,89
E. Solar	5.519,96	-	-	-	5.519,96
Biogás	1.011,44	-	-	-	1.011,44
Geotermia	1.737,20	-	-	-	1.737,20
Total	133.729,27	210.378,54	0,00	-1.539,46	345.647,27

Capítulo 2. Marco teórico

La importancia de la matriz primaria se relaciona directamente con los daños y perjuicios que podrían generar la derivación de los gases producto de la utilización de las energías, es decir, la concentración de energías renovables no convencionales es la porción de energías que menos contribuye a la contaminación ambiental, debido a la baja emisión de gases. Pero también existe un factor de utilización o impacto ambiental que hace referencia a como las plantas eólicas, solares o hidroeléctricas alteran el ecosistema, ya sea por factores alteración en la flora y/o fauna. De ahí la importancia de un equilibrio y conciencia de la utilización de energías renovables no convencionales.

2.1.2.1 Sector eléctrico: Energías RNC, principalmente solar

Las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCR) son fuentes de energía consideradas como una alternativa limpia para el suministro de electricidad frente a generación eléctrica a base de combustible fósiles (Hoyos, Franco, & Dyner, 2017)

Las FNCR han contribuido a la matriz energética primaria en gran medida en las últimas décadas, abasteciendo al país de energía limpia. Una de las más importantes en los últimos 15 años ha sido la energía solar fotovoltaica que, para conseguirlo, se requiere un material que absorba la luz del Sol y sea capaz de transformar la energía radiante absorbida en energía eléctrica, justo lo que son capaces de hacer las células fotovoltaicas. (Jofra, Energía solar fotovoltaica, 2015)

Una corriente eléctrica es un flujo de electrones que se produce al establecerse una diferencia de potencial eléctrico.

De acuerdo con la comisión nacional de energía, en el reporte más actualizado al presente año 2022. La capacidad instalada neta de generación eléctrica al mes de abril asciende a 29380 MW categorizando un 43.5% en energía termoeléctrica, 22.7 % hidroeléctrica convencional y un 33.8 en ERNC. La figura 2.4 muestra y grafica los porcentajes de energía neta por tecnología y por sistema instalado a lo largo del país.

Se declara el SEN como el sistema eléctrico nacional, SEA como sistema eléctrico de Aysén y el SEM como sistema eléctrico de Magallanes.

Capítulo 2. Marco teórico

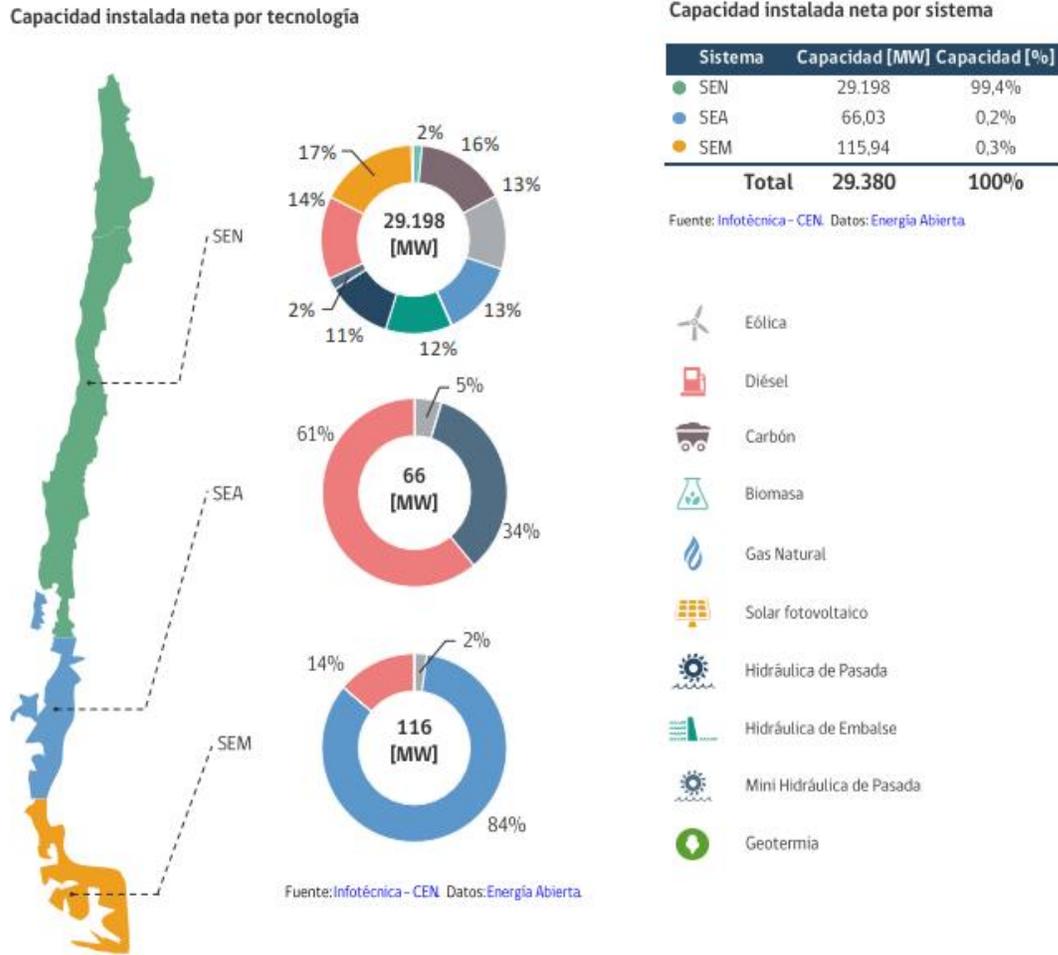


Figura 2.4: Capacidad instalada de energía neta por tecnología. Fuente: Energía abierta 2022

Por otro lado, se desglosa la capacidad energética instalada por ERNC que a la fecha de marzo del presente año (2022) asciende a 9.937 MW, los cuales corresponden a un 33.8% de la capacidad energética en Chile de los sistemas eléctricos nacionales.

La figura 2.5 muestra y grafica los porcentajes de la información proporcionada por el CEN (centro energético nacional) reafirmando la declaración del uso de paneles solares fotovoltaicos como la fuente de energía renovable más utilizada y con mayor porcentaje de capacidad de instalación.

Capítulo 2. Marco teórico

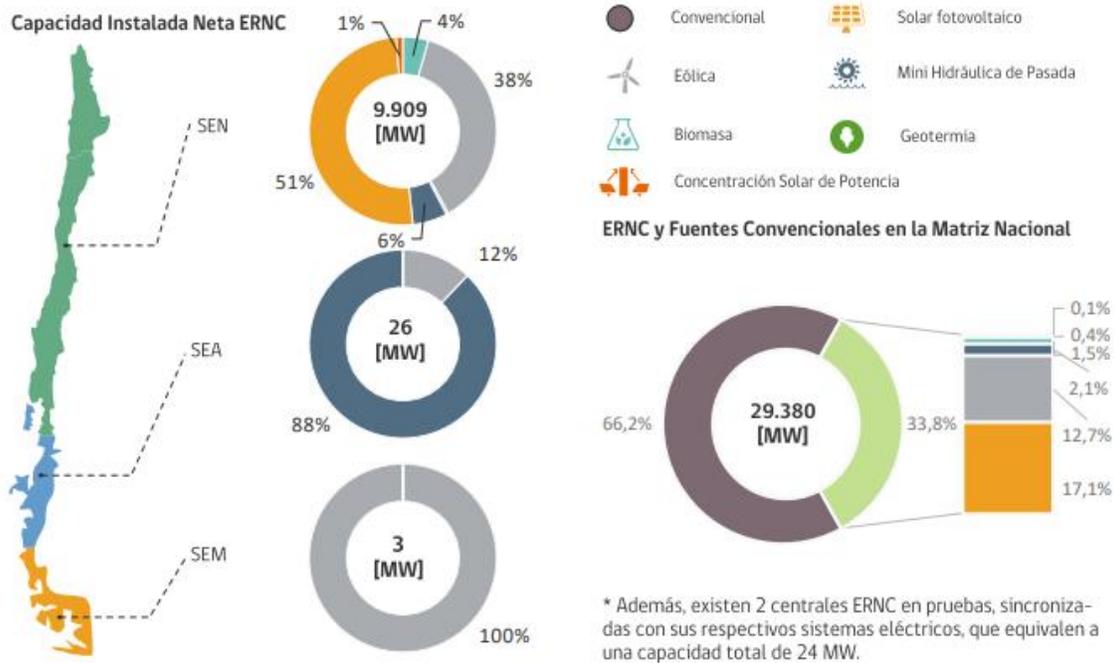


Figura 2.5: Capacidad instalada neta de generación de energía eléctrica en ERNC. Fuente: energía Abierta 2022

Como se mencionó anteriormente, el crecimiento del uso de este recurso (energía solar fotovoltaica) ha crecido de manera exponencial en las última década y ha llegado a la actualidad con 5086 MW a lo que va del año 2022 dejando por debajo al carbón, gas natural y energía eólica. Las gráficas a continuación muestran el avance desde el año 2010 al presente de como a escalando el uso de esta energía.

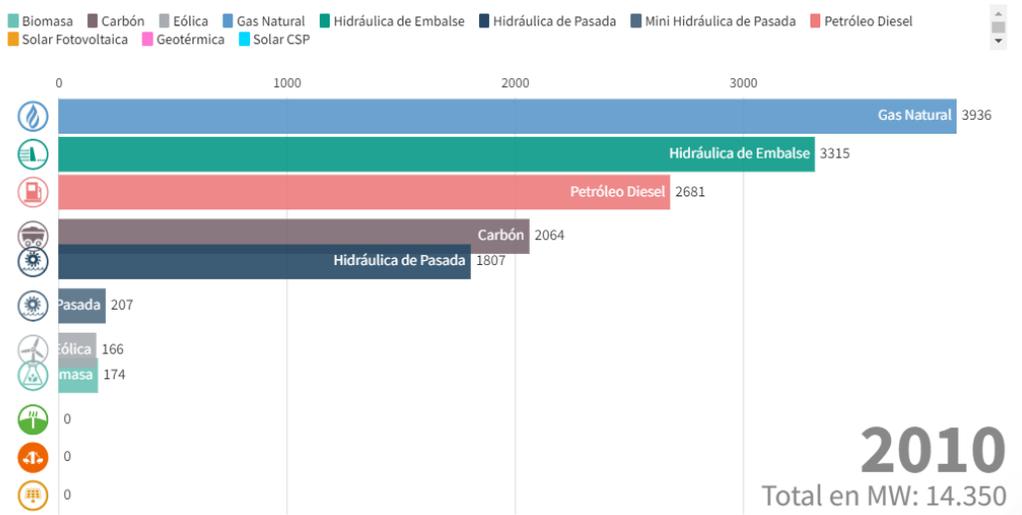


Gráfico 2.3: Uso de recursos energéticos 2010. Fuente: Energía abierta 2022

Capítulo 2. Marco teórico

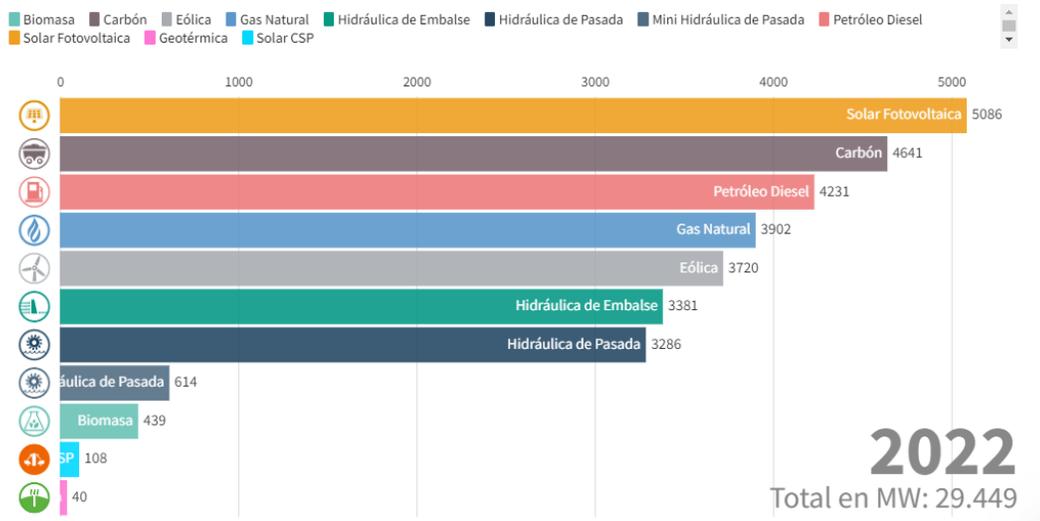


Gráfico 2.4: Uso de recursos energéticos 2022. Fuente: energía abierta 2022

Para ver el uso de los recursos en Chile desde 1989 al presente, ingresar a <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/evolucion-de-la-capacidad-instalada/>.

2.2 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Se le llama energía solar a toda la energía que se obtiene del aprovechamiento de la radiación proveniente del sol. Es por esto por lo que, para comprender la energía solar, se debe estudiar el espectro de radiación solar emitido. El sol emite radiación como un cuerpo negro casi ideal a una temperatura de 5.780, además, de contar con una longitud de onda de 500 nanómetros (Garrido, 2020).

La irradiación espectral se demuestra en función de la longitud de onda en el siguiente gráfico mostrada para la superficie terrestre como fuera de la atmósfera.

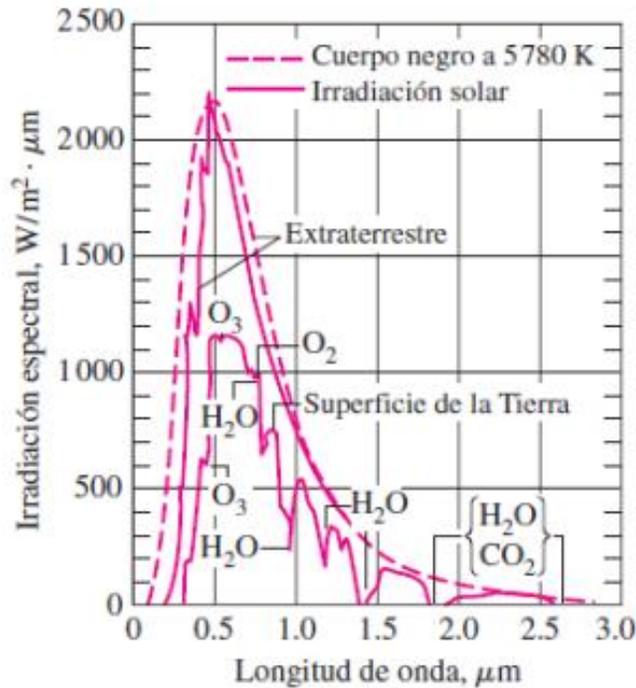


Gráfico 2.5: Irradiación espectral en W/m^2 respecto a las longitudes de onda. Fuente: (Garrido, 2020)

El gran diferencial que presenta el gráfico 2.5 en relación de la zona extraterrestre con la superficie de la Tierra, se explica por qué, la atmósfera terrestre disminuye en gran cantidad de radiación debido a la concentración de gases. También existen mínimos locales debido a las concentraciones de CO_2 y H_2O . La presencia de O_3 también afecta la irradiación presente en la superficie de la tierra.

La integral de la curva de intensidad de radiación sobre todas las longitudes de onda resulta en la potencia total por metro cuadrado recibida. Es así como la potencia fuera de la atmósfera es prácticamente constante, igual a $1.361 [W/m^2]$, y es llamada la constante solar (GSC). Esta constante sufre pequeñas variaciones a lo largo del ciclo solar, que tiene una duración de 11 años aproximadamente. (Garrido, 2020)

Por lo tanto, la potencia solar disponible un vez ingresada a la atmósfera es la que es aprovechada directamente por paneles solares fotovoltaicos y paneles termo solares, ya sea a nivel industrial para abaratar costos eléctricos o a nivel domiciliario.

Capítulo 2. Marco teórico

Para un panel solar que está instalado en la superficie de la tierra, la radiación solar que recibe es la constante solar GSC menos la radiación absorbida y difundida por la atmósfera, por lo que la radiación incidente depende de factores ambientales. Esta es la razón por la cual es importante determinar el desplazamiento del sol a través del cielo durante el día y durante el año. La ubicación del sol en el cielo se puede expresar mediante dos ángulos: la elevación (h) y el azimut (γ_s). (Garrido, 2020)

La elevación, corresponde al Angulo que forma el sol con el horizonte, o presentándose el máximo a medio día si hablamos de los 90° ubicados en una línea con respecto al Ecuador. El azimut corresponde al ángulo trazado entre el norte y la línea imaginaria resultante de unir la proyección del sol en el horizonte con la posición del observador. Dichos ángulos cambian constantemente por la rotación de la tierra y por la órbita. La figura 2.6 relaciona los ángulos con la ubicación del sol.

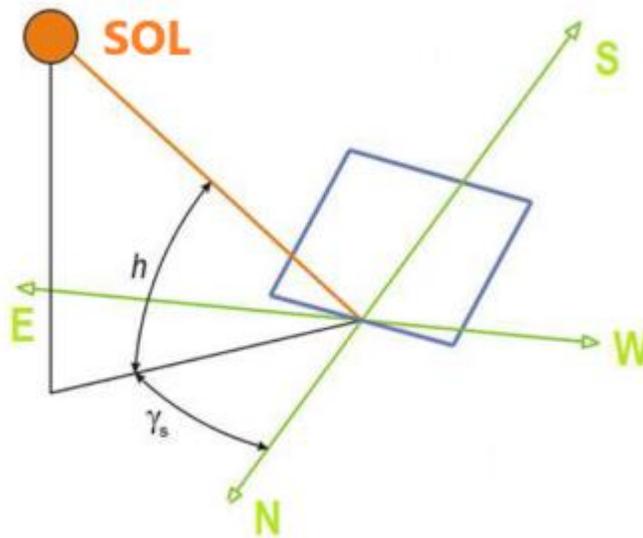


Figura 2.6: Ángulos presentes para la correcta ubicación de un panel solar. Fuente: (Garrido, 2020)

Es importante tener en cuenta que la radiación no solo puede presentarse por el sol, dado que todo objeto que esté sobre los 0 K emite radiación electromagnética. En el caso de un panel solar, el suelo y los objetos circundantes emitirán radiación térmica, así como los gases presentes en la atmósfera. A continuación, se presentan en detalle las características de ambas fuentes de radiación. (Garrido, 2020)

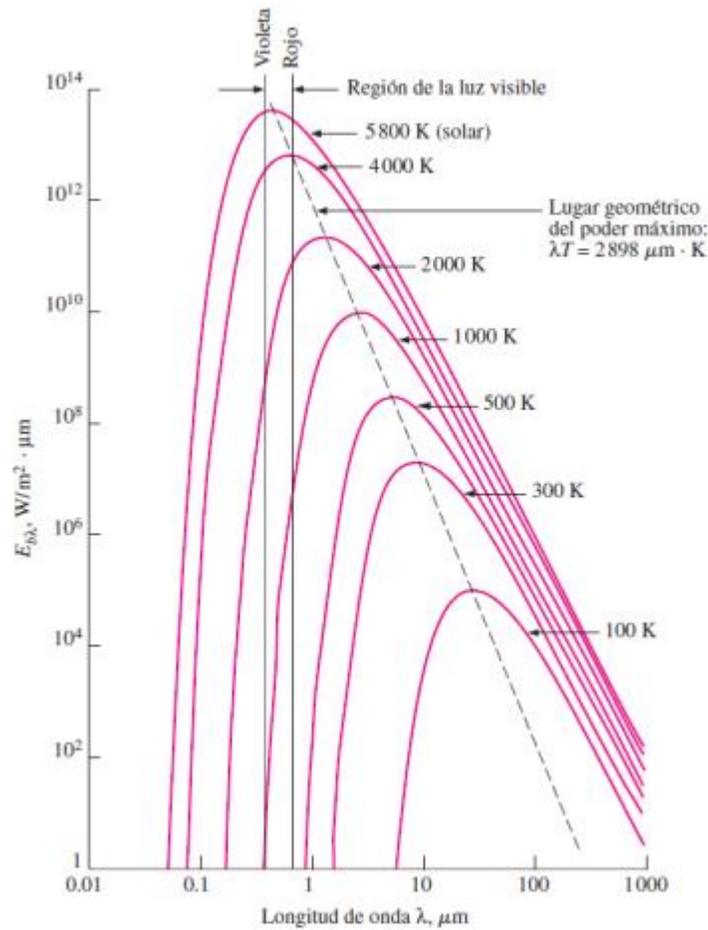


Figura 2.7: Radiación espectral de cuerpos a diferentes temperaturas. Fuente: (Garrido, 2020)

Dejando de lado elementos o cuerpos de irradiación de bajo espectro y focalizando solo la energía proveniente del sol, se pueden encontrar 3 escenarios diferentes: radiación difusa, directa y de reflejo.

La radiación difusa es aquella que es dispersada por la atmosfera y por factores climáticos como la neves mientras que la radiación directa es simplemente la que se presenta sin dispersión.

La radiación por reflexión es además la porción de cualquiera de las dos anteriores que se ve reflejada en un elemento de la superficie terrestre e incide en el panel solar absorbiendo parte de esta. La figura 2.8 muestra lo mencionado anteriormente de forma ilustrativa.



Figura 2.8: Radiación en paneles solares. Fuente: (Garrido, 2020)

2.2.1 Ángulos solares

Para calcular la elevación del sol h y Azimut solar (γ_s) se emplean las siguientes ecuaciones

$$h = \sin^{-1}(\sin(\delta) \cdot \cos(\varnothing) \cdot \cos(\tau)) \quad (1)$$

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{-\cos(\delta) \cdot \sin(\tau)}{\cos(h)}\right) \quad (2)$$

Donde

δ : Es la inclinación de la Tierra, ver ecuación

\varnothing : Es la latitud de la ubicación del panel solar en el globo.

τ : Es el Angulo

La declinación de la tierra se obtiene mediante la ecuación de Cooper con respecto al día del año n

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot (284 + n)}{365}\right) \quad (3)$$

Capítulo 2. Marco teórico

El ángulo de la hora de salida y entrada de sol se calcula como:

$$TSR - SS = \cos^{-1}(-\tan(\emptyset) \cdot \tan(\delta)) \quad (4)$$

Entonces, si h_{cenit} es la hora a la que ocurre el cenit solar, las horas de salida (h_{SR}) y puesta (h_{SS}) de sol se calculan mediante regla de tres con las ecuaciones:

$$h_{SR} = h_{cenit} - \frac{6 \cdot T_{SR-SS}}{90} \quad (5)$$

$$h_{SS} = h_{cenit} + \frac{6 \cdot T_{SR-SS}}{90} \quad (6)$$

2.2.2 Ecuaciones de generación eléctrica

El factor de forma o factor de llenado es la relación entre la potencia máxima que el módulo puede entregar (PMPP) y el producto de la corriente de cortocircuito (ISC) y la tensión circuito abierto (VOC). Este parámetro cuantifica la idealidad del módulo fotovoltaico de tal forma que cuanto más cerca de la unidad nos encontremos, la calidad del módulo será mayor.

Factor de llenado FF se calcula como:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (7)$$

Donde

I_{mp} : Corriente máxima potencial nominal (A), dada por fabricante

I_{oc} : Corriente de cortocircuito (A) dada por fabricante

V_{mp} : Voltaje máximo potencial nominal (V), dado por fabricante

V_{oc} : Voltaje de corto circuito (V) dado por fabricante

La potencia eléctrica generada por el panel solar fotovoltaica está dada por.

$$P_e = I_{mp} \cdot V_{mp} \cdot \frac{G_{in}}{G_{ref}} \cdot (1 - \gamma \cdot (t_{si} - t_{ref})) \quad (8)$$

Capítulo 2. Marco teórico

Donde

P_e : Es la potencia eléctrica generada (w/m^2)

G_{in} : Es la suma de la radiación solar incidente sobre la cara frontal y trasera del panel en condiciones ideales de laboratorio en $[W/m^2]$. En un panel mono facial corresponde sólo a la cara delantera.

γ : Corresponde al coeficiente de disminución de eficiencia por temperatura (-)

T_{si} : Es la temperatura instantánea de la celda en K

T_{ref} : Es la temperatura de referencia a la que ocurre la eficiencia (298,15 K)

G_{in} se calcula como:

$$G_{in} = G_{inF} + G_{inR} \quad (9)$$

Donde G_{inF} y G_{inR} son la radiación solar incidente sobre la cara frontal y trasera del panel respectivamente, en condiciones ideales de laboratorio (panel sin polvo) en $[W/m^2]$. Ambas se calculan como sigue para paneles solares bifaciales, mientras que, en el caso de paneles monofaciales, G_{inR} es igual a cero.

$$G_{inF} = G_{solF} \cdot \tau_{pF} \quad (10)$$

$$G_{inR} = G_{solR} \cdot \tau_{pR} \quad (11)$$

Donde

G_{solF} y G_{solR} : son la totalidad de la radiación solar real incidente por la cara frontal y trasera respectivamente, en $[W/m^2]$. Esta es la radiación sobre el polvo acumulado en el panel.

τ_{pF} : Es la transmisividad del polvo acumulado en la cara frontal (-).

τ_{pR} : Es la transmisividad del polvo acumulado en la cara trasera, que cumple $\tau_{pR} = 1$ cuando no hay polvo en dicha cara (-).

Para determinar las componentes G_{solF} y G_{solR} es necesario saber la posición del sol respecto a las caras de las placas definiéndose de la siguiente manera:

Capítulo 2. Marco teórico

- Si $-90^\circ < \theta_{s-p} < 90^\circ$ (Sol se encuentra en la cara frontal)

$$G_{solF} = G_{dir} \cdot \cos(\theta_{s-p}) + F_s \cdot G_{dif} + \lambda_g \cdot F_g \cdot G_{glob} \quad (12)$$

$$G_{solR} = F_g \cdot G_{dif} + \lambda_g \cdot F_s \cdot G_{glob} \quad (13)$$

- Si $90^\circ < \theta_{s-p} < 270^\circ$ (Sol se encuentra en la cara trasera):

$$G_{sol,F} = F_s \cdot G_{dif} + \lambda_g \cdot F_g \cdot G_{glob} \quad (14)$$

$$G_{sol,R} = G_{dir} \cdot \cos(180 - \theta_{s-p}) + F_g \cdot G_{dif} + \lambda_{ground} \cdot F_s \cdot G_{glob} \quad (15)$$

Donde

θ_{s-p} corresponde: Corresponde al ángulo formado entre la normal a la cara frontal del panel solar y la ubicación del sol en el cielo.

G_{dir} , G_{dif} y G_{glob} : Son la radiación directa, difusa y global respectivamente, en [W/m²]. Estos valores se consideran conocidos.

λ_g : Es el albedo o reflectividad del piso, que se considera un valor conocido.

F_s y F_g : Son los factores de forma del cielo y del suelo, que se obtiene de la siguiente manera.

Los factores de orientación de la cara frontal del panel se determinan con las siguientes ecuaciones:

$$F_s = 1 + \sin(\theta_{p-h})^2 \quad (16)$$

$$F_g = 1 - F_s \quad (17)$$

El ángulo de inclinación entre el plano del panel solar y el plano horizontal corresponde a (θ_{p-h}).

Por otra parte, si se obtiene la irradiancia exacta sobre la célula o panel se puede determinar la eficiencia de este con la siguiente ecuación:

Capítulo 2. Marco teórico

$$ET = \frac{FF \cdot Vocm \cdot Iscm}{G \cdot area} \quad (18)$$

Donde

ET: Eficiencia teórica

FF: Factor de forma

Vocm: tensión máxima en circuito abierto

Iscm: Corriente máxima en corto

G: Irradiación en W/m²

Área: Es el área del panel solar completo

Corrección de radiación por temperatura

$$E_e = \frac{Isc \cdot E0}{Isc0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T0)]} \quad (19)$$

Donde

Isc: Corriente máxima en corto

E0: irradiación bajo normativa 1000 w/m²

Isc0: corriente de corto circuito bajo norma STC

α : factor de corrección por temperatura °C⁻¹

T: temperatura de la celda

T0: temperatura bajo norma

Corrección de la potencia

$$P_{max} = \frac{E_e}{E0} P_{max0} \cdot [1 + \gamma \cdot (T - T0)] \quad (20)$$

Donde E0 y T0 y P_{máx0}, corresponden a la Irradiancia, Temperatura y Potencia en STC y γ , corresponde al factor de corrección de la Potencia máxima por temperatura °C⁻¹.

2.3 PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Los paneles fotovoltaicos son estructuras fabricadas con materiales especiales, que se aprovechan del efecto fotoeléctrico para producir energía eléctrica a partir de la radiación solar incidente. Los paneles solares constan de varias láminas (celdas fotovoltaicas) de un elemento semiconductor (usualmente silicio dopado con sodio, potasio y otros componentes) que producen cada una, una pequeña diferencia de potencial entre sus terminales cuando es irradiado con luz solar. La radiación electromagnética libera electrones de la lámina fotovoltaica, lo que genera una corriente aprovechable para producir energía eléctrica. (Garrido, 2020).

En 2011 los sistemas de energía solar en el mundo generaron 85 Tera vatios/hora de electricidad, que son suficientes para cubrir las necesidades de 100 millones de personas y es Europa la región líder, con una capacidad instalada de 51 GW, seguida por Japón (5 GW), EE. UU. (4,4 GW) y China (3,1 GW). Dentro de Europa España es líder. (Arancibia, 2016).



Figura 2.9: Funcionamiento de paneles solares domiciliarios. Fuente: (Arancibia, 2016)

El funcionamiento básico de los paneles solares y sus celdas fotovoltaicas es la recolección de fotones provenientes de la radiación solar que al pasar por el semiconductor que están hechos los paneles, producen la liberación de un electrón. Este electrón se une al flujo proveniente de la serie de electrones del salto de la órbita de valencia para generar la corriente eléctrica. Esta corriente continua es transformada según sea el caso en corriente alterna para la utilización en sistemas domiciliarios. También puede ser refinada la misma corriente continua para lámparas pequeñas o sistemas de muy bajo consumo.

Capítulo 2. Marco teórico

La figura 2.9 muestra los porcentajes relativo de aprovechamiento y dispersión de la energía solar, sabiendo que existe una parte de perdida y una parte de desaprovechamiento de las resultantes de las 3 diferentes radiaciones habladas anteriormente.

2.3.1.1 clasificación de paneles solares fotovoltaicos

Existen múltiples tipos de paneles solares que se encuentran clasificados según su estructura atómica y el material empleado para componer las celdas que los integran. Dependiendo de estos factores es la eficiencia que pueden entregar. Las celdas más comunes que se pueden encontrar son las de Silicio, debido a su abundancia en la tierra y a los costos de fabricación. Pero también existen celdas que son de Galio-Arsénico, pero los costos generales se disparan, aunque su eficiencia es muy superior. Es debido a ello que son utilizadas en aplicaciones espaciales.

Cuando se habla de paneles con celdas de silicio se clasifican en 3 grandes grupos.

Celdas solares monocristalinas: Son las de mayor eficiencia entre los tres tipos, y los paneles solares confeccionados con estas celdas tienen alrededor de un 22,9 % de eficiencia en la conversión a energía eléctrica, en condiciones normales de operación. Estas celdas solares se confeccionan cortando finas láminas desde un único cristal de silicio de forma cilíndrica manufacturado mediante el proceso Czochralski, lo que explica por qué las celdas monocristalinas tienen las esquinas redondeadas (Garrido, 2020).

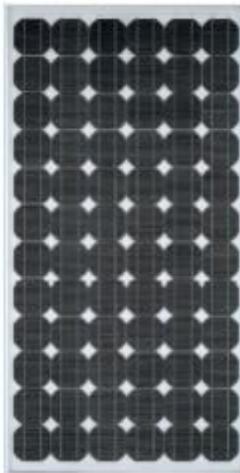


Figura 2.10: Celda solar monocristalina. Fuente: (Pereda, 2005)

Capítulo 2. Marco teórico

Celdas solares policristalinas: las celdas policristalinas poseen en su estructura distintos planos cristalinos, con varios bordes de grano, lo que entrega una serie de propiedades anisotrópicas. Esto se debe a su manufactura, debido a que el silicio es fundido en un solo bloque. (Garrido, 2020).

Suelen tener menor vida útil que sus contra parte y también un menor rendimiento que rodea los 18%. El rango de respuesta espectral es muy similar a la de monocristales a un que su proceso de fabricación lo hace ser más económico. De lo anterior mencionado se explica por la disposición de los gránulos más aleatoria y una apariencia más clara.



Figura 2.11: Celdas solares policristalina. Fuente: (Pereda, 2005)

Celdas solare de silicio amorfo: Son aquellas celdas que en su laminación de silicio no existe una estructura cristalina. Por su fabricación, emplean menos silicio que los casos anteriores, por ende, son mucho más económicas y obviamente su eficiencia decae considerablemente alcanzado solo entre un 6% y 9%. Este tipo de celdas se pueden encontrar en aplicaciones de muy baja energía como calculadoras o relojes.



Figura 2.12: Celda solar de silicio amorfo. Fuente: Hogartech

También existen paneles solares mono-faciales, es decir, solo pueden hacer la transformación de energía desde una de sus caras, paneles solares bifaciales que por su mayor superficie de utilidad generan más energía eléctrica. “Si bien un panel bifacial tiene una eficiencia distinta en cada cara, se usa un único parámetro de eficiencia promedio entre las caras para describir la eficiencia total del panel”. (Garrido, 2020)

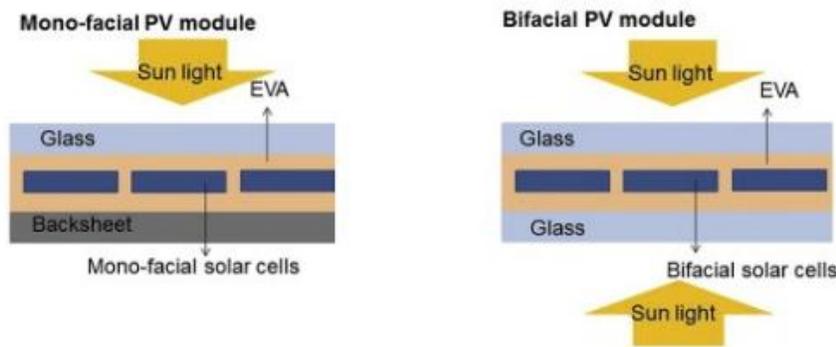


Figura 2.13: Estructura interna mono facial y bifacial para módulos fotovoltaicos. Fuente: (Garrido, 2020)

2.3.2 Funcionamiento de los módulos solares

Una celda solar es un dispositivo que convierte la energía de la luz del sol en energía eléctrica en forma directa, sin la necesidad de piezas móviles o algún tipo de combustión. El efecto fotovoltaico, es decir, convertir la luz solar en electricidad se produce en materiales conocidos como semiconductores, las cuales son materiales cuya conductividad puede ser modificada, y además generar una corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas. (Pereda, 2005). El conjunto de módulos solares fotovoltaicos conectados ya sea en serie o en serie-paralelo es conocido como una celda fotovoltaica. Una medición estándar bajo normativa STC demuestra

que las celdas fotovoltaicas con al menos 36 celdas producen 18 VCC sabiendo que se controla el ambiente y las condiciones de borde (irradiación de 1000 W/m², 25 °C de temperatura de celda).

La estructura física, o arreglo atómico, de los semiconductores se puede dividir en tres grupos: Cristal simple, policristalino y amorfo. La estructura de cristal simple se caracteriza por un ordenamiento periódico de átomos obteniendo una forma geométrica tridimensional de un paralelepípedo. Tal es el caso del Silicio el cual comparte cada uno de sus cuatro electrones de valencia en una unión covalente con cada átomo vecino de silicio, el sólido, por lo tanto, consiste en una unidad básica de 5 átomos de silicio, el átomo original más los cuatro átomos con los que comparte sus electrones de valencia

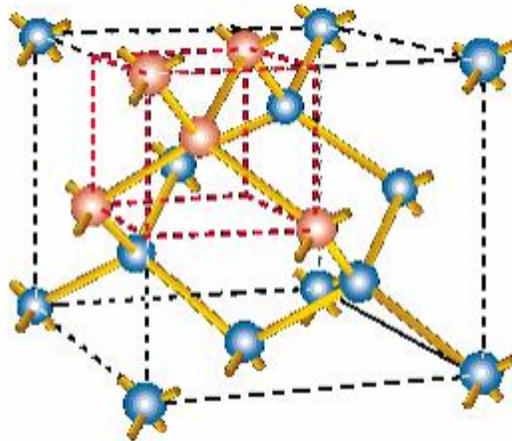


Figura 2.14: Átomo de Silicio. Fuente: (Pereda, 2005)

hoy en día 25% a un 30% de las celdas solares son fabricadas con materiales policristalinos, son menos costosas de construir, por unidad de área, que las celdas solares de cristal simple; sin embargo, tienen una menor eficiencia y a menudo una mayor sensibilidad a los cambios en las condiciones ambientales, por lo que en general son utilizados con concentradores ópticos de luz solar. (Pereda, 2005).

2.3.3 Banda prohibida o band gap

El semiconductor debe producir un flujo de electrones para la generación eléctrica, para esto deben absorber energía para poder acceder a una banda de energía capaz de provocar este flujo.

Capítulo 2. Marco teórico

En la figura se muestra un gráfico de energía versus momentum que un electrón libre. Además, se diferencia la curva de energía de los diferentes conjuntos. La energía entre el punto más alto del conjunto de curvas de energía de valencia y el punto más bajo del conjunto de curvas de conducción es definida como E_g (banda prohibida o Band gap). La banda de valencia y los electrones que en ella se alojan, determinan las características químicas del semiconductor.

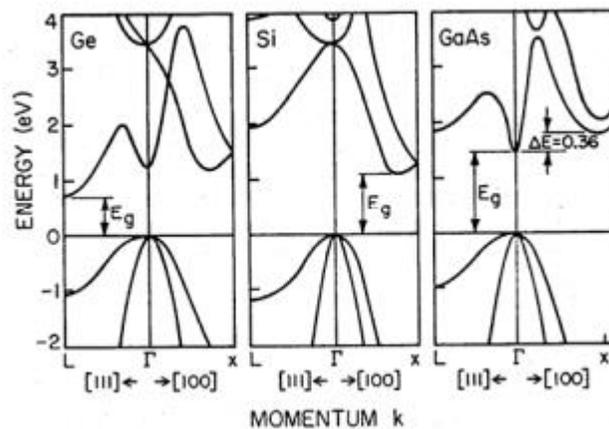


Figura 2.15: Energía vs momentum de un electrón libre para Ge, Si y GaAs. Fuente: Pereda, 2005

Esta banda es la cantidad de energía necesaria para poder separar a un electrón de su enlace covalente y permitir en parte de un circuito eléctrico. La energía de un fotón proveniente de irradiación debe ser a lo menos tan grande como la energía de la banda prohibida para poder liberar al electrón.

Luego, es importante que una celda solar sea ajustada, a través de modificaciones a nivel de estructura molecular del silicio, para optimizar la energía del fotón. La clave para obtener una celda solar eficiente es convertir tanta luz del sol como sea posible en electricidad. (Pereda, 2005).

El silicio cristalino tiene una banda prohibida de 1,1 electronvoltios (eV). (un electronvoltio es igual a la energía ganada por un electrón cuando pasa con un potencial de 1 voltio en vacío.) Las energías de banda prohibida de otros semiconductores eficientes están entre 1,0 a 1,6 eV. En este rango, los electrones pueden ser liberados sin crear calor adicional. (Pereda, 2005).

Capítulo 2. Marco teórico

La longitud de onda determinará la energía del fotón. El espectro infrarrojo ultravioleta cubre un rango de 0.5 eV a 2.9 eV.

Continuando con la idea del funcionamiento del panel o celda fotovoltaica, una vez que el electrón excitado salta de la banda de conducción, se van generando espacios en la banda de valencia del cristal del semiconductor. Estos espacios son llenados rápidamente por electrones que se encuentran más próximos dentro de una zona de agotamiento. Por otro lado, los electrones de la banda de conducción salen por los contactos del panel solar para pasar a una carga externa donde pierden parte su energía. Estos electrones de menor energía ingresan a la celda fotovoltaica por otro contacto donde van llenando los espacios que van dejando los electrones al salir de la banda de valencia. Este proceso se aprecia esquemáticamente en la figura siguiente:

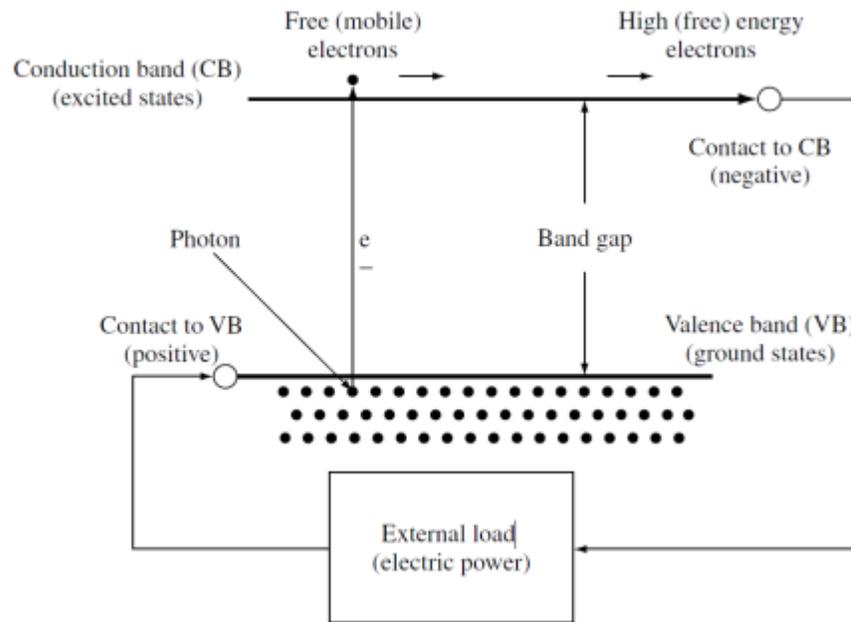


Figura 2.16: Esquema del recorrido de los electrones en un panel solar fotovoltaica. Fuente: (Garrido, 2020)

En la siguiente figura se puede reconocer diversos materiales utilizados para celdas solares, de los cuales se presentan diferencias en la energía de la banda prohibida. Los fotones con la energía igual a la energía la banda prohibida se absorbe para crear electrones libres, mientras que los fotones con menos energía que dicha banda pasan a través del material. (Pereda, 2005)

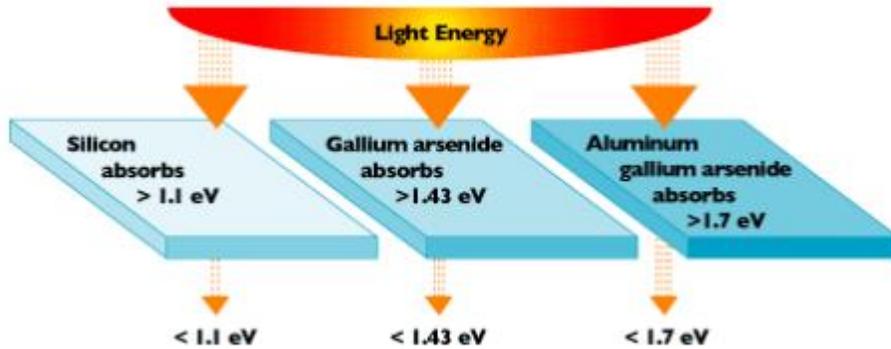


Figura 2.17: Materiales semiconductores con diferentes bandas prohibidas. Fuente: (Pereda, 2005)

2.3.4 Mecanismos de degradación y fallos en módulos FV

Se entiende por mecanismo de degradación o modos de degradación a todo elemento o forma en la cual un fenómeno se manifiesta físicamente en los módulos fotovoltaicos, en alguno de sus elementos o en una serie de estos. Muchas de las veces es complicadas entender la razón de falla en los módulos solares y es que existe una serie de factores que pueden alterar su funcionamiento normal.

Factores ambientales:

Propio del factor climático/ambiental de la zona de localización abarcando desde el tipo de radiación focalizada hasta el viento que interactúa con módulos. Algunos de los más importantes son:

-Radiación solar: fundamental para el funcionamiento de la instalación para producir el efecto fotovoltaico, pero, en su contraparte perjudicante al elevar la temperatura.

-Radiación ultravioleta: es la parte del espectro solar con la energía más alta y que puede interactuar con el módulo fotovoltaico, siendo el encapsulante el elemento más perjudicado por este factor al producirse reacciones químicas en los materiales (foto degradación). (Reguera Gil, 2015)

Capítulo 2. Marco teórico

-Humedad: es uno de los factores más agresivos ambientalmente hablando debido a que si llega a penetrar parte de las conexiones eléctricas o los mismos módulos puede producir corrosión y sulfatación.

-Viento: este factor puede afectar de manera continua dando lugar a una carga estática y dinámica para los módulos fotovoltaicos. A pesar de que, en las pruebas de envejecimiento, según la norma IEC 6121534, el viento es considerado como una carga estática presenta más características de carga dinámica de lo que ha sido estandarizado. (Reguera Gil, 2015)

-Cambios de temperatura: los cambios de temperatura en los módulos generan estrés térmico/mecánico. La composición de los paneles FV varía en componentes como vidrio, aluminio, plásticos, etc. Cada uno de los anteriores con diferentes módulos de Young y coeficiente de dilatación térmica, por lo tanto, al crear variaciones de temperatura pueden llegar a producirse con el tiempo grietas o imperfecciones de sellado que dan paso a la humedad.

-Polvo, tierra y suciedades: en primer lugar, junto a la disminución significativa de rendimiento y por el cual es motivo de estudio, el polvo y las suciedades de diferentes procedencias causan con el tiempo degradaciones importantes. En el estudio de investigación de la universidad de Andalucía el polvo de Australia demostró pérdidas de entre 16 a 27% en rendimiento y envejecimiento temprano mientras que en Israel las pérdidas alcanzaron 95%.

Material

Dentro de los materiales que componen el PSFV el vidrio es el primero en enfrentarse a las adversidades climáticas (viento, nieve, granizo, polvo, contaminación, humedad, calor...). Es por esto mismo que puede verse agravado. Los polímeros son encontrados como encapsulantes en las celdas que ayudan a la aislación del silicio. Debido a la ubicación de este polímero sufrirá una fuerte exposición a radiaciones UV lo cual debilitará su estructura química generando el mecanismo de degradación conocido como decoloración.

Las celdas compuestas por silicio se verán afectadas por el conjunto de los diferentes factores ya mencionados, pero, existe un estudio en una instalación fotovoltaica de prueba situada en la Universidad de Dakar, donde se realizaron mediciones de los parámetros eléctricos en varios módulos de diferentes tecnologías tras un tiempo de funcionamiento obteniéndose la siguiente tasa de degradación anual (Reguera Gil, 2015):

- Módulos A (monocristalino) 0,22%

- Módulos B (policristalino) 1,62%

Delaminación

Cuando se pierde la adhesión entre elementos que componen los módulos fotovoltaicos estamos en presencia de una de laminación. Dicha pérdida de adhesión puede darse entre las cápsulas de polímeros y partes que recubren las células fotovoltaicas. Los principales problemas que trae este efecto pueden ser: la filtración de humedad, pérdidas de aprovechamiento de la luz y el efecto fotovoltaico, degradación por corrosión.

Decoloración

La decoloración se produce por la degradación de los compuestos que encapsulan las células (EVA). El fenómeno es muy fácil de reconocer puesto que el color cambia a amarillo o incluso en ocasiones a marrón. De Esta forma modifica la transmisión óptica, por lo tanto, la energía que genera La célula o el módulo fotovoltaico se reduce.

Puntos calientes

Los puntos más calientes dentro de una célula fotovoltaica pueden producir daños ya sea al mismo módulo u otro elemento de composición. Existe pruebas que determinan que las células fotovoltaicas Pueden relacionar las corrientes eléctricas de las células adquiriendo mayor temperatura en algunos de estos mismos módulos Debido a la dispersión en las mismas bandas de carga.

En condiciones de cortocircuito cuando una célula fotovoltaica está defectuosa, se polariza de una forma inversa adquiriendo un valor de tensión igual, pero de signo contrario al resto de toda la célula. Esta célula se convierte en carga para el resto de las otras y produce una zona de gran estrés térmico produciendo el llamado punto caliente

Burbujas

En comparación con la de laminación la burbujas cónsonas más pequeñas pero que también es producto de la pérdida de adhesión de los componentes o el encapsulan, en pocas palabras es decir paso anterior antes de la de laminación. Suelen aparecer en la parte frontal del módulo en las recubierta del vidrio y en las células solares y muchas veces es difícil de identificar.

Degradación inducida por potencial

Cuando se hacen conexiones en series en los módulos fotovoltaicos aparece el modo de degradación por potencial inducida. Debido a la suma de tensiones de cada uno de los módulos entre sí que varían desde 300 a 500 voltios. Cuando aparece un potencial negativo entre las

células fotovoltaicas y el marco metálico surge una corriente de fuga que transita desde la capa activa del silicio pasando por el encapsulan y la cubierta frontal del vidrio hasta el mismo marco. Generalmente es producida por variación entre climas húmedos y calurosos. También en módulos que han recibido en la parte superficial una capa de anti reflectante. A fin de minimizar este tipo de degradación, se procede a conectar el polo negativo del inversor a tierra para que esta forma eliminar las diferencias de potencial que puedan aparecer.

Para resumir y complementar la figura 2.18 extraída de la tabla del estudio y análisis de degradación de módulos fotovoltaicos de Francisco Reguera muestra la relación de modo de degradación, factor ambiental y parámetro eléctrico resultante.

MODO DE DEGRADACIÓN	FACTOR AMBIENTAL	PARÁMETRO ELÉCTRICO
Decoloración	Radiaciones ultra violeta	Disminución de I_{SC}
Delaminación	Calor y humedad	Aumento de R_s
Corrosión	Humedad	Aumento de R_s
Puntos calientes	Sombreamiento parcial, fallo fabricación	Disminución de I_{SC} y V_{OC}
Burbujas	Calor y humedad	Aumento de R_s
Roturas	Granizo, actos vandálicos, fallo de fabricación	Aumento de R_s , disminución de I_{SC} y V_{OC}
PID	Calor y humedad	Disminución de P_{MPP} y R_p
Descargas eléctricas	Relámpagos	Aumento de R_s

Figura 2.18: Modos de degradación en relación con factores ambientales. Fuente: (Reguera Gil, 2015)

2.4 PARAMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Cuando se habla de parametrización del funcionamiento, se refiere a las características funcionales que entregan los paneles solares fotovoltaicos incluyendo problemas externos que pueden alterar su efectividad o rendimiento.

- Voltaje de circuito abierto (V_{oc}): Es el voltaje (tensión) máximo obtenido cuando no se está extrayendo corriente del módulo. Se representa con V_{oc} por las siglas en ingles open circuit. Como no hay corriente ($I = 0$ [A]), el módulo tendrá un voltaje máximo. (Rau Andrade, 2017).
- Corriente de corto circuito (I_{sc}): La corriente de corto circuito es la máxima corriente de salida que puede entregar un módulo, y se produce cuando hay un cortocircuito, es decir

sin una resistencia. Por lo tanto, sin tensión por la ley de ohm. Se representa como I_{sc} , por sus siglas del inglés short circuit.

(Rau Andrade, 2017).

- Punto de máxima potencia (P_{mp}): La máxima potencia de salida se alcanza con el máximo voltaje (V_{mp}) y la máxima corriente (I_{mp}) posible bajos las condiciones de temperatura e irradiación que se encuentra en operación. Para la curva I-V característica de un módulo, estas condiciones de operación son STC, y el punto de máxima potencia tiene las coordenadas (V_{mp} , I_{mp}). Si las condiciones cambian, los valores V_{mp} e I_{mp} pueden medirse cuando el sistema está operando bajo carga en condiciones reales, y bajo STC. (Rau Andrade, 2017).

2.4.1 Curva I-V

Datos experimentales aseguran que el comportamiento de las células fotovoltaicas tiende a tener un comportamiento de un diodo convencional con la diferencia que la incidencia de radiación determina la separación de electrones en los enlaces covalentes. Por lo anterior, la curva I-V es análoga al del diodo, desplazando el eje de la intensidad por efecto de la radiación.

En la figura 17 se muestra una curva I-V típica (en rojo). El voltaje (V) se representa a lo largo del eje horizontal y la corriente (I) a lo largo del eje vertical. La mayoría de las curvas I-V, se expresan bajos condiciones estándares de prueba (STC). Además, en azul se presenta la potencia en función del voltaje.

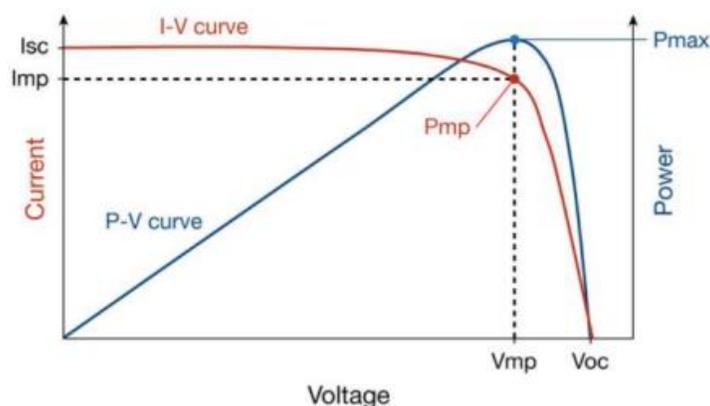


Figura 2.19: Curva I-V Típica de un módulo solar. Fuente: (Castro , 2019)

La potencia que está en el punto máximo se determina por la multiplicación de V_{mp} e I_{mp} , representada por el área bajo la curva en el rectángulo de la figura 2.18

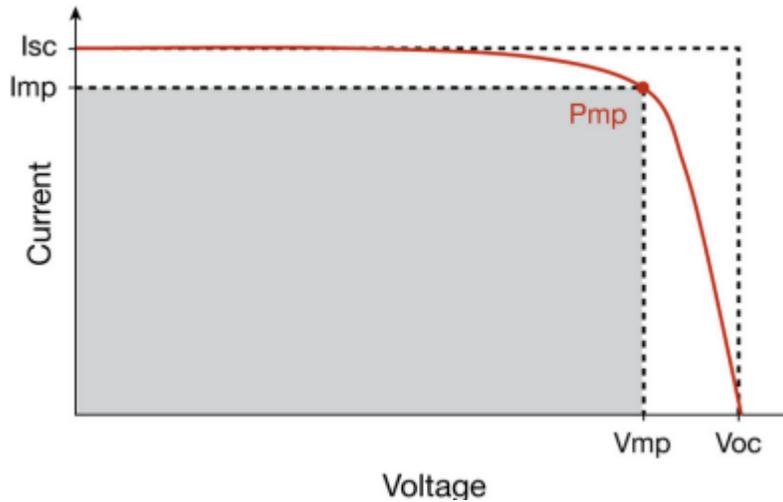


Figura 2.20: Potencia (P_{mp}) de un módulo solar. Fuente: (Rau Andrade, 2017)

2.4.2 Efectos influyentes en el desempeño de módulos solares FV

Radiación solar: Obviamente es el factor más relevante dentro del funcionamiento de los paneles solares FV, ya que, su energía eléctrica es proporcional a la radiación que se capte en los diferentes módulos. No obstante, en términos prácticos, sólo la corriente de cortocircuito es casi exactamente proporcional a la Irradiancia, mientras que la potencia máxima, posee una relación lineal con desplazamiento. (Hurtado Valenzuela, 2016)

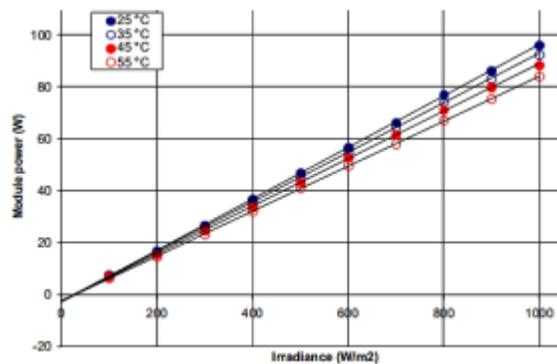


Figura 2.21: Potencia en Función de la Irradiancia. Fuente: (Hurtado Valenzuela, 2016)

Temperatura en la celdas: al cambiar la temperatura de la celdas también se ve alterado el voltaje de salida. Se puede afirmar que la eficiencia se relaciona con la temperatura produciendo cambios significativos sobre los 25°C. Como se aprecia en la figura 2.21, la curva I-V se desplaza horizontalmente hacia la izquierda cuando hay mayores temperaturas y hacia la

Capítulo 2. Marco teórico

derecha a menores temperaturas, indicando un cambio inverso en el voltaje de salida. (Rau Andrade, 2017). Además, sabiendo la composición del silicio se conoce que las temperaturas altas no son de la preferencia de este elemento.

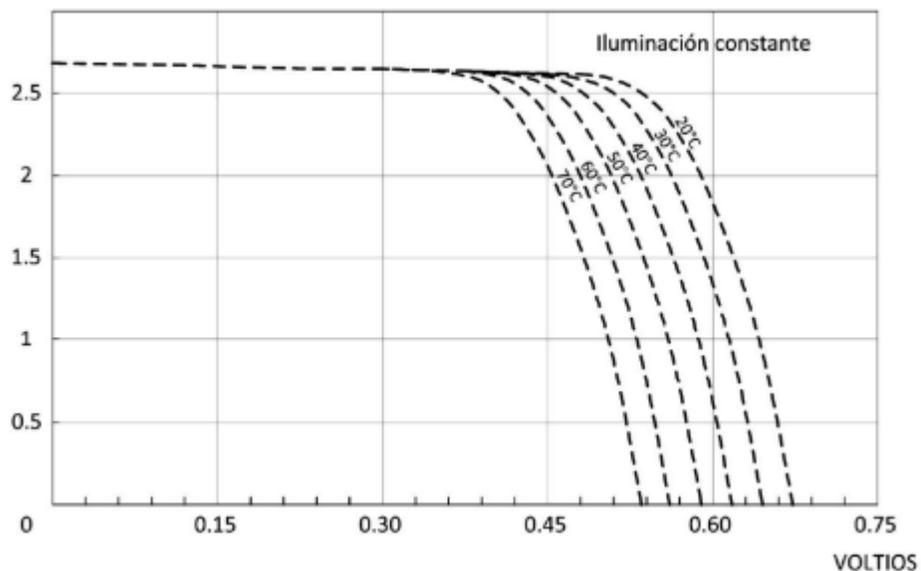


Figura 2.22: Efecto de la temperatura en módulos solares FV. Fuente: (Rau Andrade, 2017)

Sombreado: Así como las altas temperaturas, el sombreado es uno de los principales enemigos de las celdas fotovoltaicas y es que la calidad de la irradiación y sus valores nominales pueden alterarse fácilmente en gran proporción con un sombreado. Un estudio en un panel mono facial con módulos monocristalinos revela que el sombreado total del panel afectó un 75% la potencia de salida de este. (estudio en la figura 2.23).

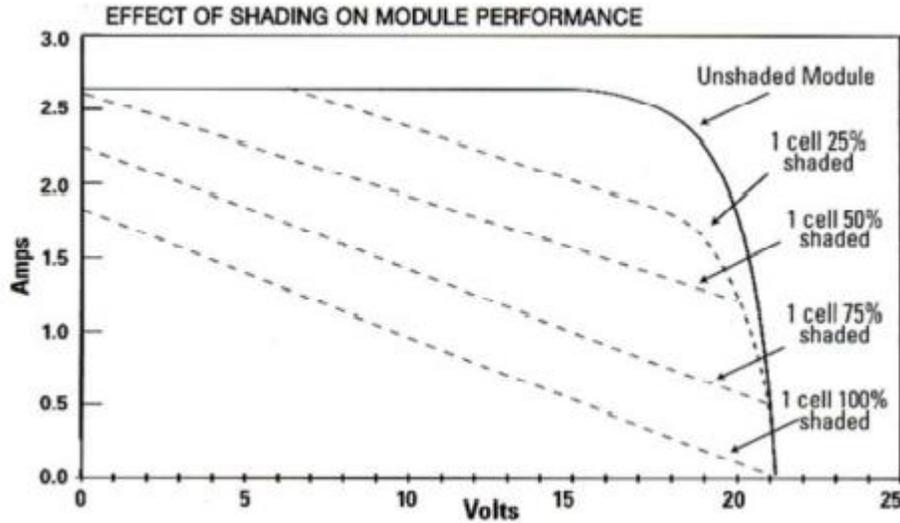


Figura 2.23: Efecto de nombramiento en el desempeño de un módulo FV. Fuente: (Rau Andrade, 2017)

Efecto de sombras de las celdas sobre la potencia del módulo	
Porcentaje de sombra de una celda	Pérdida porcentual de potencia en el módulo
0%	0%
25%	25%
50%	50%
75%	66%
100%	75%
3 Celdas sombreadas	93%

Figura 2.24: Estudio de la influencia del sombreado en paneles solares. Fuente: Solar energy International, 2015

Polvo y Suciedad: El efecto de acumulación de suciedad sobre la superficie de un módulo o arreglo fotovoltaico, es un factor bastante influyente en el rendimiento de los sistemas PV, pues limita, entre otras cosas, la cantidad de radiación solar que puede llegar a las células solares. No obstante, aunque el fenómeno de ensuciamiento sea un factor crucial para cuantificar el rendimiento de los equipos PV, la magnitud de este efecto es difícil de estimar, debido a que depende de numerosos factores tales como la ubicación geográfica, la contaminación ambiental, entre otros. (Hurtado Valenzuela, 2016)

Capítulo 2. Marco teórico

A continuación, se presenta una tabla de resumen con las principales causas de bajas en la efectividad de paneles solares fotovoltaicos.

Tabla 2.3: Efectos influyentes en el rendimiento de equipos solares Fotovoltaicos. Fuente: (Hurtado Valenzuela, 2016)

Efecto	Rango
Temperatura	1%-10%
Ángulo de Incidencia	1%-5%
Envejecimiento	5% durante vida útil
Polvo y Suciedad	0%-15%
Nieve	Depende de la ubicación
Ensombrecimiento Parcial	Depende de la ubicación
Diodos y Cableado	3%

2.5 MANTENIMIENTO INDUSTRIAL

El mantenimiento industrial consta de mantener en las mejores condiciones posibles las instalaciones, dependencias, maquinarias o activos de una empresa, asegurando su correcto funcionamiento y extendiendo la vida útil lo más posible. El conjunto de las actividades para el fin anterior se reconoce como mantenimiento.

A lo largo de los años, el término “mantención” ha ido desarrollándose de forma gradual, a condiciones que ha formado ser un pilar en la empresa. El mantenimiento industrial es parte de la ingeniería de hoy en día.

Existen diversos tipos de mantenimiento, los cuales pueden relacionarse entre sí con las actividades para lograr que el desarrollo de la empresa y la funcionalidad no deje de crecer.

Algunos de los más comunes en la industrial de clase mundial son:

Mantenimiento correctivo: Es el conjunto de actividades destinada únicamente a la reparación de sucesos o desperfectos que ocurran dentro del proceso. Lo más común es que los mismo operarios den aviso de los desperfectos y se comunique al área de ingeniería para solucionar el problema lo antes posible.

Capítulo 2. Marco teórico

Mantenimiento preventivo: Este proceso ya comienza a dar más vida a proceso de mantener los activos ya que, las actividades e intervenciones de las maquinas o activos son planeadas y presentan paradas de fuera del horario de producción. Son tomados ciertos ciclos para dar revisión o ajustes de tal forma de mantener siempre el buen funcionamiento.

Mantenimiento predictivo: los ciclos son dejados de lado para intervenir en la maquinaria solo cuando se necesite. Para ello se necesitan estudios específicos y monitoreo de funcionamiento de las máquinas para entender cuando es necesario intervenirlas. Este mantenimiento necesita medios más tecnológicos.

Algunas de las técnicas son:

- Termografía Infrarroja.
- Prueba de partículas magnéticas.
- Ultrasonido.
- Análisis de vibración.
- Análisis de aceites.
- Tinta penetrante.

2.6 TERMOGRAFÍA INFRARROJA APLICADA

Dentro de área de mantenimiento industrial, la termografía infrarroja ha tomado la vanguardia al ser un análisis confiable no destructivo, es decir, no hace falta intervenir directamente con el objeto o sistema a analizar, ni mucho menos tener que dejar inoperativo para poder dar un diagnóstico. Es capaz de analizar en tiempo real los sistemas y en funcionamiento cotidiano.

Se define a la Termografía Infrarroja como una técnica de inspección no destructiva, cuyo objeto de estudio, es el espectro de radiación infrarroja a través de la obtención de imágenes térmicas o termo-gramas superficiales de los cuerpos u objetos a analizar. Básicamente, corresponde a una técnica que posibilita la medición de temperaturas aludidas a un cuerpo, sin necesidad de contacto físico, empleando para ello una Cámara Termográfica. (Hurtado Valenzuela, 2016)

Estas cámaras termográficas no son muy diferentes de una cámara fotográfica o fílmica corriente, ya que proporcionan una imagen inmediata pero aludida a lo es el factor infrarrojo de la radiación espectral de patrones térmicos en los objetos.

Capítulo 2. Marco teórico

Las ondas electromagnéticas que se propagan en el espacio tienen la característica de abarcar un gran número de longitudes de onda y frecuencias. La distribución energética del conjunto de ondas que generan los campos electromagnéticos conforma lo que se conoce bajo el nombre de Espectro Electromagnético. Debido a que el espectro electromagnético comprende la secuencia de todas las ondas electromagnéticas conocidas, éste considera las ondas de radio y televisión, luz visible, radiación infrarroja, ultravioleta, rayos X y rayos gamma. Esta distribución puede observarse a continuación:

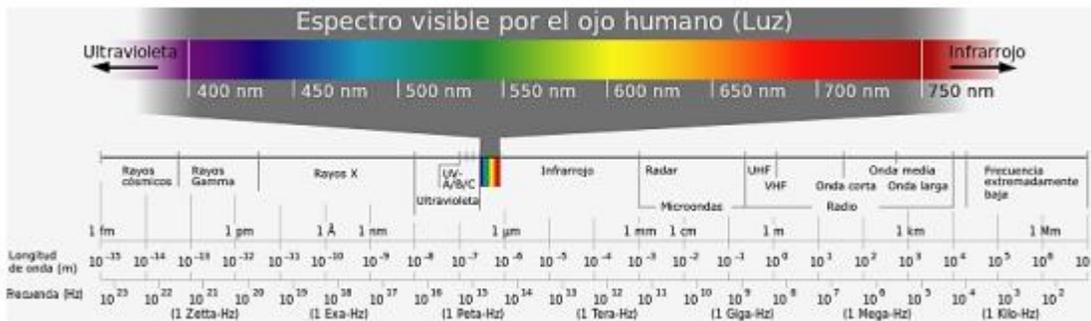


Figura 2.25: Espectro electromagnético. Fuente: (Hurtado Valenzuela, 2016)

Las principales ventajas de esta aplicación son las siguientes:

- Es instantáneo y sin retrasos ni actualizaciones. Es posible tomar termografía a objetos tanto en movimiento como estáticos.
- La Termografía es una técnica no invasiva. Como la inspección termográfica no requiere de contacto directo, el objeto que se quiere analizar no es afectado por la medición y, además, se puede evitar el peligro asociado a los objetos en movimiento o equipos que trabajan a muy alta temperatura. (Hurtado Valenzuela, 2016)
- Es una técnica que cualquiera puede deducir y utilizar, su funcionamiento es muy básico en gama de colores, espectros y numeración.
- La termografía es multidisciplinaria. Las imágenes obtenidas mediante una cámara termográfica no sólo propician información sobre la temperatura asociada a un cuerpo, sino que también, puede obtenerse patrones y distribuciones de temperatura, calor, radiación infrarroja, comportamiento y anomalías térmicas. (Hurtado Valenzuela, 2016)

Capítulo 2. Marco teórico

Hoy en día, casi todas las cámaras infrarrojas contienen detectores cuyo conjunto es denominado FPA (Focal Plane Array, es decir arreglo de plano focal). El número de detectores define el tamaño de las imágenes (número de píxeles). Hay dos tipos de detectores: los detectores cuánticos, generalmente refrigerados, y los micro bolómetros, no refrigerados. (Balageas, 2007)

Los primeros son foto detectores acoplados a un sustrato que hace la salida eléctrica de la lectura del píxel (ROIC, Read-Out Intégrate Circuit). Es lo que se llama hibridación de la óptica con su electrónica. La tasa de actualización puede ser elevada (centenares de Hz - cuadros por segundo). Los segundos son termómetros: cuando un fotón llega, es detectado por el detector mediante un cambio de su temperatura, lo cual hace que la conductividad del material cambia, monitorizándose a través del cambio de una intensidad de corriente de referencia que circula por el dispositivo. El receptor debe estar aislado térmicamente del ROIC y ser eléctricamente conductivo. El hecho de trabajar basándose en un efecto foto conductivo limita la tasa de actualización generalmente a 25 Hz. (Balageas, 2007)

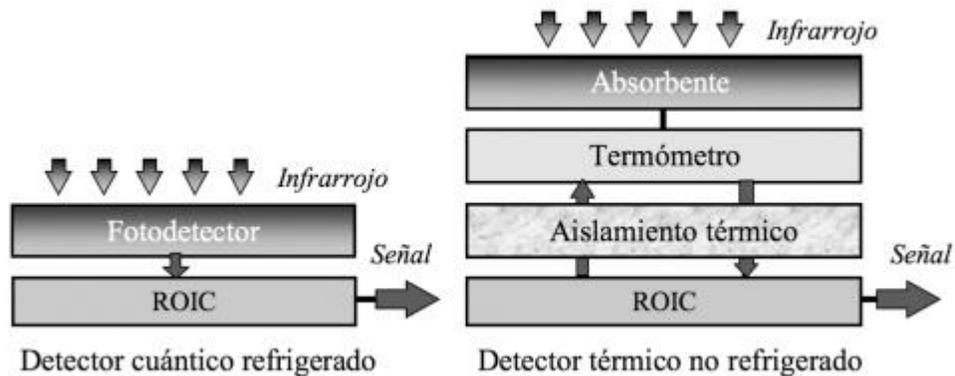


Figura 2.26: Tipos de detectores infrarrojos. Fuente: (Balageas, 2007)

En ambos casos la cámara genera señales relacionadas a la energía recibida. Si se considera un sistema totalmente aislado del medio, depende de la temperatura superficial. El caso más general la dependencia puede ser un función muy complicada de la longitud de onda, temperatura, dirección y focalización.

En resumen, una cámara termográfica trabaja de la siguiente manera:

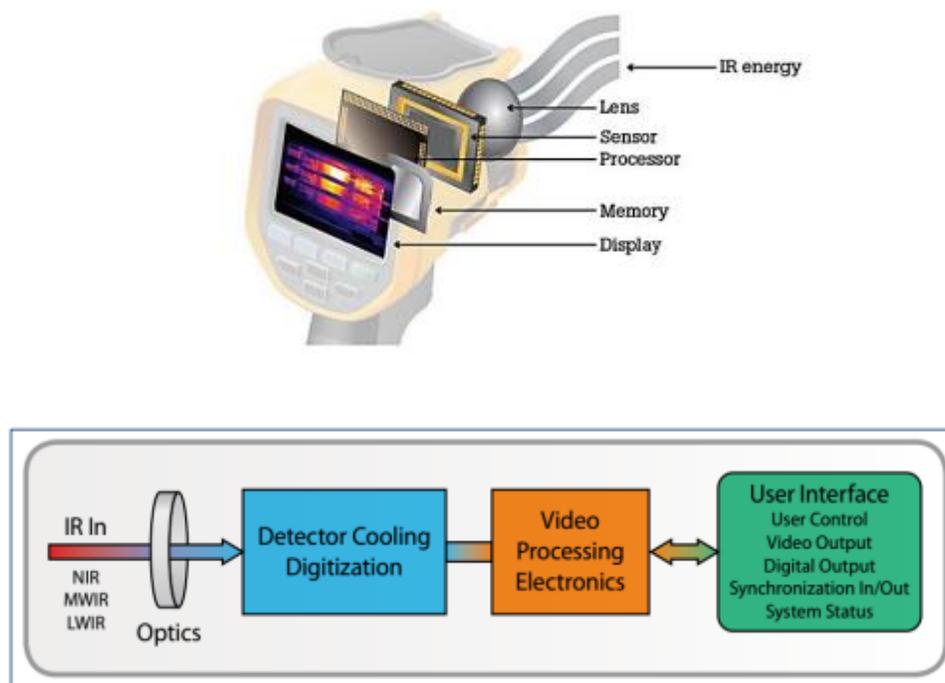


Figura 2.27: Funcionamiento general de una Cámara Termográfica. Fuente: *The Ultimate infrared Handbook for R&D Professionals, FLIR Systems*

Generalmente se considera que se puede definir una emisividad media independiente de la longitud de onda (cuerpo negro y cuerpos grises). En este caso, se hace la calibración con un cuerpo negro extendido y se aplica la emisividad idónea. (Balageas, 2007).

Si el sistema es considerado tridimensional se debe tener en cuenta el Angulo de influencia bajo el cual la cámara apunta como se puede ver en la figura 2.25.

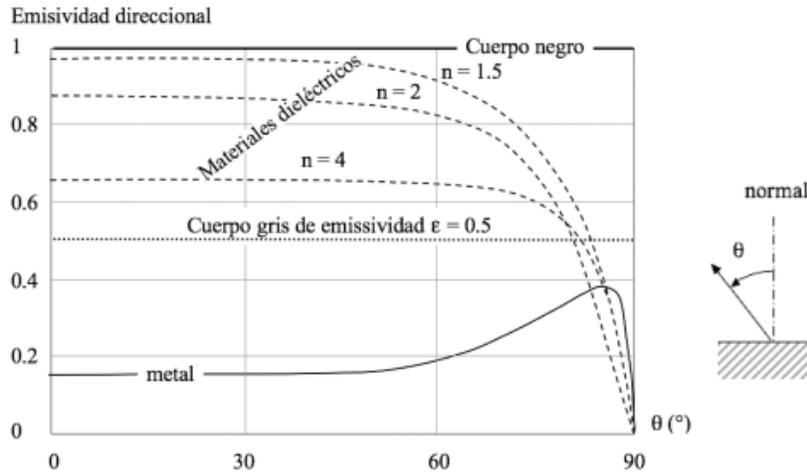


Figura 2.28: Indicatrices de emisión del cuerpo negro, del cuerpo gris y de los dos tipos de materiales (dieléctrico y metálico). Fuente: Balageas,2007

2.6.1 Principios básicos de la radiación térmica

La intensidad de la energía emitida por un cuerpo u objeto varía en función de su temperatura y longitud de onda (λ) de radiación. No obstante, además de emitir radiación, un cuerpo puede reaccionar con su entorno absorbiendo o reflejando parte de la radiación incidente, o permitiendo que dicha radiación pase a través de él. Este principio físico corresponde a la Ley de Radiación Total y puede examinarse a través de la siguiente relación. (Hurtado Valenzuela, 2016)

$$W = w\alpha + w\rho + w\tau \quad \text{ó} \quad 1 = \alpha + \rho + \tau \quad (18)$$

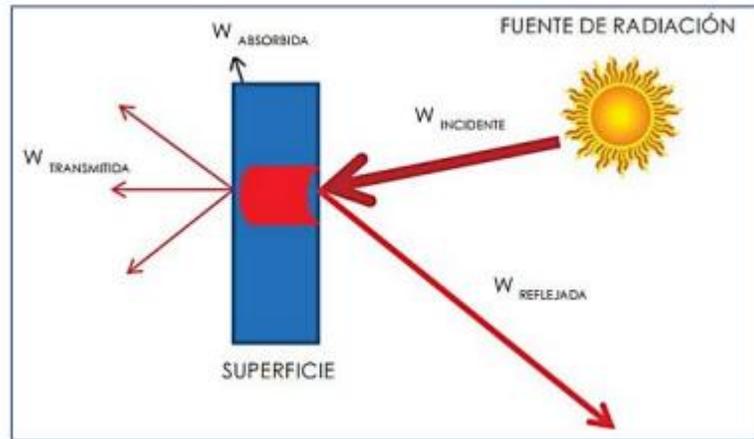


Figura 2.29: Radiación incidente, absorbida, reflejada y transmitida. Fuente: Guía de la Termografía Infrarroja

Los coeficientes α , ρ y τ describen respectivamente, la absorción de energía incidente recibida por un cuerpo, la reflexión y la transmitancia. Cada coeficiente puede ser evaluado entre los valores 0 y 1, dependiendo de la capacidad que tenga un cuerpo de absorber, reflejar o transmitir la energía incidente de radiación. Esto quiere decir, que si los factores $\rho = \tau = 0$, el factor de absorción α tomaría un valor igual a 1, y, por tanto, no hay radiación reflejada o transmitida; la radiación incidente es 100% absorbida. Este fenómeno caracteriza a los Cuerpos Negros Perfectos. (Hurtado Valenzuela, 2016).

La ley de Kirchhoff establece que $\alpha = \epsilon$, es decir, el factor de absorción es igual a la emisividad. Debido a que ambos valores varían en función de la longitud de onda de la radiación, la relación descrita puede tomar la siguiente forma: $\alpha(\lambda) = \epsilon(\lambda)$. (Hurtado Valenzuela, 2016)

Finalmente, y considerando el parámetro ϵ de Kirchhoff, la ley de Radiación total se puede expresar como:

$$1 = \epsilon + \rho + \tau \quad (19)$$

Si un cuerpo es opaco, entonces, $\tau = 0$. Por otra parte, para un Cuerpo Negro Perfecto, $\rho = 0$, entonces $\epsilon = 1$.

Capítulo 2. Marco teórico

2.6.1.1 Correlación entre emisión y reflexión

1. Medición de objetos con alta emisividad ($\varepsilon \geq 0,8$):

Tengo baja reflectancia (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$ su temperatura se puede medir muy fácilmente con la cámara termográfica

2. Medir objetos con emisividad promedio ($0,6 < \varepsilon < 0,8$):

Tengo reflectancia promedio (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$ su temperatura se puede medir fácilmente con el termo reproductor de imágenes.

3. Medición de objetos con baja emisividad ($\varepsilon \leq 0,6$):

Tengo alta reflectancia (ρ): $\rho = 1 - \varepsilon$ medir la temperatura con la cámara termográfica es posible, pero debe examinar los resultados con mucho cuidado

Obs: el carburo de silicio, o laminaciones de silicio tiene una emisividad de 0,9.

2.6.2 Manejo de la emisividad en termografías

Cuando la temperatura del objeto de medición es superior a la temperatura ambiente:

- Los ajustes de emisividad excesivamente altos dan lugar a lecturas de temperatura excesivamente bajas temperatura
- Los ajustes de emisividad excesivamente bajos dan lugar a lecturas de temperatura excesivamente altas temperatura excesivamente alta

Cuando la temperatura del objeto de medición es inferior a la temperatura ambiente:

- Los ajustes de emisividad excesivamente altos dan lugar a lecturas de temperatura excesivamente altas temperatura excesivamente alta
- Los ajustes de emisividad excesivamente bajos dan lugar a lecturas de temperatura excesivamente bajas temperatura excesivamente baja

Ambos casos anteriores se representan en la figura a continuación

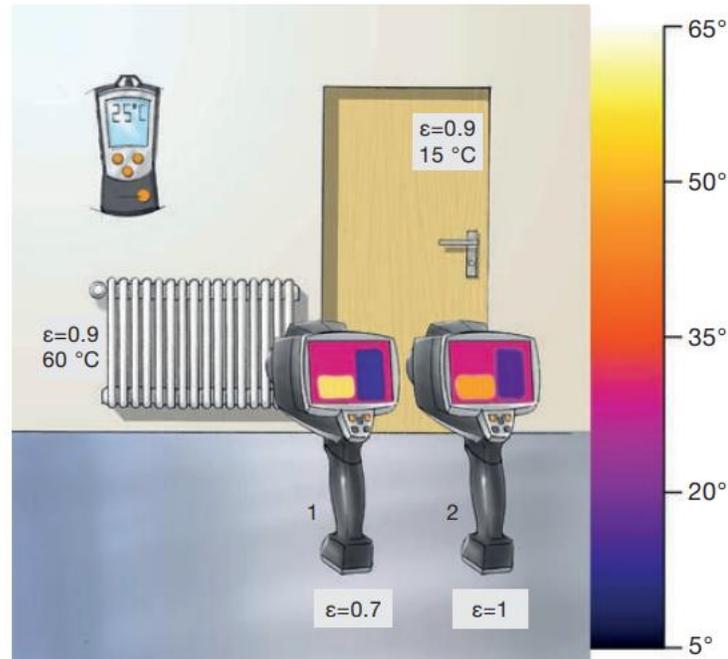


Figura 2.30: Efectos de un ajuste incorrecto de la emisividad en la medición de la temperatura. Fuente: Pocket Guide Thermography

Cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura del objeto de medición y la temperatura y la emisividad sea menor, mayores serán los errores de medición. Estos errores aumentan si el ajuste de la emisividad es incorrecto.

2.6.3 Punto de medición y distancia de medición distancia

Hay que tener en cuenta tres variables para determinar la distancia de medición adecuada y el objeto de medición máximo que es visible o medible (TESTO AG, 2012):

- Campo de visión (FOV)
- El objeto identificable más pequeño (IFOV geo)
- El objeto medible más pequeño / punto de medición (IFOV meas)

El campo de visión (FOV) de la cámara termográfica describe el área visible con la cámara termográfica (ver figura).

Para obtener un gran campo de visión, debe usar una lente gran angular.

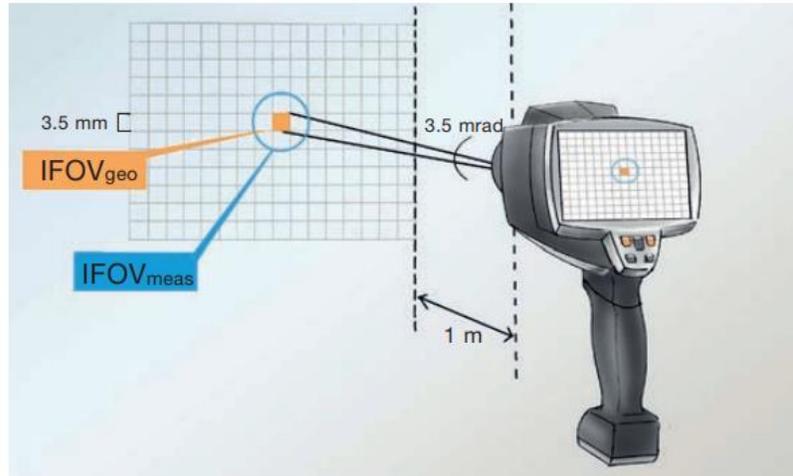


Figura 2.31: Campo de visión de un solo píxel. Fuente: (TESTO AG, 2012)

Por lo tanto, la siguiente regla empírica se aplica al objeto medible más pequeño (IFOV_{meas}):

$$\text{IFOV}_{\text{meas}} \approx 3 \times \text{IFOV}_{\text{geo}} \quad (20)$$

2.6.4 radiación en termografía

En particular, los objetos con una gran diferencia de temperatura con respecto al objeto de medición pueden interrumpir la medición infrarroja como resultado de su propia radiación. Debe evitar o desactivar las fuentes de interferencia de este tipo siempre que sea posible. Al examinar las fuentes de interferencia (por ejemplo, con lona o una caja de cartón), reducir este efecto negativo en la medición. Si el efecto de la fuente de interferencia no se puede eliminar, la temperatura reflejada no corresponde a la temperatura ambiente. (TESTO AG, 2012).

La radiación infrarroja emitida por el cielo despejado se conoce informalmente como “radiación de cielo frío”. Si el cielo está despejado, “radiación de cielo frío” (~ -50 °C a -60 °C) y la radiación solar caliente (~ 5500 °C) se reflejan durante el día. En términos de área, el cielo supera al sol, lo que significa que la temperatura reflejada en la termografía exterior es normalmente por debajo de 0 °C, incluso en un día soleado. Los objetos se calientan con el sol como resultado de la absorción de la luz solar. Esto afecta considerablemente la temperatura de la superficie, en algunos casos durante horas después de la exposición a radiación solar.

Capítulo 2. Marco teórico

Se puede ver en la Figura 2.31 que la canaleta se muestra más fría que la pared de la casa. Sin embargo, ambos tienen la misma temperatura. Por lo tanto, la imagen debe ser interpretada. Supongamos que la superficie del canalón está galvanizada y tiene emisividad extremadamente baja ($\epsilon = 0,1$). Por lo tanto, solo el 10 % de la radiación infrarroja de onda larga emitida por el canalón es inherente radiación, el 90 % es radiación ambiental reflejada (RTC). Si el cielo está despejado, “radiación de cielo frío” ($\sim -50\text{ °C}$ a -60 °C) entre otras cosas se refleja en el canalón. La cámara termográfica se establece $\epsilon = 0,95$ y $RTC = -55\text{ °C}$ para asegurar la correcta medición de la casa pared. (TESTO AG, 2012)

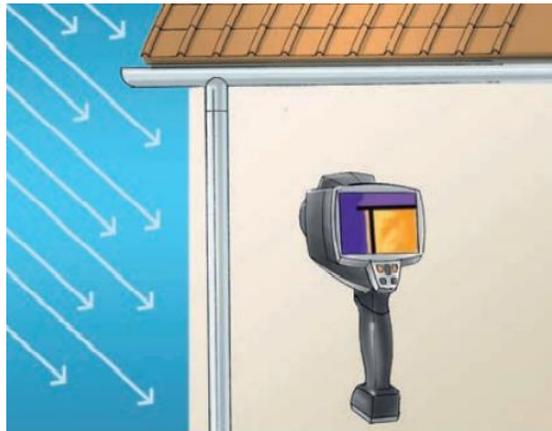


Figura 2.32: Radiación en exteriores. Fuente: (TESTO AG, 2012)

2.6.5 Termografía en vidrios

El ojo humano es capaz de ver a través de los vidrios, pero estos son impermeables a los rayos infrarrojos, por lo tanto, si se toma termografía en un objeto que este por el lado contrario de un vidrio, la cámara termográfica captará la emisividad del vidrio y por lo general el vidrio es altamente reflectante, ósea que en exteriores solo variará la termografía arrojando datos totalmente incongruentes. Es por esta razón que se debe tener en cuenta en las interpretaciones lo anterior.

La imagen a continuación (2.33) ejemplifica lo mencionado:

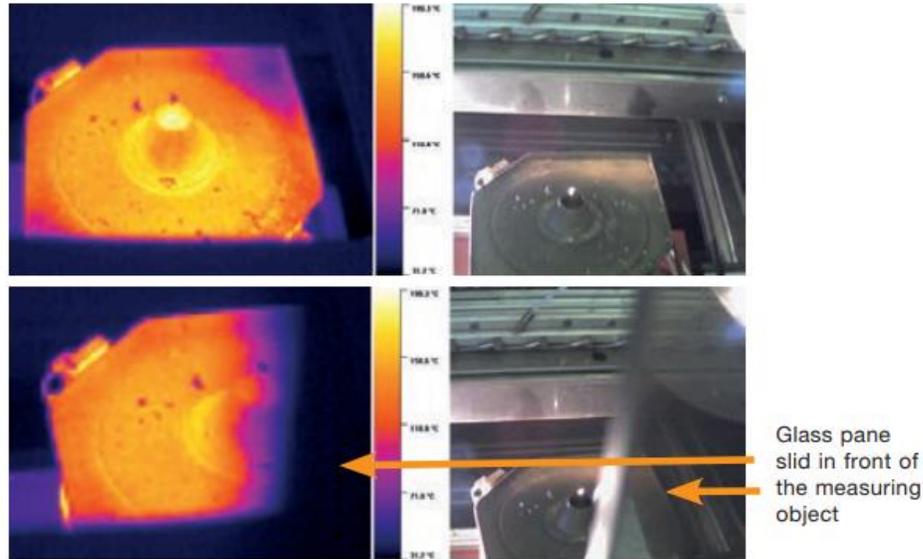


Figura 2.33: Termografía errónea a través de un vidrio. Fuente: (TESTO AG, 2012)

2.6.6 Especulación de reflexión

Un reflejo especular claramente visible es a menudo un indicador de un alto superficie reflectante, es decir, una superficie con baja emisividad. Sin embargo, altamente especular para el ojo humano no siempre significa que también sea altamente reflectante en el rango infrarrojo. Por ejemplo, los reflejos especulares de la radiación ambiental se pueden ver en la imagen térmica de una superficie pintada (por ejemplo, la silueta de la persona que toma la lectura), incluso aunque la pintura generalmente tiene una alta emisividad ($\epsilon \approx 0,95$). En cambio, los contornos de los objetos reflejados en el entorno de medición no se pueden ver en la imagen térmica de una pared de piedra arenisca, por ejemplo, aunque la arenisca tiene baja emisividad ($\epsilon \approx 0.67$), si la radiación ambiental se refleja especularmente en contornos claros, no depende principalmente de la emisividad sino de la estructura de la superficie. (TESTO AG, 2012)

Toda la radiación siempre se refleja en el mismo ángulo con el que incide en el superficie. Esto significa que siempre se aplica la siguiente regla general: ángulo de incidencia = ángulo de reflexión. Esto es claramente reconocible en la Figura 2.3 en la sección transversal ampliada de la mitad lisa del papel de aluminio (lado izquierdo). Aquí la radiación infrarroja del persona que toma la lectura se refleja en la misma forma en que se golpea la superficie (reflexión especular).

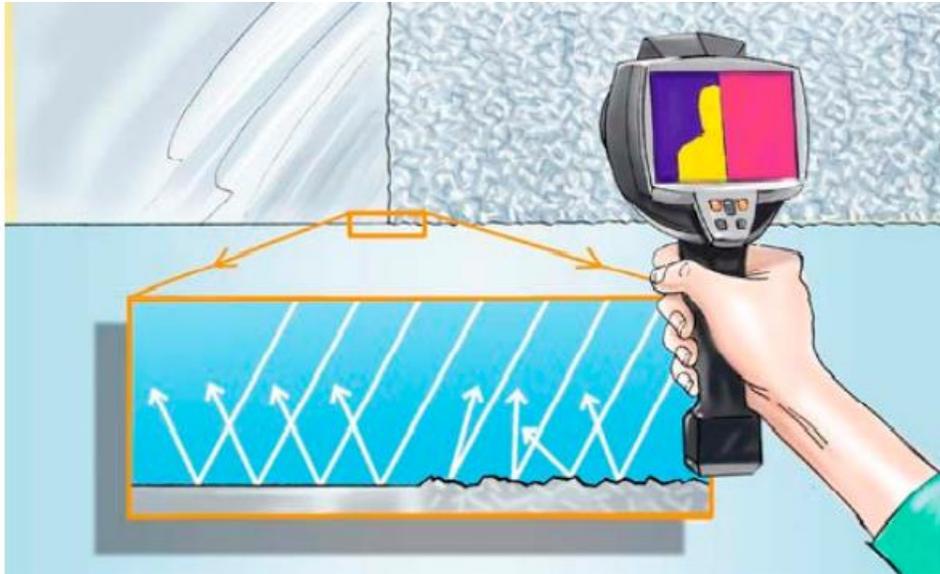


Figura 2.34: Especulación y difusión de reflexión. Fuente: (TESTO AG, 2012)

2.6.7 Otras recomendaciones

Jamás tomar termografía significativa si:

- Existe neblina y lluvia dado que la radiación es dispersada por las gotas alterando las lecturas.
- La emisividad se ve afectada por factores de polvo abrasivo o sustancias externas.
- El aire presenta humo: el humo es factor de difusión directa en termografía.
- Existe aire acondicionado: el aire acondicionado interviene con las s temperaturas reales de los objetos.
- La cámara se encuentra descalibrada o con gradientes visuales alterado: muchas de las cámaras actuales son auto calibrables mientras que otras tienen un lente calibrador, si este se encuentra mal ajustado la imagen tenderá a presentar dispersión de tintes o mal interpretado de las temperaturas. Ver ejemplo de la figura

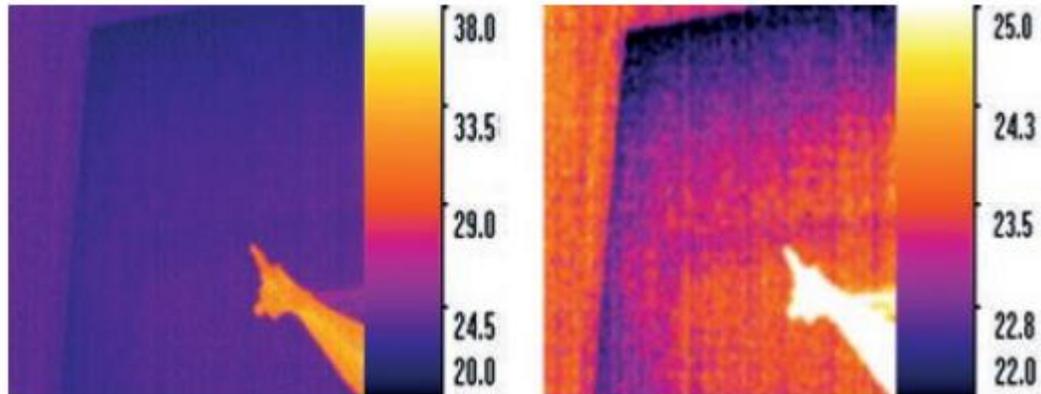


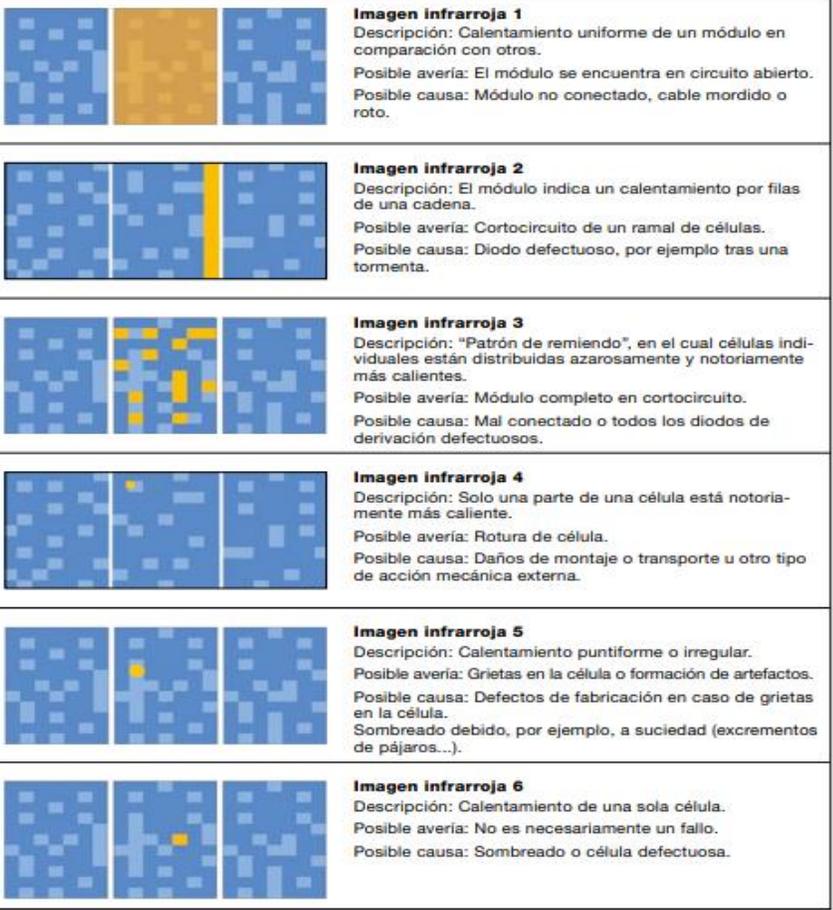
Figura 2.35: Cámara descalibrada o mal ajuste de escala terma. Fuente: (TESTO AG, 2012)

2.7 NORMATIVA VIGENTE PARA EL ESTUDIO

Esta sección declara las normativas por las cuales se rige el estudio para la toma de muestras, tipología de análisis, método de inspección y corroboración de elementos actualmente instalados en la planta aclarando que forman parte del sistema básico entregado por la SEC y ministerio de energía, referentes a “división de energía eléctrica en Chile” y el “manual de inspección y revisión de sistemas fotovoltaicos”. Además de las recomendaciones y leyes vigentes para el uso de termografía. La información extraída se obtiene de (TESTO AG, 2012), (Normativa aplicable a energía solar en Chile, 2021) Y (Comisión Nacional de Riego, 2018).

Tabla 2.4: Normativa o reglamentos en el que se basa el estudio y su descripción. Fuente propia

Norma o Reglamento	Descripción
RGR 02/2017	Reglamento acerca del “Diseño y ejecución de las instalaciones fotovoltaicas conectadas redes de distribución”
IEC 60269-6:2010	Low-voltage fuses - Part 6: Supplementary requirements for fuse-links for the protection of solar photovoltaic energy systems.
IEC 60364-7-712:2002	Electrical installations of buildings - Part 7-712: Requirements for special installations or locations - Solar photovoltaic (PV) power supply systems.

<p>IEC 61557-8:2007</p>	<p>Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.</p>
<p>UNE-EN 50618-2:2015</p>	<p>Cables eléctricos para sistemas fotovoltaicos</p>
<p>NCh Elec. 4/2003</p>	<p>Instalaciones de Consumo en Baja Tensión, declarada Norma Chilena Oficial de la República mediante Decreto Supremo N° 115, de 2004, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, sus modificaciones o disposición que lo reemplace.</p>
<p>Clasificación de fallas testo en paneles solares</p>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;">  <p>Imagen infrarroja 1 Descripción: Calentamiento uniforme de un módulo en comparación con otros. Posible avería: El módulo se encuentra en circuito abierto. Posible causa: Módulo no conectado, cable mordido o roto.</p> <p>Imagen infrarroja 2 Descripción: El módulo indica un calentamiento por filas de una cadena. Posible avería: Cortocircuito de un ramal de células. Posible causa: Diodo defectuoso, por ejemplo tras una tormenta.</p> <p>Imagen infrarroja 3 Descripción: "Patrón de remiendo", en el cual células individuales están distribuidas azarosamente y notoriamente más calientes. Posible avería: Módulo completo en cortocircuito. Posible causa: Mal conectado o todos los diodos de derivación defectuosos.</p> <p>Imagen infrarroja 4 Descripción: Solo una parte de una célula está notoriamente más caliente. Posible avería: Rotura de célula. Posible causa: Daños de montaje o transporte u otro tipo de acción mecánica externa.</p> <p>Imagen infrarroja 5 Descripción: Calentamiento puntiforme o irregular. Posible avería: Grietas en la célula o formación de artefactos. Posible causa: Defectos de fabricación en caso de grietas en la célula. Sombreado debido, por ejemplo, a suciedad (excrementos de pájaros...).</p> <p>Imagen infrarroja 6 Descripción: Calentamiento de una sola célula. Posible avería: No es necesariamente un fallo. Posible causa: Sombreado o célula defectuosa.</p> </div> <p><i>Figura 2.36: Interpretación de imagen IR testo. Fuente: (TESTO AG, 2012)</i></p>

<p>Regla de factor de alza en temperaturas de testo</p>	<p>Describe la interpretación en temperaturas referentes a las alzas que podrían existir por puntos calientes o factor de suciedad: el funcionamiento normal se describe por la media de las temperaturas dentro de un panel o modulo solar interpretando que si existen puntos calientes no necesariamente pueden ser debido a fallas y pueda ser una reflexión o ensuciamiento del cristal, por otro lado si la temperatura del punto caliente o manchón supera en 10°C la media del panel se debe monitorizar y examinar. Finalmente, si el panel o sectores de este exceden 10% de las temperaturas máximas registradas por el fabricante, se encuentra en estado crítico.</p>																				
<p>ANSI/NETA ATS-2017 tabla 100.18</p>	<p>Thermographic survey suggested action based temperatura rise (international electrical testing association inc.)</p> <table border="1" data-bbox="557 863 1386 1318"> <thead> <tr> <th>NIVEL</th> <th>TEMPERATURA MEDIA</th> <th>CALIFICACIÓN</th> <th>ACCIÓN</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>a) De 1 °C a 10 °C O/A ó b) De 1 °C a 3 °C O/S</td> <td>Posible Deficiencia</td> <td>Se requiere más información</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>a) De 11 °C a 20 °C O/A ó b) De 4 °C a 15 °C O/S</td> <td>Probable Deficiencia</td> <td>Reparar en la próxima parada disponible</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>a) De 21 °C a 40 °C O/A ó > 15 °C O/S</td> <td>Deficiencia</td> <td>Reparar tan pronto como sea posible</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>a) > 40 °C O/A ó > 15 °C O/S</td> <td>Deficiencia Mayor</td> <td>REPARAR INMEDIATAMENTE</td> </tr> </tbody> </table> <p>O/A: Sobre la T ambiente O/S: Sobre la T de un cuerpo similar en condición normal</p> <p><i>Figura 2.37: criterio de diagnóstico térmico eléctrico. Fuente: thermographiccsas.com/ats2017</i></p>	NIVEL	TEMPERATURA MEDIA	CALIFICACIÓN	ACCIÓN	1	a) De 1 °C a 10 °C O/A ó b) De 1 °C a 3 °C O/S	Posible Deficiencia	Se requiere más información	2	a) De 11 °C a 20 °C O/A ó b) De 4 °C a 15 °C O/S	Probable Deficiencia	Reparar en la próxima parada disponible	3	a) De 21 °C a 40 °C O/A ó > 15 °C O/S	Deficiencia	Reparar tan pronto como sea posible	4	a) > 40 °C O/A ó > 15 °C O/S	Deficiencia Mayor	REPARAR INMEDIATAMENTE
NIVEL	TEMPERATURA MEDIA	CALIFICACIÓN	ACCIÓN																		
1	a) De 1 °C a 10 °C O/A ó b) De 1 °C a 3 °C O/S	Posible Deficiencia	Se requiere más información																		
2	a) De 11 °C a 20 °C O/A ó b) De 4 °C a 15 °C O/S	Probable Deficiencia	Reparar en la próxima parada disponible																		
3	a) De 21 °C a 40 °C O/A ó > 15 °C O/S	Deficiencia	Reparar tan pronto como sea posible																		
4	a) > 40 °C O/A ó > 15 °C O/S	Deficiencia Mayor	REPARAR INMEDIATAMENTE																		

**CAPÍTULO 3 . DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN A LA
PROBLEMÁTICA**

3.1 DATA-SHEET: PLANTA DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA “ON-GRID” UNIVERSIDAD DE TALCA

Esta sección presenta como está conformada la planta fotovoltaica a analizar, corroborando la certificación y adaptaciones correspondientes para que los datos obtenidos no sean erróneos y/o inestimados.

NATEC es el proveedor directo de Jinko solar industria China de manufactura en paneles solares.

Los módulos implementados en la planta fotovoltaica son los respectivos a la marca anteriormente mencionadas del modelo JKM460M-7RL3-V competentes en la certificación IEC 61215, IEC 61730, ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, OHSAS 14001:2007 E IEC TS 62941:2016. Categorizados como módulos de alta eficiencia.

A continuación, se presenta el diagrama de componentes y especificaciones de los paneles:

SPECIFICATIONS										
Module Type	JKM450M-7RL3		JKM455M-7RL3		JKM460M-7RL3		JKM465M-7RL3		JKM470M-7RL3	
	JKM450M-7RL3-V	JKM455M-7RL3-V	JKM460M-7RL3-V	JKM465M-7RL3-V	JKM470M-7RL3-V	STC	NOCT	STC	NOCT	STC
Maximum Power (Pmax)	450Wp	335Wp	455Wp	339Wp	460Wp	342Wp	465Wp	346Wp	470Wp	350Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	42.86V	39.20V	42.97V	39.32V	43.08V	39.43V	43.18V	39.58V	43.28V	39.69V
Maximum Power Current (Imp)	10.50A	8.54A	10.59A	8.61A	10.68A	8.68A	10.77A	8.74A	10.86A	8.81A
Open-circuit Voltage (Voc)	51.50V	48.61V	51.60V	48.70V	51.70V	48.80V	51.92V	49.01V	52.14V	49.21V
Short-circuit Current (Isc)	11.32A	9.14A	11.41A	9.22A	11.50A	9.29A	11.59A	9.36A	11.68A	9.43A
Module Efficiency STC (%)	20.04%		20.26%		20.49%		20.71%		20.93%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

Figura 3.1: Especificaciones técnicas de módulos solares. Fuente: Jinkosolar.com

En el apartado de anexos, correspondiente al anexo 1, se encuentra el esquema completo de las pruebas de laboratorio para las corrientes, voltajes y potencias nominales.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Características más relevantes (según fabricante e instalación):

- Módulos totales: 26 por sub-planta
- Inclinación: 20°
- Orientación: 21° norte
- Tipo de montaje: sobre superficie en soportes
- Superficie total: 52.2 m² pp
- módulos tipo: mono silicio
- potencia de generación: 10,4 kWp pp aprox.
- coeficiente de rendimiento total: 81,3
- irradiación: 0.9

Información medida y entregada por “Kipus solar”

3.2 CARACTERISTICAS GEOGRAFICAS Y RADIANTES

Tanto la ubicación como la inclinación de la planta es fundamental a la hora de realizar los cálculos y mediciones de potencias, voltajes y corrientes. En este caso, adicional a estos parámetros se encuentra la termografía. Es importante que se tome en cuenta la caracterización de las zonas en la irradiación que presenta.

3.2.1 Ubicación de la planta

La planta de energía fotovoltaica se sitúa en Los niches, Curicó. Específicamente dentro de la Universidad de Talca, en el kilómetro 1. Las coordenadas geográficas son: -35° latitud y -71,23° longitud, proporcionadas por el explorador solar.



Figura 3.2: Ubicación de la planta de energía fotovoltaica, Los niches, Curicó. Fuente: Explorador.mienergia.cl.

3.2.2 Recursos solares y meteorológicos

Para la ubicación de la planta solar se entregan los siguientes resultados de radiación globalizada y parámetros meteorológicos extraídos del mismo sistema del explorador solar libre respaldado por la Universidad de Chile.

LATITUD	LONGITUD	ALTURA	
-35,00°	-71,23°	212 msnm	
RADIACIÓN ANUAL			
Global Horizontal (kWh/m ² /día)	Global Inclinado 35° (kWh/m ² /día)	Directa Normal (kWh/m ² /día)	Difusa Horizontal (kWh/m ² /día)
5,05	5,39	6,64	1,14
INFORMACIÓN METEOROLÓGICA			
Frecuencia de Nubes (%)	Temperatura Ambiental (°C)	Velocidad del viento (m/s)	
19	13,9	1,8	

Figura 3.3: Información Climática de la zona. Fuente: Explorador.mienergia.cl.

Además, se presenta en la figura 3.4 la radiación globalizada horizontal en kWh/m² presente a cada mes del año 2021 como referencia a las posibles radiaciones para la muestra. Se establece

que el punto crítico para la muestra es de 500 Wh/m^2 incluyendo el factor de nubosidad, es decir, bajo este parámetro la muestra no será válida.

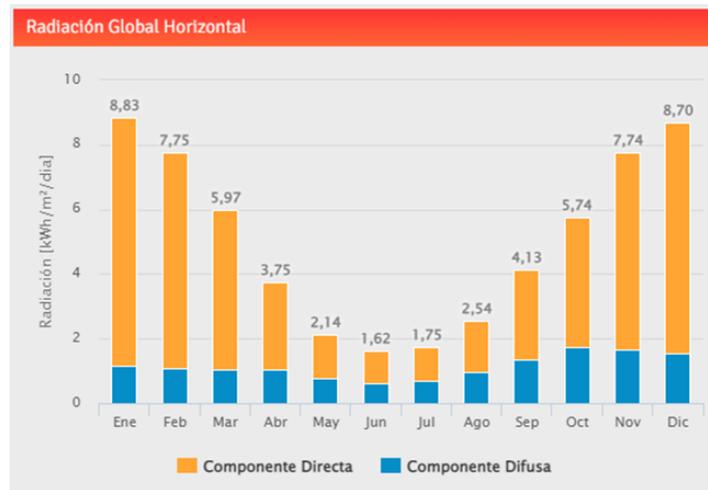


Figura 3.4: Radiación global horizontal, Los niches, Curicó. Fuente: Explorador.mienergia.cl.

3.3 APLICACIÓN DE TERMOGRAFÍA

En este apartado se da explicación y seguimiento a la metodología de aplicación de termografía a los módulos solares fotovoltaicos definiendo algunos parámetros que ayudan a la guía de redacción y examinación termográfica que dicta la norma y las recomendaciones que da el fabricante FLUKE que recoge parte de las recomendaciones de la normativa vigente.

En primer lugar, se presentan los componentes para analizar los PSFV.

- Multitester
- Cámara termográfica Fluke TI10
- Programa de análisis térmico SmartView Classic 4.4 de FLUKE

Se definieron inicialmente 5 muestras completas de la planta para posteriormente analizar 2 paneles específicos con un factor de soiling en 5 muestras más y especificar el funcionamiento y daño que produce.

Para poder tomar cada muestra se define un parámetro estándar de una **radiación mínima de muestra de $500 \frac{W}{m^2}$** acorde a la curva de generación eléctrica con respecto a la radiación.

Para poder anticipar la radiación durante la muestra se acude al medio comunicativo de la página tutiempo.net que proporciona una aproximación en la radiación para la localidad de Curicó en

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

cada hora del día con un pronóstico de 15 días. Los datos son tomados de la misma WMO (Organización Meteorológica Mundial). Además, se refutan de la recolección de datos de: AEMET, NOAA, NASA, OMM y NWS.

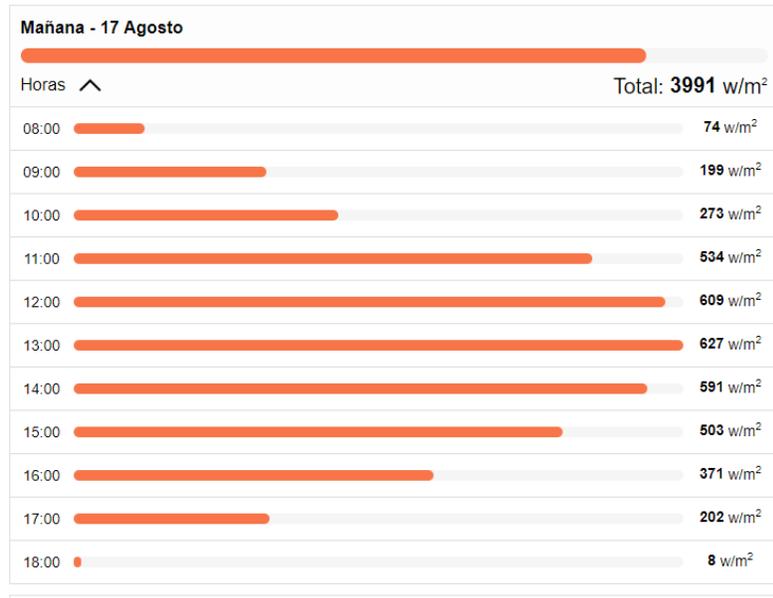


Figura 3.5: Ejemplo para pronóstico de radiación solar. Fuente: Tutiempo.net

Como es sabido los pronósticos suelen tener cierto rango de inexactitud, es por ello, por lo que al momento de la muestra y análisis de los PSFV se recolectan datos de la estación meteorológica de Curicó ubicada en la calle Freire y proporcionada por la página web www.redmeteo.cl que a pesar de ser una red extraoficial muestra datos minuto a minuto tanto de temperatura, viento, radiación, humedad y presión barométrica. El conjunto de red muestra que está formado por 62 estaciones a lo largo de Chile con calibración anual, por lo tanto, los datos son fiables para un estudio. El operador de la estación es Francisco Zúñiga.

Los datos son extraídos a la hora exacta de muestreo abarcando una gráfica de radiación solar al momento y velocidad del viento, además de la temperatura ambiente. A continuación, se muestra una imagen de la gráfica de radiación solar para ejemplificar la exactitud de los datos con la hora de muestreo además de la velocidad del viento.

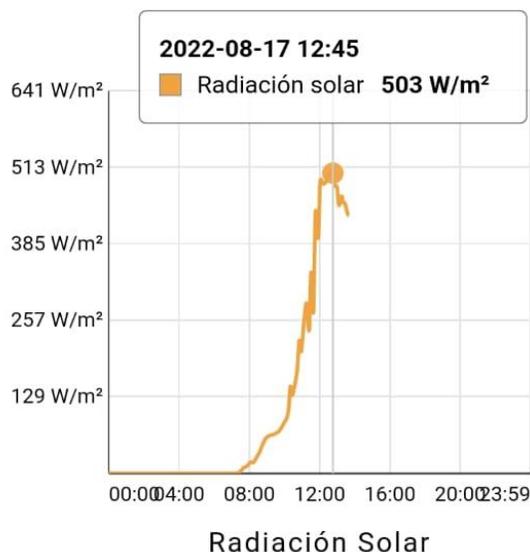


Figura 3.6: Radiación solar minuto a minuto. Fuente: Redmeteo.cl



Figura 3.7: Parámetros de muestreo minuto a minuto. Fuente: Redmeteo.cl

3.3.1 Nomenclatura de referencia para paneles solares

Para establecer un orden de lectura tanto para la IR como para el análisis de resultado se establece nomenclatura para la planta de generación eléctrica de la universidad de Talca, la que se descompone en dos grandes sub-plantas que cada una tiene un total de 26 placas solares conectadas en serie. La primera sub-planta se situada más al sur referente a la ubicación geográfica. Se nombra con el numero 1 y cada uno de sus 26 paneles enumerados de izquierda a derecha y desde arriba hacia abajo (vista siempre desde enfrente del panel) acompañan al número de la sub-planta. Ejemplo; si queremos ubicar el módulo de la sub-planta 1 que esta más a la derecha y arriba se puede numerar como panel 1-13. En la figura a continuación se ve gráficamente el ejemplo. Del mismo modo es la lectura de la sub-planta 2.



Figura 3.8: Nomenclatura para los paneles solares. Fuente Propia

Para las tomas termo gráficas y cumplimiento de las normativas vigentes que redactan el correcto uso de cámaras termo gráfica, además de las recomendaciones que emplea el fabricante de FLUKE, no se superan los 30° de ángulo que genera la Cámara en relación con la superficie de los paneles solares tomando en cuenta que la inclinación de estos es de 20°. Una vez calibrada y establecida una emisividad se procede a la captación de las temperaturas de cada módulo en un horario específico en dónde la radiación supere los 500 Watt por metro cuadrado. Una vez analizado cada uno de los paneles se crea un barrido más en profundidad para la toma directa de la temperatura de cada celda obviamente respetando el punto de enfoque y distancia mínima que es permitido. El barrido consiste en captar solo a aquellos puntos que denoten una alta temperatura o una variación de temperatura de interés para el estudio. La imagen 3.10 muestra cómo se genera el barrido.

Esquemáticamente la sub-planta 1 seria de la forma de la ilustración 3.9. Destacando que la sub-planta numero 2 consta de los mismos módulos fotovoltaicos.

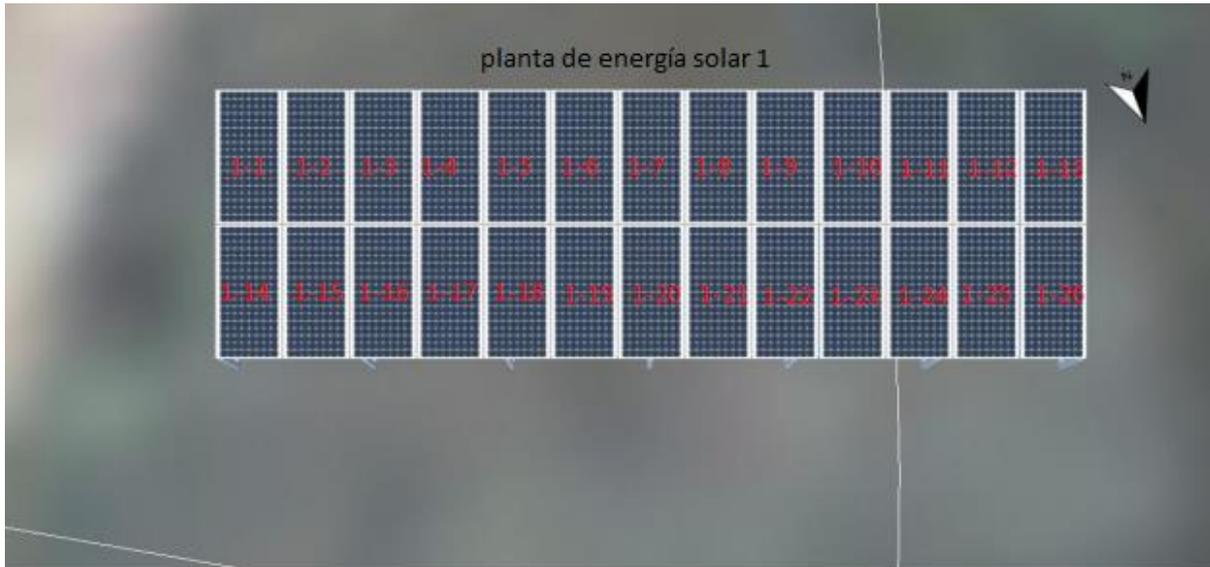


Figura 3.9: Esquematización de la sub-planta 1. Fuente: propia



Los cuadros representan la forma en que se crea el barrido por secciones tomando dirección de izquierda a derecha en todo el panel hasta completarlo y encontrar algún punto que demuestre interés o estrés térmico.

Figura 3.10: Barrido térmico para la detección de fallas. Fuente: propia

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Si el barrido detecta algo en la IR se toma la captura para su posterior análisis en el programa y establecer parámetros. Cuando se habla de alguna variación de temperatura o cambio de coloración en la paleta de colores de la cámara es cuando se presenta posibles fallas que puede presentar un alza de 4° C o una falla incipiente que sobrepasa la media de la temperatura general en 10°C. Además, se toma inmediatamente el voltaje y corriente en corto circuito que está generando el panel en falla dejando registro de estos valores.

Por otra parte, se analizan 2 paneles independientes, estos dos paneles en el barrido no pueden presentar ningún problema ya que se consideran como paneles sanos para comparación. Para ello se definen en las 5 primeras muestras como sanos.

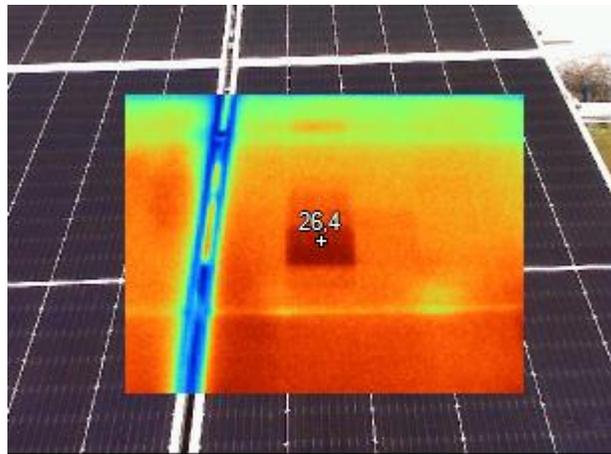


Figura 3.11: Ejemplo de barrido con falla célula. Fuente propia.

3.3.2 Metodología de la aplicación de la termografía

Esta sección describe el uso de la termografía y la aplicación en el sistema de generación eléctrica para sus correspondientes muestreos y posterior análisis. Como se menciona anteriormente las muestras se dividirán en dos agrupaciones específicas: la primera consta de generar muestreo de todos los paneles termo gráficamente hablando para determinar si en alguno de ellos existe una alza de temperatura por puntos, sector o células correspondiente con lo planteado según la normativa o guía del fabricante. Cada una de estas muestras se revisan al instante para generar el barrido correspondiente a ese placa fotovoltaica, en el caso de que presente un claro defecto se procede a tomar la corriente de generación individual del mismo y también su voltaje para compararlo con paneles pares que estén en correcto orden termográfico y analizar posteriormente la influencia del alza de temperaturas con el rendimiento de este.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Además, como se menciona anteriormente las placas 2-14 y 2-15 son las bases para la comparativa dado que en cada muestreo estas son desconectadas para la toma de los parámetros eléctricos referenciales (estas placas jamás deben tener defectos térmicos o quedarían invalidadas como referentes).

Es importante establecer y recordar que el Angulo de incidencia para la muestra por normativa y recomendación de testo en de 30° de inclinación desde la cara frontal del panel con la cámara termográfica. Además, se calcula con el punto focal de la cámara para la distancia de muestra adecuada representada con la siguiente formula con la ecuación 20. Considerando que la cámara flukeTi10 posee una apertura radial de 2,5 mrad

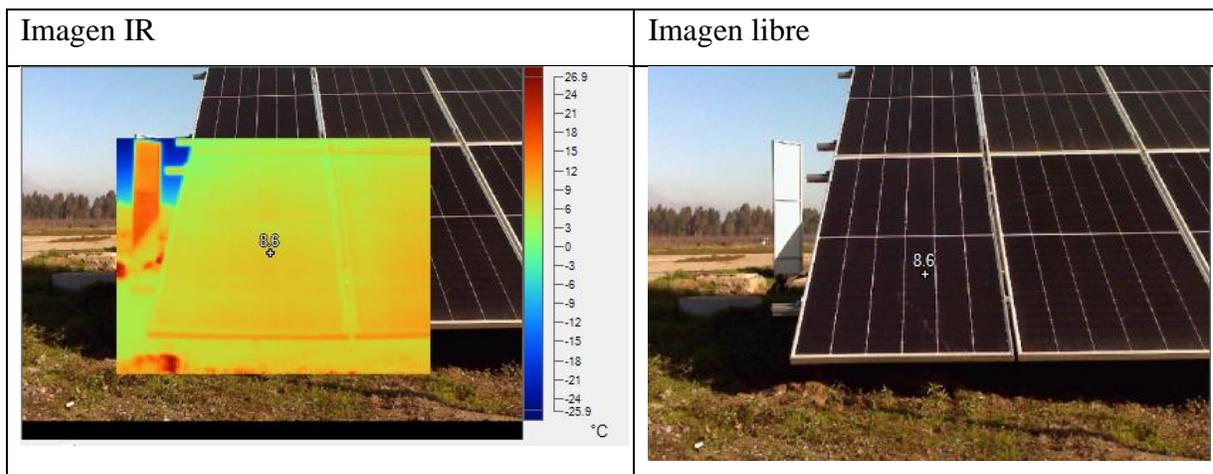
$$IFOV_{meas} \approx 3 \times 2,5 = 7,5$$

Es decir, la temperatura medible a precisión del objeto más pequeño a 1metro de distancia es la 7,5 pixeles. Dado que se está tomando una distancia de 3 metros desde los paneles a la cámara no existiría ningún problema con la veracidad de las temperaturas.

Esta proporción se explica en el anexo 2.

A continuación, se muestra la IR de uno de los módulos de muestreo térmico en contraste con su imagen real, específicamente el panel 2-14

Tabla 3.1: Comparativa imagen limpia y de irradiación térmica. Fuente propia



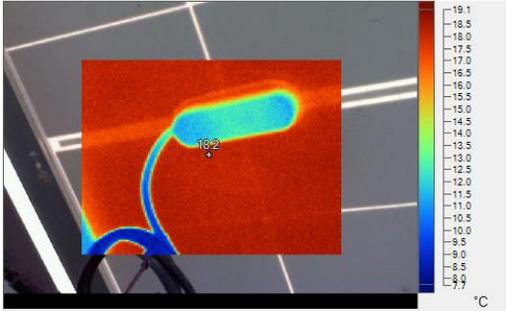
Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Se recuerda que en la ilustración 3.11 se ejemplifica un problema en una de la células de un panel solar de tal forma que se le debe tomar la correspondiente medición de generación el energía al mismo.

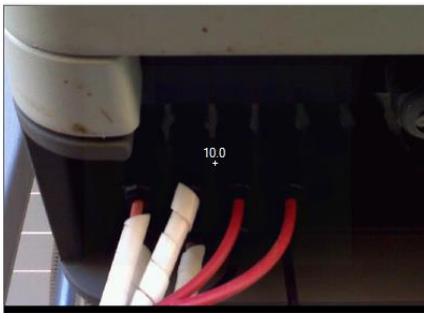
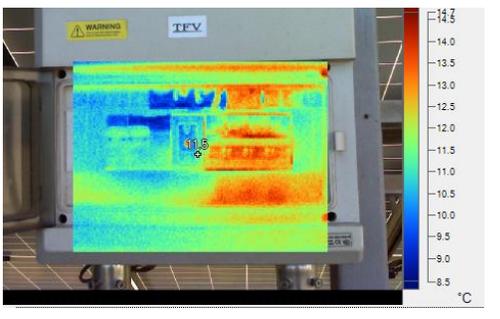
Por la parte eléctrica se pueden encontrar 3 muestras fundamentales: la primera es la medición y comparación de medidas de temperatura que presentan los interruptores de fase que son por lo general los que mantienen la mayor carga térmica por corriente eléctrica, además de ser termo interruptores los cuales actúan gradualmente con la corriente y temperatura generada como medio de seguridad. En segundo lugar, se encuentran las entradas y salidas de los conectores a cada panel fotovoltaico. Y en tercer lugar a los conectores directos al inversor. Para ello se toma en cuenta el sistema de la normativa ANSI/NETA ATS-2017 con referencia de la temperatura ambiente y cuerpos similares. Esta dicta que se debe comparar las temperaturas de los puntos eléctricos con sus pares o con la temperatura ambiente, se destaca la implicancia del factor de riesgo respecto a la tabla de la figura 2.37.

La tabla a continuación muestra la comparativa de los elementos mencionados en imagen térmica y limpia.

Tabla 3.2: Comparativa imágenes IR y limpias para conectores e interruptores. Fuente propia

Imagen IR	Imagen limpia	Elemento
		Conectores de entrada y salida a paneles solares

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

		<p>Conectores de invector</p>
		<p>Interruptores TFV</p>

Cada uno de los elementos eléctricos son medidos en conjunto a las muestras determinando un periodo muestral ideal.

La segunda parte del estudio consta ya en interpretar el valor y la influencia del soiling o ensuciamiento dentro de dos paneles de prueba que son concordantemente los 2-14 y 2-15. La razón es que ya se encuentran estudiados con los valores nominales y con rendimientos pautados, es decir, la base de datos anterior en conjunto con determinar el impacto en la totalidad de la planta por efecto de la temperatura también es la contraparte del paso dos del estudio, en comparativa con lo que se realizara para la determinación del ensuciamiento y sus valores de eficiencia.

La metodología de esta sección consiste en tres mediciones específicas a los módulos mencionados siendo el primero la medición de temperatura y factor de potencia al módulo cuando ha transcurrido un periodo determinado sin ninguna limpieza en el cristal, es decir, se encuentra de forma totalmente natural. El segundo consiste ya en aplicar al panel un espolvoreado parcial de aproximadamente 50% de su superficie simulando un soiling más agresivo y una forma descuidada de mantenimiento. Es importante destacar que no se puede medir exactamente la cantidad de polvo, tierra y arena que constituirá la simulación ya que por

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

su inclinación tiende a bajar todo a la parte inferior del panel, de todas formas, se consideran 350 gramos de polvo para cada uno de los dos paneles de forma que se trata de mantener lo mejor posible toda esta cantidad sobre la placa, también debe ser de forma uniforme. Es por ello por lo que se opta por tener una simulación más apegada a la realidad y cubrir parcialmente el panel.

Finalmente, una vez realizada las dos pruebas anteriores, se procede a una limpieza total del panel y comparar su funcionamiento en un modo natural, abrasivo, y totalmente limpio. Obviamente las mediciones son hechas a la misma hora con la misma cantidad de radiación solar y velocidad del viento tratando de ser lo más rápido por prueba para que no exista variaciones en ninguno de los puntos anteriores. De la misma forma se deben cumplir los requerimientos de muestra que se presentaron para la primera parte, y sea la inexistencia de difusión, presencia de humos, una mínima de $500 \frac{W}{m^2}$ etc.

A continuación, se presentan las imágenes en una tabla de los anteriormente mencionado destacando la presencia microscópica de partículas en los paneles.

Tabla 3.3: Comparativa de los 3 modos de soiling del estudio. Fuente propia.

Ensuciamiento natural		
-----------------------	---	---

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

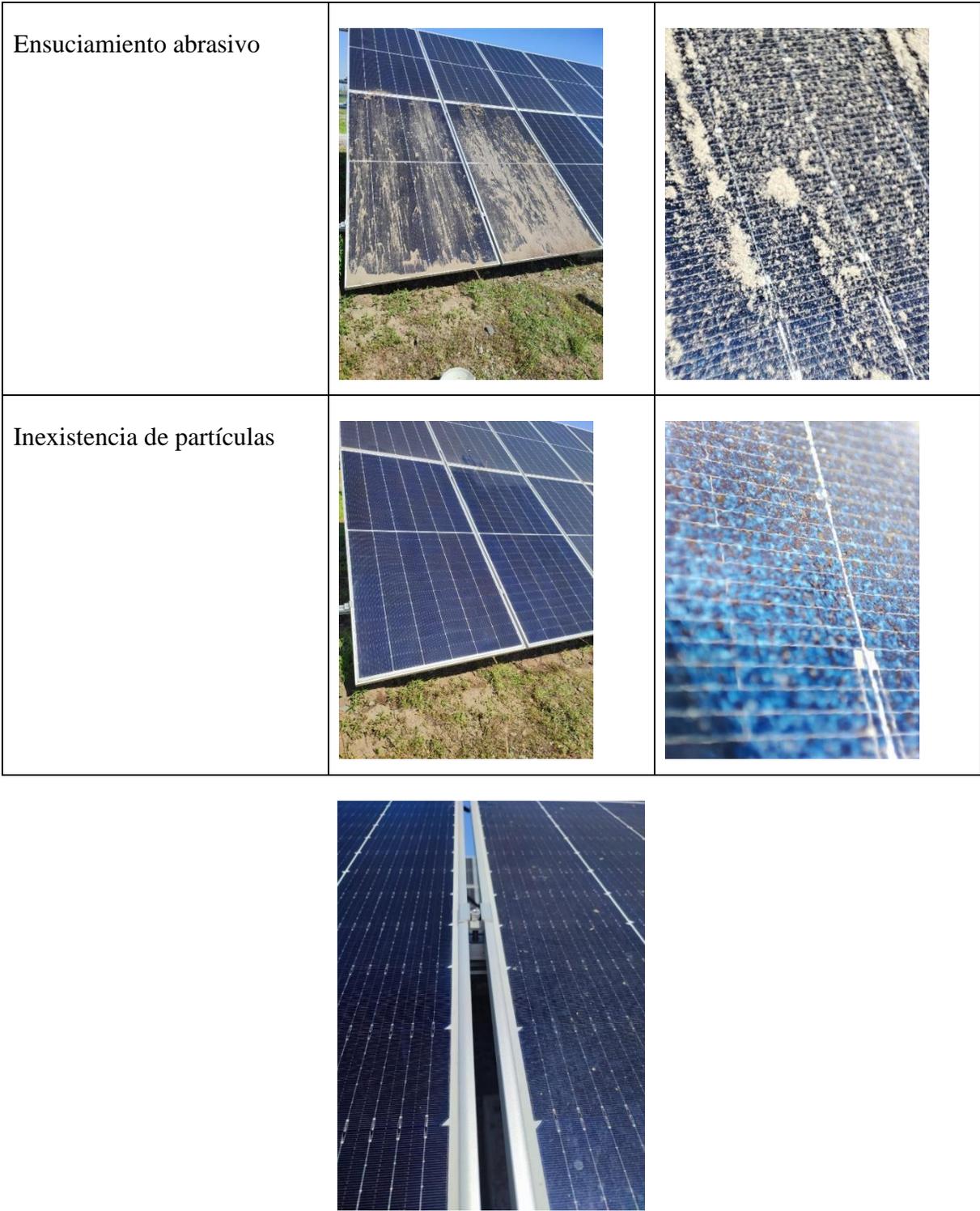
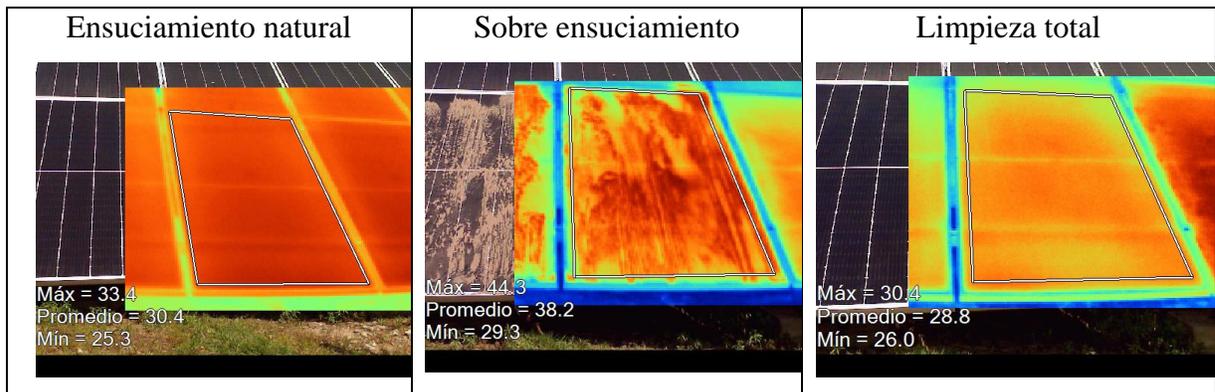


Figura 3.12: comparativa panel limpio total con panel de 1 semana de ensuciado natural sin presencia de lluvia. Fuente propia.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Ahora bien, la siguiente figura da una ejemplificación muestral de los cambios de temperatura en los diferentes casos presentados anteriormente validando preliminarmente como afecta el soiling a los paneles solares en relación con el aumento de la temperaturas.

Tabla 3.4: Comparativa de temperaturas en paneles solares, ejemplo de muestra clasificado en panel con ensuciamiento natural, sobre ensuciado, y completamente limpio respectivamente de izquierda a derecha. Fuente propia.



3.4 RESULTADOS DE LA PRIMERA PARTE DEL ESTUDIO (MUESTRAS)

Anteriormente se expone la metodología de aplicación de la termografía y sus respectivos parámetros para lograr resultados congruentes y aplicables a un análisis.

Este apartado declara los resultados de la primera parte del del estudio, es decir, la base de datos de todos los paneles solares que conforman la planta en su totalidad (52 paneles totales). Es importante destacar que a partir de los resultados se generan informes técnicos con los detalles de cada día y cada muestra

En primer lugar, se declaran los parámetros generales del informe en la tabla ejemplificadora 3.5.

Tabla 3.5: Datos generales de las muestras 1-7. Fuente propia.

Tipo de equipo	Planta fotovoltaica	Instrumentos de medición	Fluke TI10 Heme analyst 2060 (multi- tester)
Ubicación	Universidad de Talca, Curicó. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	-40°C ~+85°C
Emisividad (ϵ)	0.9	Unidades de temperatura	°C
Módulos totales	26 por sub-planta (52 total)	NOCT	45 ± 2°C

Luego para cada una de las muestras se establecen los parámetros que relacionan el día con la muestra, es decir, todas las variables que pueden afectar la muestra y sus factores.

Y de forma inmediata se presentan las tablas con las temperaturas medias, máximas y numero de la muestra en su forma de imagen IR para ser analizadas de forma más detallada.

Tabla 3.6: Ejemplo de datos de muestra 1. Fuente propia.

DATOS DE MUESTRA

Muestra N°1			
Fecha de muestra	02-08-22	Temp. Pronostico	11° C @ 1 pm
Hora de la muestra	13:00 hrs	Temp. Muestra	11.3 °C
Radiación pronostico	559W/m2@1pm	Velocidad de viento	15km/h
Radiación de muestra	531.5 W/m2	Horómetro inversor	5575hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

N° PANEL	TEMP. PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	N° PANEL	TEMP. PROM	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-1	2,9	9,1	150	2-1	4,3	8,1	178
1-2	7	10,2	151	2-2	7,6	12,7	179
1-3	7,7	11,7	152	2-3	8,7	13,8	180
1-4	8	11,9	153	2-4	6,9	11,6	181
1-5	7,5	11,7	154	2-5	7,3	11,9	182
1-6	9	12,5	155	2-6	7,2	12,7	183
1-7	9,2	13,3	156	2-7	6,2	11,9	184
1-8	9,7	13,3	157	2-8	6,4	11,5	185
1-9	8,7	12,3	158	2-9	8,1	12,7	186
1-10	9,1	13,4	159	2-10	8,2	13,2	187
1-11	9,7	13,3	160	2-11	7,5	12,4	188
1-12	9,6	14	161	2-12	8,6	13,4	189
1-13	9,7	13,6	162	2-13	8,7	13,6	190
1-14	9,6	13,1	163	2-14	7,1	10,3	191
1-15	10,4	12,7	164	2-15	9,3	12,9	192
1-16	11,7	14,2	165	2-16	9,1	12,7	193
1-17	12	12,1	166	2-17	9,3	13	194
1-18	12,1	14,3	167	2-18	9,9	13,5	195
1-19	11,5	14,2	168	2-19	9,5	13,1	196
1-20	12,1	14,1	169	2-20	10	13,7	197
1-21	12,1	14,3	170	2-21	9,6	12,8	198
1-22	12,4	14,7	171	2-22	10,3	14,2	199
1-23	12,9	15,2	172	2-23	9,4	13,5	200
1-24	12,8	15,3	173	2-24	10,7	14,7	201
1-25	13,7	16,3	174	2-25	10,6	13,9	202
1-26	13,9	16,7	175	2-26	13,1	15,7	203

Figura 3.13: Tabla con valores muestra 1. Fuente propia.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

BARRIDOS				
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	
1-14	8,2	12,1	204	
1-15	3,7	7,5	205	
1-16	11,2	15,4	206	
1-17	11,9	15,2	207	
1-18	10,7	13,4	208	

Figura 3.14: tabla de datos de barridos en la muestra 1. Fuente propia.

Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)	
2-14	51,7	8,6	444,62	
2-15	51,7	8,8	454,96	

Figura 3.15 información eléctrica de los paneles sanos en muestra 1. Fuente propia

Finalmente se presenta una tabla más completa con comentarios y valores obtenidos para cada uno de los barridos en los cuales se encontraron posibles fallas. Los comentarios son referentes a datos de análisis preliminares. No son los comentarios de análisis ingenieril, pero aportan a ello.

Tabla 3.7: Barridos pautados con información técnica (ejemplo de muestra 1). Fuente propia.

IMAGEN IR	IMAGEN CORRIENTE	DATOS Y OBSERVACIONES
		<p>Panel 1-14</p> <p>Amperaje: 8.73 A</p> <p>Voltaje: 51 V</p> <p>Potencia: 445.23 W</p> <p>Obs: no se supera lo estandarizado como máximo en los puntos más calientes, se comprueba hermeticidad en correcta forma.</p>
		<p>Panel 1-19</p> <p>Amperaje: 8.2 A</p> <p>Voltaje: 49.3 V</p> <p>Potencia: 404.26 W</p> <p>Obs: El punto caliente marcado es producto de un montículo de fecas de</p>

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

		<p>ave, no afecta el rendimiento y es mínimo el punto.</p> <p>Panel 1-4</p> <p>Amperaje: 7.96 A</p> <p>Voltaje: 49.3 V</p> <p>Potencia: 392.4 W</p> <p>Obs: El punto caliente marcado es producto de un montículo de tierra, no afecta el rendimiento.</p>
		<p>Panel 1-24</p> <p>Amperaje: 8.2 A</p> <p>Voltaje: 51.5 V</p> <p>Potencia: 422.3 W</p> <p>Obs: La celda presenta mayor temperatura que la media, pero no supera lo estandarizado (+10° sobre media). No presenta mucho polvo</p>
		<p>Panel 2-24</p> <p>Amperaje: 7.99 A</p> <p>Voltaje: 50 V</p> <p>Potencia: 399.5 W</p> <p>Obs: La celda no presenta exceso de temperatura, pero si una distinción. Se observa polvo modular</p>

En el apartado de anexo 3 se presentan el resto de las mediciones e imágenes referentes al programa FLUKE Completando la serie de muestras de la primera parte e indicado como informe térmico 1.

3.5 RESULTADOS DE LA SEGUNDA PARTE DEL ESTUDIO (MUESTRAS)

En esta sección se presentan los resultados del estudio que define las pruebas del soiling o ensuciamiento en los paneles solares recordando que son específicamente los nombrados como 2-14 y 2-15. Al igual que la sección anterior se presentan en formato del informe que se declara en forma anexa.

En primer lugar, se establece los parámetros generales que al igual que la sección anterior puede son los de la tabla 3.5.

Luego se toman los valores de la muestra individual de ese día en específico tomando en cuenta los parámetros que se han mostrado anteriormente en las demás muestras.

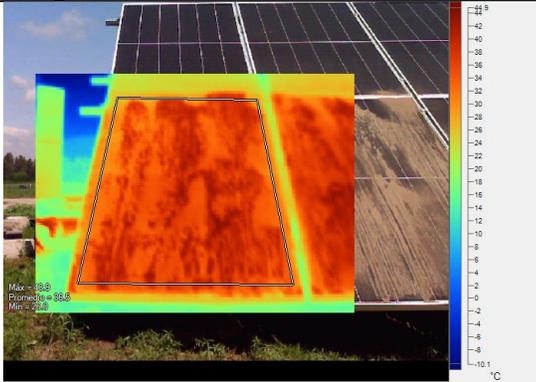
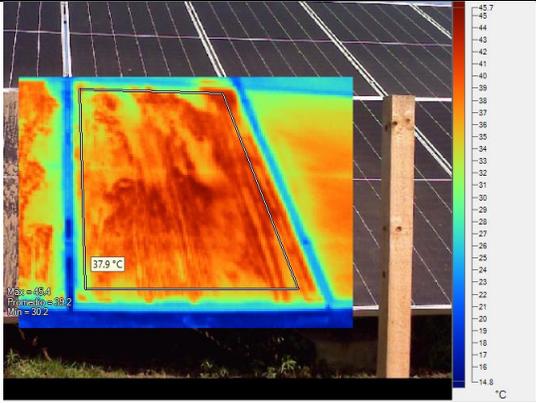
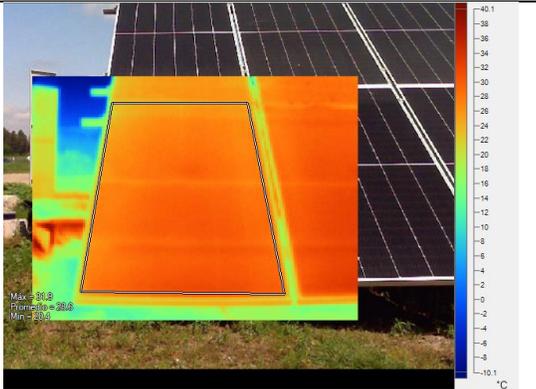
Tabla 3.8: muestra soiling 2 ejemplo. Fuente Propia

DATOS DE MUESTRA soiling 2			
Muestra N°9			
Fecha de muestra	2-09-22	Temp. Pronostico	15° C @ 1:30 pm
Hora de la muestra	1:45 pm	Temp. Muestra	14.1 °C
Radiación pronostico	650W/m2@1:30pm	Velocidad de viento	1 km/h
Radiación de muestra	635 W/m2	Horómetro inversor	6144hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

En este caso se exceptúan las tablas ya que los datos son menores, pero de mayor o igual importancia que las muestras de la primera parte. Las tablas con las imágenes a continuación se adjudican a los 3 tipos de modos para el estudio del efecto del ensuciamiento en los paneles solares, además, se destaca la respuesta eléctrica que tiene para su posterior análisis en profundidad.

Tabla 3.9: Tabla de muestra soiling 2 con parámetros eléctricos. Fuente propia

Imagen IR	Imagen libre	Datos
		<p>N° Panel: 2-14 Modo: soiling abrasivo Amp: 6.6 A Volt: 49.4 V Poten: 326.04 W Temp. Max: 43.9°C Temp. Media: 36.5°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15 Modo: soiling abrasivo Amp: 4.31 A Volt: 49 V Poten: 211.19 W Temp. Max: 45.4°C Temp. Media: 39.2°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14 Modo: soiling natural Amp: 10.15 A Volt: 50.2 V Poten: 509.53 W Temp. Max: 31.9°C Temp. Media: 28.6°C</p>

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

		<p>N° Panel: 2-15 Modo: Soiling natural Amp: 10.12 A Volt: 50.1 V Poten: 507 W Temp. Max: 32.9°C Temp. Media: 30°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14 Modo: Limpio total Amp: 11.2 A Volt: 49.8 V Poten: 557.76 W Temp. Max: 30.8°C Temp. Media: 28.3°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15 Modo: Limpio total Amp: 10.95 A Volt: 50.1 V Poten: 548.6 W Temp. Max: 30.8°C Temp. Media: 29.2°C</p>

Como adicional en esta sección 2 de la segunda parte de la muestra se toman también las temperaturas expuestas por los tres sistemas eléctricos a revisar, siendo ellos los vistos en la tabla 3.2. Esta vez se analiza con el programa para calcular el punto de mayor temperatura. Es importante destacar que la emisividad en estos sistemas es de $\epsilon = 0.95$ y también las temperaturas nominales y máximas de trabajo son independientes que se declaran en los informes técnicos.

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

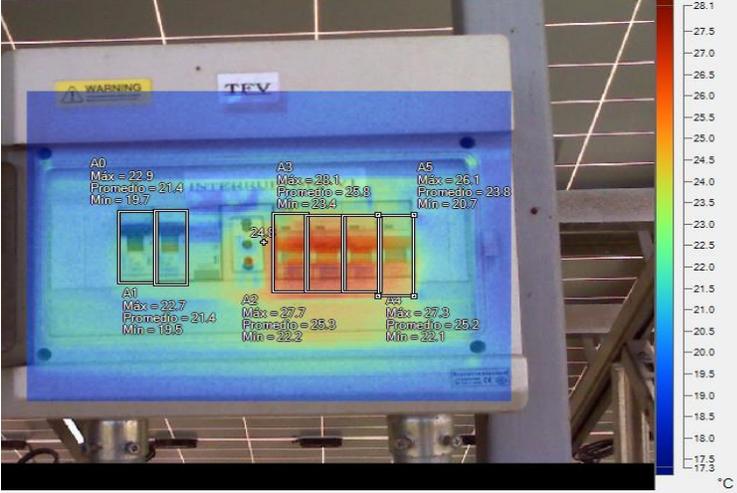
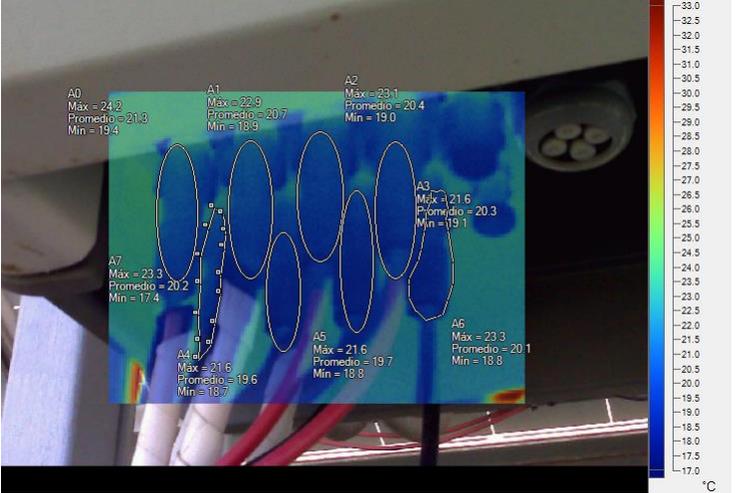
Otro punto aclarar es que, para los conectores a cada panel se consideró solo tomar el dato siempre que existiera una variación por sobre 2° en conectores de los pares, es decir, aplicando la normativa ISO/NETA 2017 y los datos respectivos del fabricante que menciona que podía variar hasta 2 °C mientras que la normativa declara una deficiencia por sobre 4°C. De todas formas, jamás se presentó una variación de 3 °C por lo que los registros se encuentran en excelentes condiciones para este elemento y solo es mencionado como método de chequeo para su futura planeación de mantenimiento. (continuidad de la muestras en anexo 4).

Tabla 3.10: Especificaciones de datos de elementos eléctricos. Fuente propia

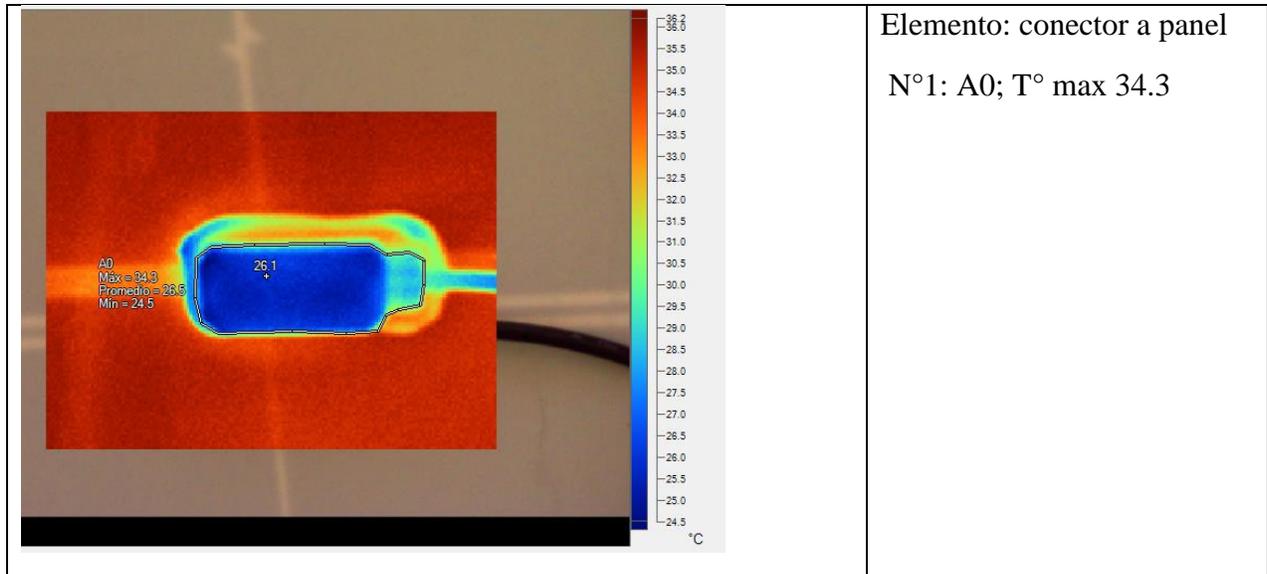
Tipo de equipo	Elementos eléctricos	Instrumentos de medición	Fluke TI10
Ubicación	Universidad de Talca, Curicó. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	Disyuntores: hasta 40°C Cableado: 4mm 70°C Conectores: no especificado
Emisividad (ε)	0.95	Unidades de temperatura	°C
Elementos totales	104 conectores a paneles, 6 disyuntores y 8 cables de inversor		

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática

Tabla 3.11: Ejemplificado de muestra en elementos eléctricos. Fuente propia.

Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos																																				
 <p>The image shows an infrared thermal scan of a circuit breaker. A color scale on the right indicates temperatures from 17.3°C (blue) to 28.1°C (red). Six points are marked with boxes and labeled A0 through A5. A0 is at the top left, A1 and A2 are in the middle left, A3, A4, and A5 are in the middle right. The data for each point is as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Max (°C)</th> <th>Promedio (°C)</th> <th>Min (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A0</td> <td>22.9</td> <td>21.4</td> <td>19.7</td> </tr> <tr> <td>A1</td> <td>22.7</td> <td>21.4</td> <td>19.9</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>27.7</td> <td>25.3</td> <td>22.2</td> </tr> <tr> <td>A3</td> <td>28.1</td> <td>25.8</td> <td>23.4</td> </tr> <tr> <td>A4</td> <td>27.3</td> <td>25.2</td> <td>22.1</td> </tr> <tr> <td>A5</td> <td>26.1</td> <td>23.8</td> <td>20.7</td> </tr> </tbody> </table>	Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)	A0	22.9	21.4	19.7	A1	22.7	21.4	19.9	A2	27.7	25.3	22.2	A3	28.1	25.8	23.4	A4	27.3	25.2	22.1	A5	26.1	23.8	20.7	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° max 22.9°C</p> <p>N°2: A1; T° max 22.7°C</p> <p>N°3: A2; T° max 27.7°C</p> <p>N°4: A3; T° max 28.1°C</p> <p>N°5: A4; T° max 27.3°C</p> <p>N°6: A5; T° max 26.1 °C</p>								
Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)																																		
A0	22.9	21.4	19.7																																		
A1	22.7	21.4	19.9																																		
A2	27.7	25.3	22.2																																		
A3	28.1	25.8	23.4																																		
A4	27.3	25.2	22.1																																		
A5	26.1	23.8	20.7																																		
 <p>The image shows an infrared thermal scan of an inverter. A color scale on the right indicates temperatures from 17.0°C (blue) to 33.0°C (red). Eight points are marked with boxes and labeled A0 through A7. The data for each point is as follows:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Max (°C)</th> <th>Promedio (°C)</th> <th>Min (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A0</td> <td>24.2</td> <td>21.3</td> <td>19.4</td> </tr> <tr> <td>A1</td> <td>22.9</td> <td>20.7</td> <td>18.9</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>23.1</td> <td>20.4</td> <td>19.0</td> </tr> <tr> <td>A3</td> <td>21.6</td> <td>20.3</td> <td>19.1</td> </tr> <tr> <td>A4</td> <td>21.6</td> <td>19.6</td> <td>18.7</td> </tr> <tr> <td>A5</td> <td>21.6</td> <td>19.7</td> <td>18.0</td> </tr> <tr> <td>A6</td> <td>23.3</td> <td>20.1</td> <td>18.8</td> </tr> <tr> <td>A7</td> <td>23.3</td> <td>20.2</td> <td>17.4</td> </tr> </tbody> </table>	Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)	A0	24.2	21.3	19.4	A1	22.9	20.7	18.9	A2	23.1	20.4	19.0	A3	21.6	20.3	19.1	A4	21.6	19.6	18.7	A5	21.6	19.7	18.0	A6	23.3	20.1	18.8	A7	23.3	20.2	17.4	<p>Elemento: conectores a inductor</p> <p>N°1: A0; T° max 24.2°C</p> <p>N°2: A1; T° max 22.9°C</p> <p>N°3: A2; T° max 23.1°C</p> <p>N°4: A3; T° max 21.6°C</p> <p>N°5: A7; T° max 23.3°C</p> <p>N°6: A4; T° max 21.6 °C</p> <p>N°6: A5; T° max 21.6 °C</p> <p>N°6: A6; T° max 23.3 °C</p>
Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)																																		
A0	24.2	21.3	19.4																																		
A1	22.9	20.7	18.9																																		
A2	23.1	20.4	19.0																																		
A3	21.6	20.3	19.1																																		
A4	21.6	19.6	18.7																																		
A5	21.6	19.7	18.0																																		
A6	23.3	20.1	18.8																																		
A7	23.3	20.2	17.4																																		

Capítulo 3. Desarrollo de la solución a la problemática



Elemento: conector a panel

N°1: A0; T° max 34.3

CAPÍTULO 4 . ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 CÁLCULOS PREVIOS DE ANÁLISIS

En este apartado previo al análisis concluyente del estudio se demuestran partes de la teoría del funcionamiento y relación entre las corrientes y voltajes teóricos con los expresados en la toma de muestras.

4.1.1 Cálculo de las eficiencias

El factor de forma esta dado por la ecuación 7 y con los datos del fabricante se expresa de la siguiente manera:

$$FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{43.08 \cdot 10.68}{51.7 \cdot 11.5} = 0.7738$$

De esta forma se puede calcular una eficiencia teórica a partir de los resultados obtenidos en las muestras, es decir, relacionando los elementos prácticos con la teoría. La ecuación 18 dicta:

$$ET = \frac{FF \cdot Vocm \cdot Iscm}{G \cdot area}$$

Si se aplica un ejemplo con un valor de voltaje abierto de 45 V y una corriente de 10 A en una celda solar completa de área 2.25 m^2 con un día a radiación solar de $600 \frac{W}{m^2}$, se expresaría de la siguiente manera.

$$ET = \frac{0.7738 \cdot 45 \cdot 10}{600 \cdot 2.25} = 0.283 \approx 25.7\%$$

Ahora bien, se declara que existe una diferencia de irradiaciones las cuales se ajustan con la variación de corriente en relación con la temperatura diferencial que existe entre la normativa STC y la temperatura de la celda real expresada en la ecuación 19. Por lo tanto, los valores teóricos se podrían expresar bajo la siguiente ejemplificación tomando en cuenta que *el fabricante brinda la un factor de corrección por temperatura en corriente de +0.048%/°C.*

Ejemplo para una corriente en corto de 10 A

$$E_e = \frac{10 \cdot 1000}{10.4 \cdot [1 + 0.00048 \cdot (40 - 25)]} = 954.66 \frac{w}{m^2}$$

Capítulo 4. Análisis de resultados

De acuerdo con el modelo planteado se puede expresar la potencia máxima corregida como se muestra en la ecuación 20. Permitiendo relacionar directamente la potencia con los cambios de temperatura que se presenta en las células solares. ***El fabricante, en este caso este caso declara un factor de corrección de -0.350 %/°C⁻¹.***

De esta forma reemplazando la ecuación la potencia máxima para el ejemplo anterior es de

$$P_{max} = \frac{954.66}{1000} * 460 * (1 - 0.0035 * (40 - 25)) = 416.08 W$$

4.1.2 En relación con la primera sección de muestras

Como se dicta anteriormente las primeras 5 muestras fueron una base de datos para determinar la severidad y comportamiento de los paneles solares en general de la planta a estudiar obteniendo los resultados del apartado anterior. En cada muestra existía alteraciones en algún modulo referente a las temperaturas o imágenes mostradas por la cámara térmica, una vez analizada cada imagen y obtenida los valores de corriente y voltaje generadas tanto por los supuestos módulos en falla como los módulos de estándares o sanos. Es importante recordar que a partir de la muestra 1 se consideran módulos sin limpieza extraordinario, es decir, solo por efectos naturales como lluvias o viento.

Para el análisis en primer lugar se obtienen las curvas I-V para las muestras 1,2 y 4 debido a la radiación variable que presentaron.

Para poder crear las curvas fue necesario aplicar la corriente en corto circuito y el voltaje en circuito abierto como referentes a los extremos de la curva. además, para encontrar los puntos medios y poder trazar la curva se utiliza la ecuación de adaptabilidad exponencial en corriente.

$$I = i_0 \left[\exp \frac{qV}{nkT} - 1 \right] - i_l$$

Donde

q: es la carga de electrón (1.6^{-19})

k: constante de Boltzmann (1.38^{-23})

n: coeficiente de relación 1

i_l : corriente inducida por luz (efecto práctico = $5e-20$)

Capítulo 4. Análisis de resultados

La ecuación anterior es derivable presentando la curva teórica de I-V en relación con el voltaje y corriente práctica para los puntos donde ambos se hacen 0.

Para facilitar la obtención de dichos datos se utiliza Matlab con el código preestablecido del Ingeniero Héctor Hugo Torres Ortega que se encuentra en el anexo 4.

La curva teórica obtenida ejemplificada se muestra en la imagen

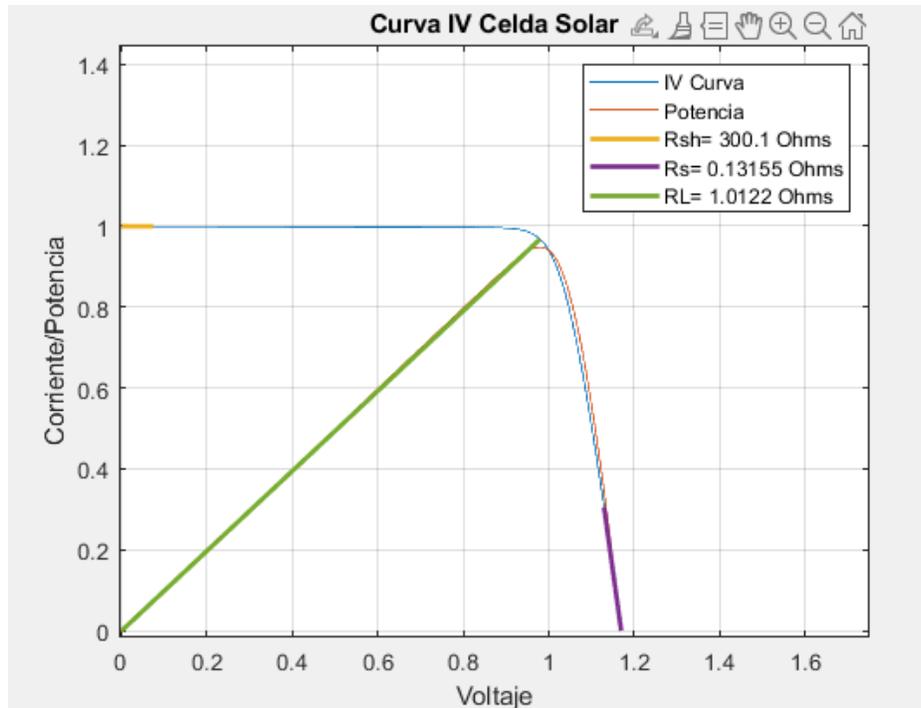


Figura 4.1: Gráfico de la curva I-V y Potencia para ejemplo de 1 voltio. Fuente propia

Por lo tanto, para cada uno de los 3 ejemplos presentados se obtienen las siguientes tablas:

Tomando en cuenta que los paneles analizados fueron los 2-14 y 2-15.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.1: Valores de intensidad para curva I-V muestra 1 panel 2-14. Fuente propia.

muestra 1				
volt	AMP	watt/m2	potencia	volt porc
51,7	0	531		0
50	1,11		444,62	39,809
48	2,66			
47	3,66			
45	5,4			
40	8,15			
35	8,5			
30	8,6			
20	8,6			
16	8,6			
9	8,6			
7	8,6			
0	8,6			

Tabla 4.2: Valores de intensidad para curva I-V muestra 2 panel 2-14. Fuente propia.

muestra 2				
volt	AMP	watt/m2	potencia	Volt Porc.
50,7	0	586		0
50	0,8		482,664	39,039
48	3,22			
47	4,2			
45	6			
40	9,1			
35	9,52			
30	9,52			
20	9,52			
16	9,52			
9	9,52			
7	9,52			
0	9,52			

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.3: Valores de intensidad para curva I-V muestra 4 panel 2-14. Fuente propia.

muestra 4					
volt	AMP	watt/m2	potencia	volt porc	
52,2	0	503		0	0
50	1,6		465,624	40,194	
48	3,22				
47	4,23				
45	5,86				
40	8,5				
35	8,9				
30	8,92				
20	8,92				
16	8,92				
9	8,92				
7	8,92				
0	8,92				

Cada caso muestral se ve representado en las curvas correspondientes al gráfico 4.1, además, se aprecia el punto de potencia máximo y la intersección de la curva que reclama el área de potencia real de aprovechamiento.

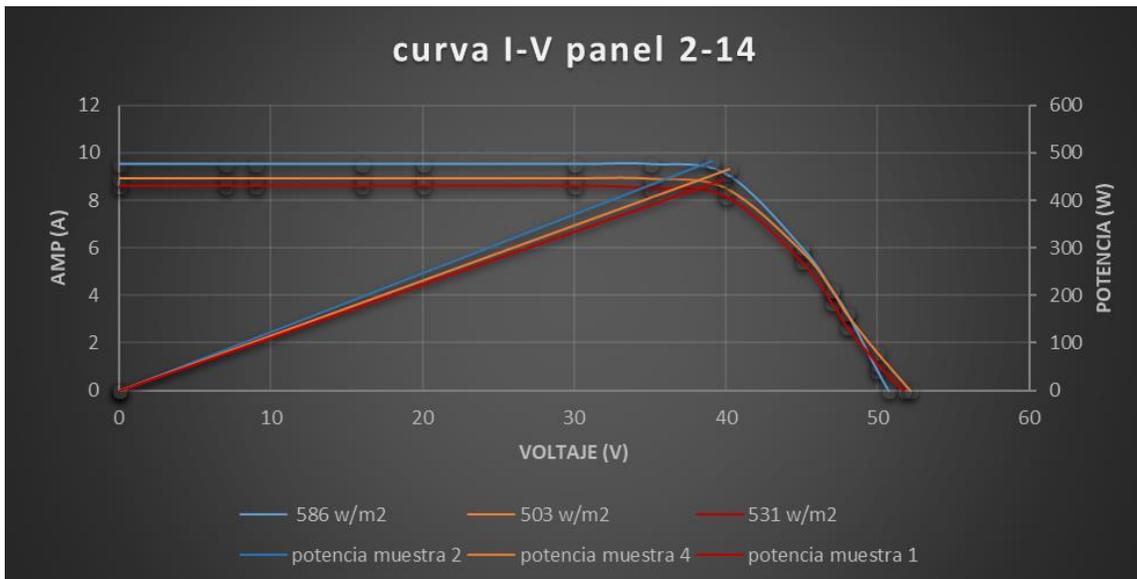


Gráfico 4.1: Comparativa de las muestras 1, 2 y 4 en relación con las curvas I-V. Fuente propia

Capítulo 4. Análisis de resultados

De la misma forma se obtienen las tablas de resultados de intensidad para el panel 2-15 en las mismas muestras.

Tabla 4.4: Valores de intensidad para curva I-V muestra 1 panel 2-15. Fuente propia

muestra 1					
volt	amp	watt/m2	potencia	volt porc	
51,7	0	531		0	0
50	1,13		454,96	39,809	
48	2,33				
47	3,56				
45	5,54				
40	8,14				
35	8,7				
30	8,7				
20	8,8				
16	8,8				
9	8,8				
7	8,8				
0	8,8				

Tabla 4.5: Valores de intensidad para curva I-V muestra 2 panel 2-15. Fuente propia

muestra 2					
volt	amp	watt/m2	potencia	volt porc	
50,9	0	586		0	0
50	0,9		483,55	39,193	
48	3,25				
47	4,33				
45	6,11				
40	9,22				
35	9,51				
30	9,52				
20	9,52				
16	9,52				
9	9,52				
7	9,52				
0	9,5				

Capítulo 4. Análisis de resultados

Tabla 4.6: Valores de intensidad para curva I-V muestra 4 panel 2-15. Fuente propia

muestra 4					
volt	amp	watt/m2	potencia	volt porc	
52,5	0	503		0	0
50	1,2		469,875	40,425	
48	3,21				
47	4,31				
45	5,96				
40	8,66				
35	8,9				
30	8,92				
20	8,92				
16	8,92				
9	8,92				
7	8,92				
0	8,95				

Finalmente, se muestra el grafico 4.2 en el cual se plasman las curvas I-V para el módulo 2-15.

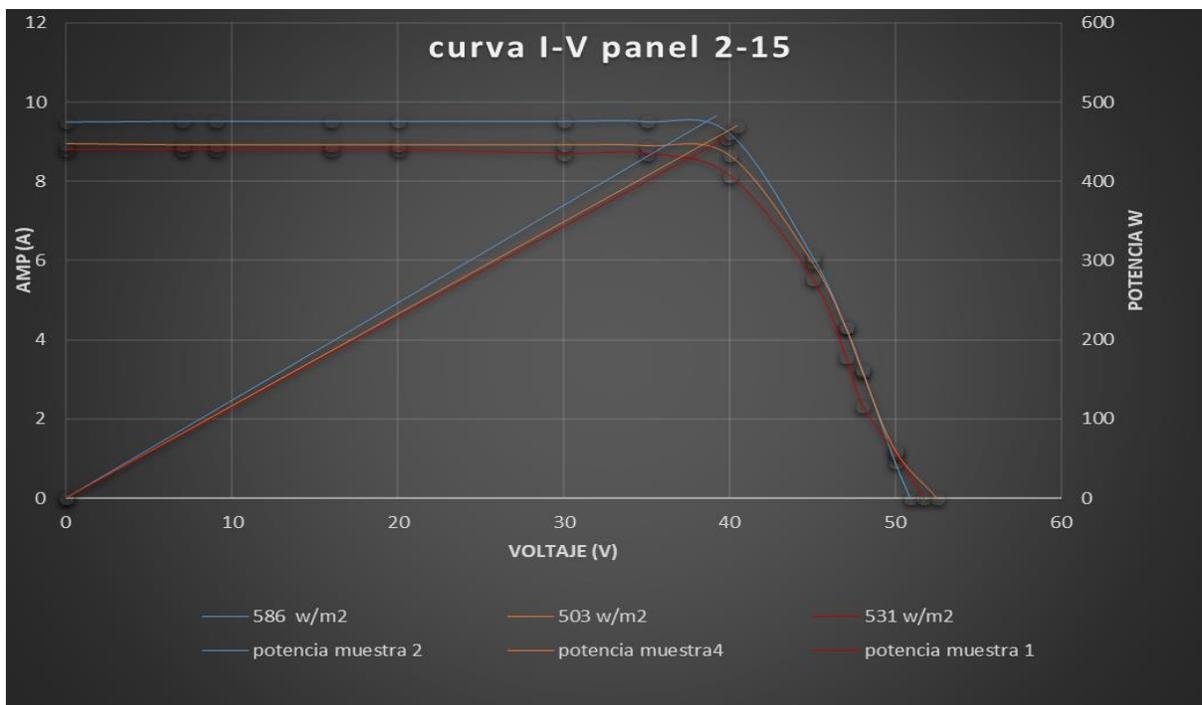


Gráfico 4.2: Comparativa de las muestras 1, 2 y 4 en relación con las curvas I-V panel 2-15.

Fuente propia

Capítulo 4. Análisis de resultados

Si se analiza preliminarmente los gráficos 4.1 y 4.2 se observa una clara tendencia a lo racional con respecto a los gráficos presentados por el fabricante para radiaciones similares, a pesar de que la curva sea teórica, los valores de voltaje abierto y corriente en corto representan una clara magnitud de la referencia del potencial real que se puede aprovechar dado que los valores mencionados son reales de las muestras. Esto quiere decir, que los rendimientos son adecuados de forma preliminar al soiling y solo observando los resultados de la curva, estos pueden variar con respecto casos fortuitos o las mismas muestras posteriores, sobre todo en el caso de un soiling abrasivo.

4.1.3 Comparativa de efectividad en barridos con respecto a eficiencia en las primeras 5 muestras.

Ya se estableció una relación consecuente de las muestras más importantes con diferentes radiaciones demostrando que es factible una comparativa con los paneles que en hipótesis se encuentran con fallas. Esta hipótesis dicta que, dada la situación que un panel se encuentre con un punto de alta temperatura o incluso una temperatura general más alta, su rendimiento bajaría y se comprobaría que la termografía es el cimiento para la detección de la falla o bajo rendimiento, sin embargo, siempre se declara que la falla puede ser por diversas causas y con intermitencias. Por ello, en este apartado se muestran los resultados específicos para la comparativa de los casos de sospecha de falla con los paneles 2-14 y 2-15 que presentan un comportamiento más regular y adecuado, es decir, tomados como paneles sin fallas. Es importante recordar que ya aquí se aplica la regla del 77% de efectividad de la potencia real aprovechada que menciona el fabricante, por tanto, las nuevas tablas se presentan a continuación representado en porcentaje de ineficiencia comparados al promedio de potencia entregado por los panes sanos.

Tabla 4.7: muestra 1 de barridos analizados. Fuente propia

BARRIDOS muestra 1								
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	Volt (v)	amp´(a)	Potn (W)	potn real (W)	% inef
1-14	8,2	12,1	204	51	8,73	445,23	342,8271	76%
1-15	3,7	7,5	205	49,3	8,2	404,26	311,2802	69%
1-16	11,2	15,4	206	49,3	7,96	392,428	302,16956	67%
1-17	11,9	15,2	207	51,5	8,2	422,3	325,171	72%
1-18	10,7	13,4	208	50	7,99	399,5	307,615	68%

Capítulo 4. Análisis de resultados

Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)	potn real (W)	prom p
2-14	51,7	8,6	444,62	342,3574	449,79
2-15	51,7	8,8	454,96	350,3192	

Tabla 4.8: muestra 2 de barridos analizados. Fuente propia

BARRIDOS muestra 2								
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	Volt (v)	amp' (A)	Potn (W)	potn real (W)	% inef
2-25	30,1	32,8	262	49,9	8,05	401,695	309,3052	83%
2-23	29,1	31,7	263	50,9	8,85	450,465	346,8581	93%
2-19	29,4	32,1	264	50,9	9,6	488,64	376,2528	101%
Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)	poten real (W)	prom p			
2-14	50,7	9,52	482,664	371,6513	371,9924			
2-15	50,9	9,5	483,55	372,3335				

Las tablas 4.7 y 4.8 son referentes de las muestras 1 y 2 en relación con los parámetros descritos en la sección anterior de resultados obtenidos. El resto de las muestras se puede encontrar en el apartado de anexo 5.

Efectivamente se comprueba la hipótesis inicial que aludía a una ineficiencia por parte de los paneles que se sospechan con fallas. Testo en la figura 2.36 aconseja y sugiere diferentes fallas para las distintas tomas térmicas, pero no habla de las ineficiencias que podrían acompañar esas fallas. En ambas tablas se observa que a pesar de que la temperatura máxima en cada caso no supera los 10°C de diferencia con respecto a paneles sanos (ver resultado de muestras) si muestra pérdidas significativas pero que en la práctica no son permanentes ya que en cada caso no mostraban siempre un patrón prefijo de paneles con problemas, es decir, no existía coincidencias entre una muestra y la otra. Es por ello, por lo que el problema se categoriza como falla fortuita, que puede deberse principalmente a la concentración de polvo específico en un lugar, otra opción es que presenten células más sensibles a temperaturas y ya dependería del estado del silicio entre ellas o de la estructura cristalina de los mismos. Se descartan grietas superficiales o daño por fluctuación de temperatura ya que presentaría un desnivel visible la célula o incluso polvo por debajo del cristal, además, la falla sería permanente y no fortuita.

Para clarificar el estado comparativo, si se toma la primera muestra de la tabla 4.8 el panel 1-14 muestra que: la potencia aprovechada es un 76% del promedio de las potencias entregadas en

Capítulo 4. Análisis de resultados

los paneles 2-14 y 2-15. Se puede aceptar hasta un 5% de diferencia debido a que a lo máximo puede existir un intervalo de 5 min entre la toma de corrientes y voltajes entre cada uno de los paneles considerando que siempre se toman en un pick máximo de radiación que muestra cambios a partir de los 20 min para una curva de entre 500 a 600 $\frac{W}{m^2}$ también considerando el estado de ensuciamiento que pueda existir entre uno y otro. No obstante, una diferencia de 24% en rendimientos en estados similares es una pérdida demasiado alta considerando que el rendimiento promedio de los paneles de por sí ya es bastante bajo, rondando los 20%.

Otro punto para mencionar es la relación que existe entre una sobre eficiencia como es el ejemplo de la muestra 2 panel 2-19 que presenta un 1% más que el promedio de sus pares de referencia, esto no es mayormente relevante en ámbitos de rendimiento, pero si representa que para ese ejemplo el alza de temperatura como lo muestra la cámara térmica no es más que un cambio en el promedio de las temperaturas máximas en relación con el promedio aritmético.

El análisis anterior muestra que se debe tener especial cuidado con las imágenes IR ya que, el cambio en la coloración de esta no siempre mostrará una falla, por eso es importante mantener un análisis posterior para no cometer el error de encasillar una falsa falla con una falla real.

Para finalizar la primera parte de análisis concluir previamente que en primera instancia la hipótesis se comprueba exitosamente y se alude y sustenta la opción de revisiones térmicas con periodos determinados para detección de fallas en la planta.

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1.4 Segunda parte de muestras en soiling

En primer lugar, es importante recalcar que el apartado de anexo 3 sección 2 muestra todos los datos obtenidos reales de las muestras del estudio en soiling para cada caso y día de muestra, además de la información de radiación y factores influyentes mencionados a lo largo del estudio. En base a los resultados obtenidos por cada muestra en ensuciamiento que tuvieron los paneles se analiza los datos con el ajuste térmico correspondiente a las ecuaciones presentadas en la primera parte del presente capítulo y aplicando el factor de forma que indica la teoría de relaciones en efectividad. La tabla ejemplificadora 4.9 de análisis de la muestra 1 en soiling muestra la totalidad de los resultados, de los cuales el factor más importante es la eficiencia corregida que representa la eficiencia real de aprovechamiento en función de la temperatura de la células o de la placa, por otro lado, la eficiencia real que se muestra en la tabla es el factor de forma que se aplica a la potencia obtenida en relación con la potencia de entrada y salida.

Tabla 4.9: Información de muestra 1 en soiling a 7 días para cada estado. Fuente propia

Estado ensuciamiento natural 7 días															
panel	radiación W/m ²	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	corrección rad	corrección P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2--14	635	1:30	14,1	1	33,7	30,3	50,2	10,15	509,53	392,3381	880,369	306,04233	27,5%	27,6%	21,4%
2--15	635	1:30	14,1	1	31,5	28,3	50,1	10,12	507,012	390,39924	878,6083	307,60866	27,3%	27,5%	21,5%
Estado de ensuciamiento abrasivo															
panel	radiación W/m ²	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	corrección rad	corrección P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2--14	635	1:30	14,1	1	44	33,9	49,4	6,6	326,04	251,0508	571,4717	196,11005	17,6%	17,7%	13,7%
2--15	635	1:30	14,1	1	31,5	28,3	49	4,31	211,19	162,6163	374,1899	131,00725	11,4%	11,4%	9,2%
Estado limpio total															
panel	radiación W/m ²	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	corrección rad	corrección P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2--14	635	1:30	14,1	1	29,5	25,9	49,8	11,02	548,796	422,57292	957,8471	338,20074	29,6%	29,7%	23,7%
2--15	635	1:30	14,1	1	29,6	25,4	50,1	10,95	548,595	422,41815	951,9911	336,72319	29,6%	29,7%	23,6%

En relación con las temperaturas se muestran los siguientes gráficos (4.3 y 4.4 para temperaturas máximas, 4.5 y 4.6 para temperaturas medias) que demuestra claramente que las temperaturas aumentan radicalmente con el estado de ensuciamiento de los paneles. Los paneles analizados (2-14 y 2-15) fueron tratados de la misma forma y medidos casi a la par, sin embargo, existe una clara inclinación del cambio térmico que presenta un estado más abrasivo. También se

Capítulo 4. Análisis de resultados

destaca el hecho que los días de influencia del polvo natural en relación con una limpieza en los paneles es fundamental, ya que, la primera muestra se hizo con un ensuciado natural de 7 días (se limpia previamente a la muestra 1 de soiling) y la segunda con 7 días de diferencia, la tercera con 6 días, la cuarta solo 1 día y la quinta con 5 días. Si se relacionan las curvas es evidente que a mayor cantidad de día es más significativo el cambio exceptuando la última muestra en la cual se considera un cambio debido a la prueba de agua, el panel se limpia con agua permitiendo un secado natural resultado que el agua también presenta una alza de temperaturas en los paneles actuando como un potenciador o efecto lupa. Obviamente la temperatura se toma cuando se encuentra seco debido a que si se toma húmedo o con residuos de agua este produce un falso espectro electromagnético en la cámara.

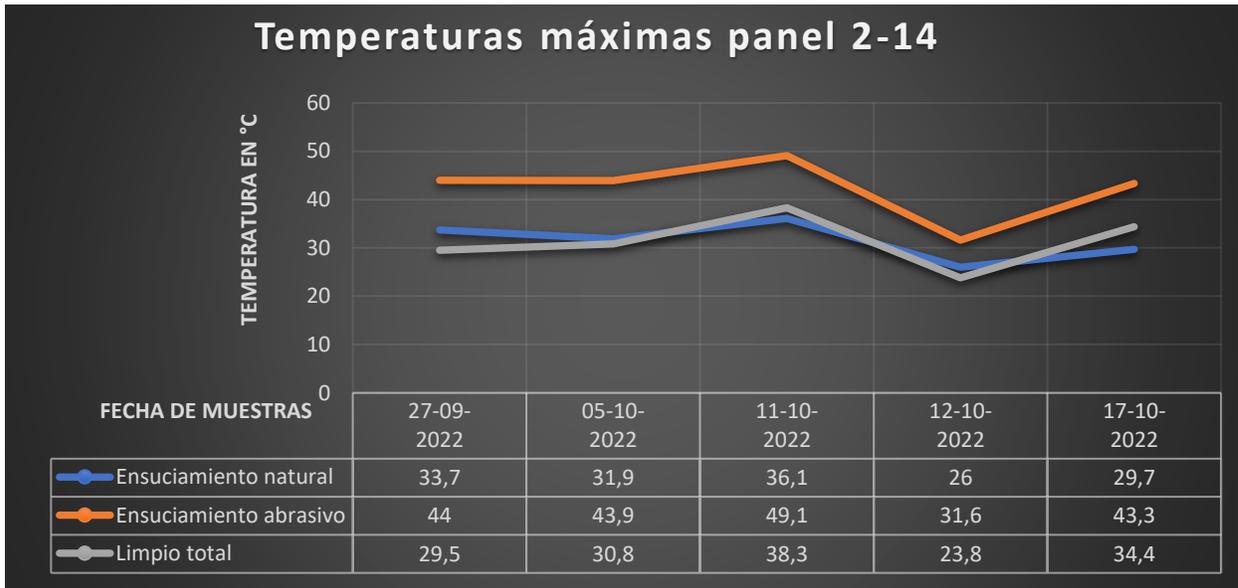


Gráfico 4.3: Temperaturas máximas en panel 2-14 para muestras soiling. Fuente propia

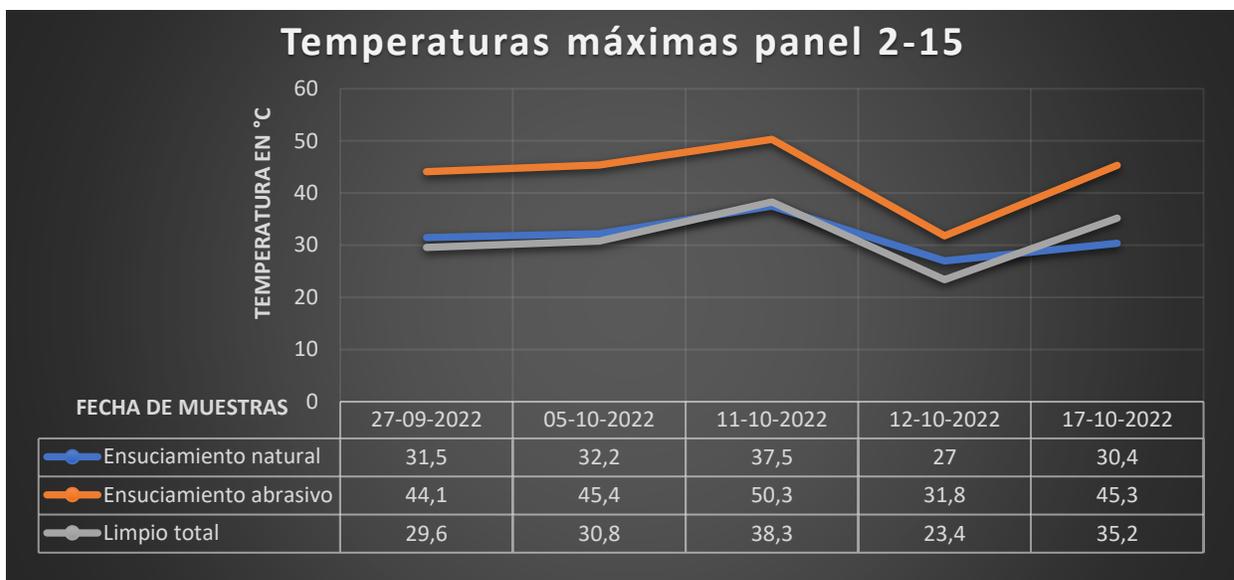


Gráfico 4.4: Temperaturas máximas en panel 2-15 para muestras soiling, Fuente propia

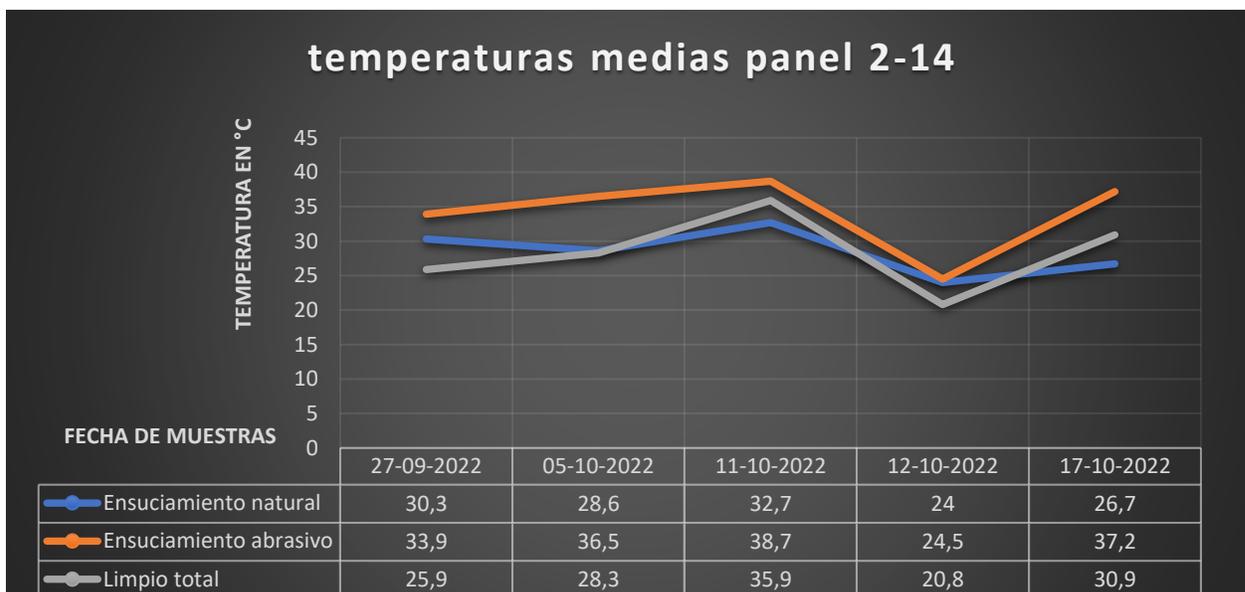


Gráfico 4.5: Temperaturas medias panel 2-14 para muestras soiling. Fuente propia

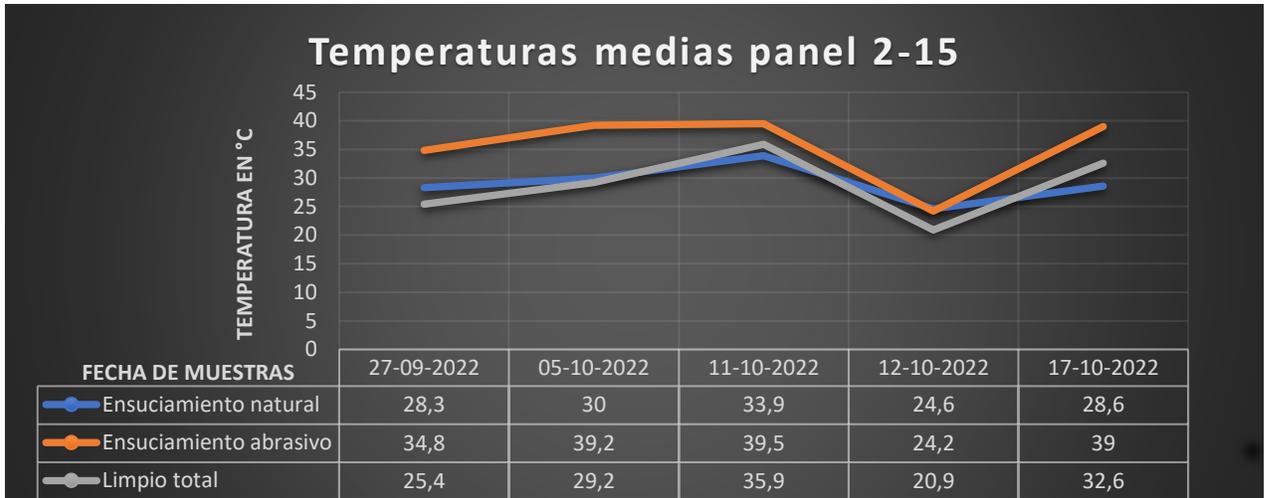


Gráfico 4.6: Temperaturas medias panel 2-15 para muestras soiling. Fuente propia

Por otra parte, la comparativa de voltajes y amperajes se muestran en los siguientes gráficos compuestos en la figura 4.2

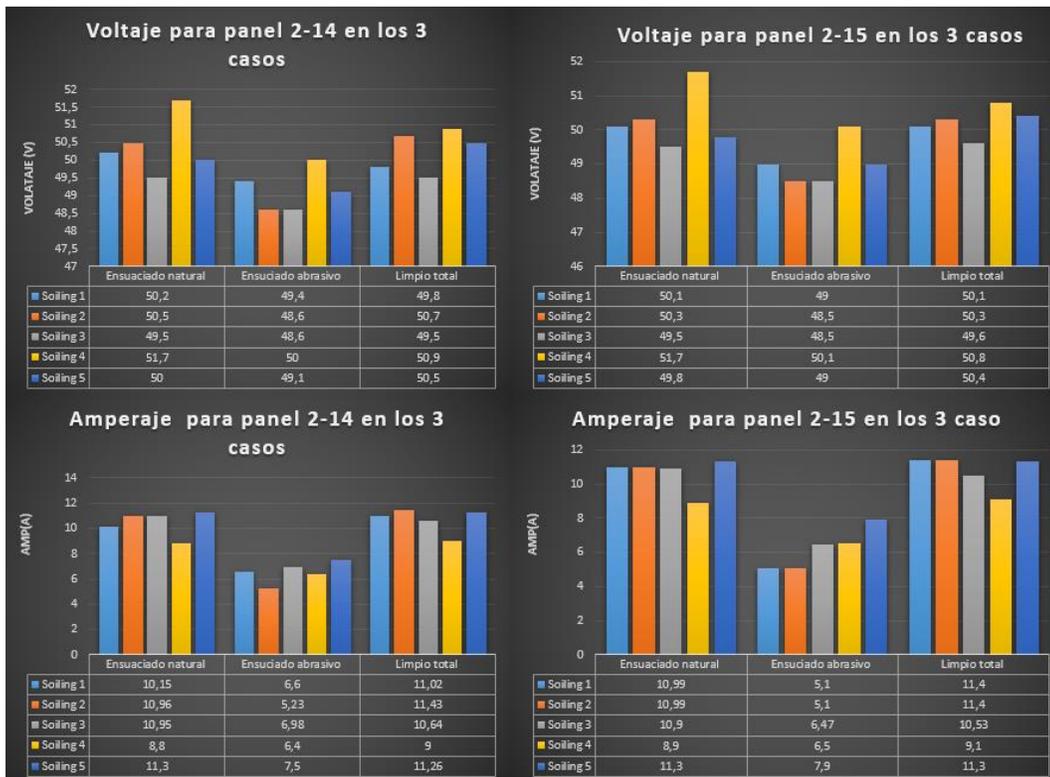


Figura 4.2: Gráficos de voltajes y amperajes para cada caso en soiling. Fuente propia

Capítulo 4. Análisis de resultados

Se rescata que la influencia del voltaje es mucho menor en el caso de la contaminación por polvo que el amperaje, esto es parte del fundamento que tiene los paneles solares que; a mayor potencia lumínica mayor sería la excitación en los electrones produciendo mayor excitación en las bandas de cada módulo variando así ampliamente, es por ello que cuando pasa una nube y se está midiendo el amperaje emitido por el panel solar, esta medida decae rápidamente y vuelve a su estabilidad una vez se despeje el cielo en cambio el voltaje es el reflejo de la conexión interna de la células.

Para resumir el total de las muestras, los gráficos de barras 4.7 y 4.8 muestran las relaciones de efectividad por cada muestra, es decir, una comparativa más visual de los rendimientos por seccionado de ensuciado natural, abrasivo y panel limpio total.

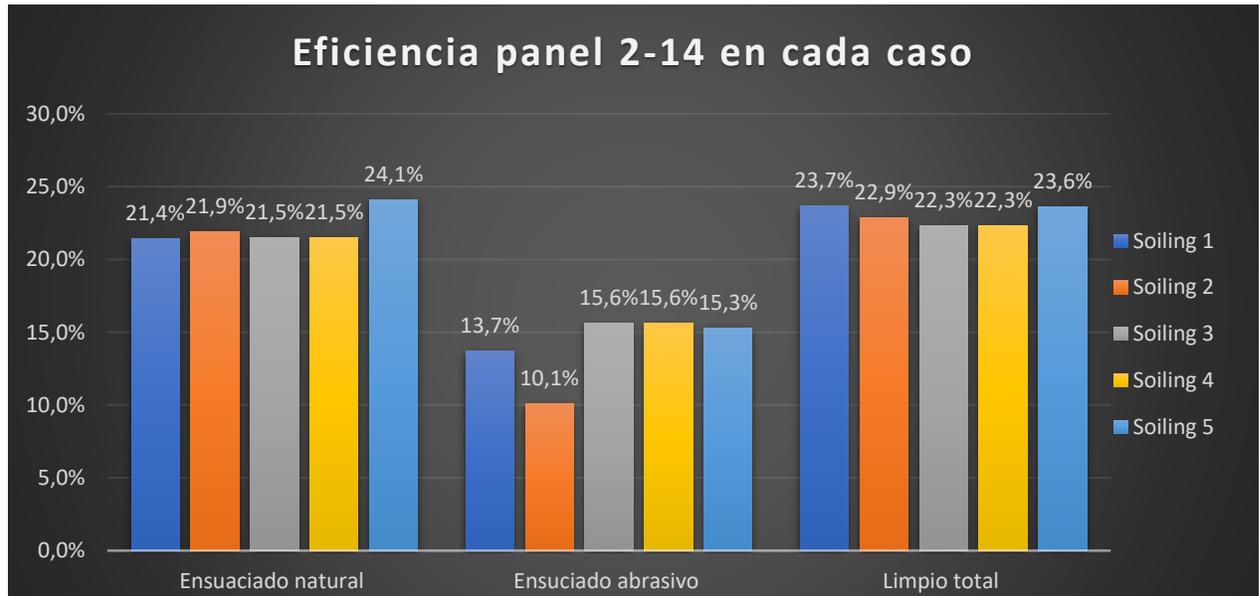


Gráfico 4.7: Eficiencias por cada caso en todas las muestras panel 2-14. Fuente propia

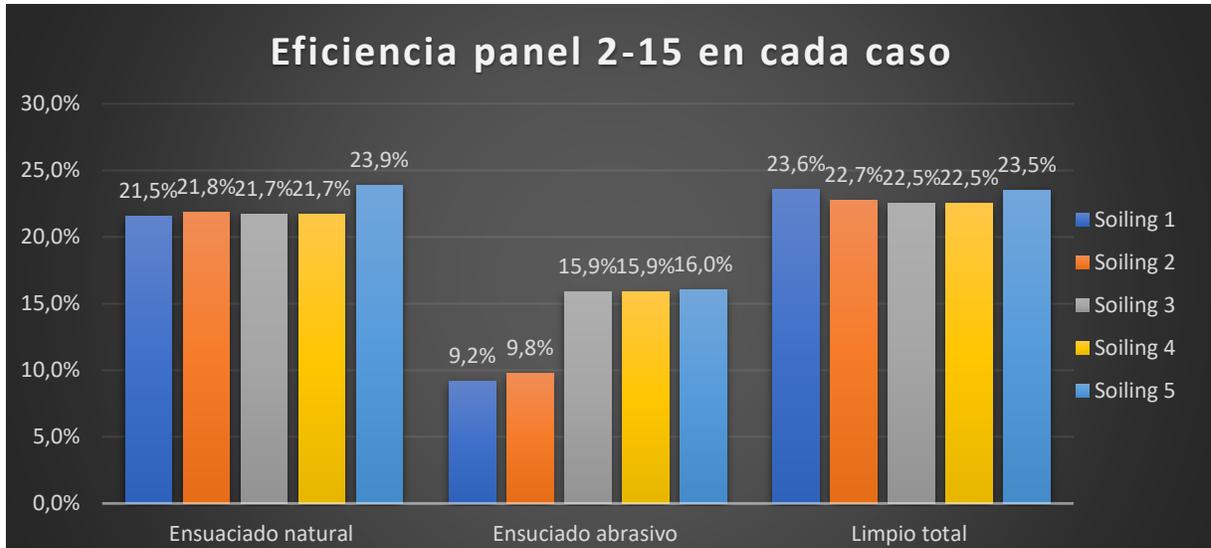


Gráfico 4.8: Eficiencia por cada caso en todas las muestras panel 2-15. Fuente propia

Finalmente se aclaran los rangos de ineficiencia presentados por cada caso en la tabla 4.10 tomando como referencia siempre el panel en estado más limpio, la diferencia porcentual que se expresa en la parte final de la tabla representa la resta del estado natural o abrasivo con el de estado totalmente limpio representando en forma negativa el porcentaje faltante o diferencial. Esto no implica que sea el porcentaje de ineficiencia ya que, por ejemplo, en soiling 1 abrasivo en panel 1-15 es de 9.2 y limpio 23.6 obteniendo una diferencia de 14.4 pero en realidad se significa que el estado abrasivo está siendo 61% más ineficiente que el estado limpio.

Tabla 4.10: Diferencia de eficiencias en cada caso para cada panel. Fuente propia

panel	Ensuciamiento natural		Ensuciamiento abrasivo		Limpio Total		Diferencia % natural-limpio		Diferencia % abrasivo - limpio	
	1--14	2--15	1--14	2--15	1--14	2--15	1--14	2--15	1--14	2--15
Soiling 1	21,4%	21,5%	13,7%	9,2%	23,7%	23,6%	-2,3%	-2,0%	-9,9%	-14,4%
Soiling 2	21,9%	21,8%	10,1%	9,8%	22,9%	22,7%	-1,0%	-0,9%	-12,8%	-13,0%
Soiling 3	22,5%	22,3%	14,0%	12,9%	21,6%	21,4%	0,9%	0,9%	-7,6%	-8,4%
Soiling 4	21,5%	21,7%	15,6%	15,9%	22,3%	22,5%	-0,8%	-0,8%	-6,7%	-6,6%
Soiling 5	24,1%	23,9%	15,3%	16,0%	23,6%	23,5%	0,5%	0,4%	-8,3%	-7,5%

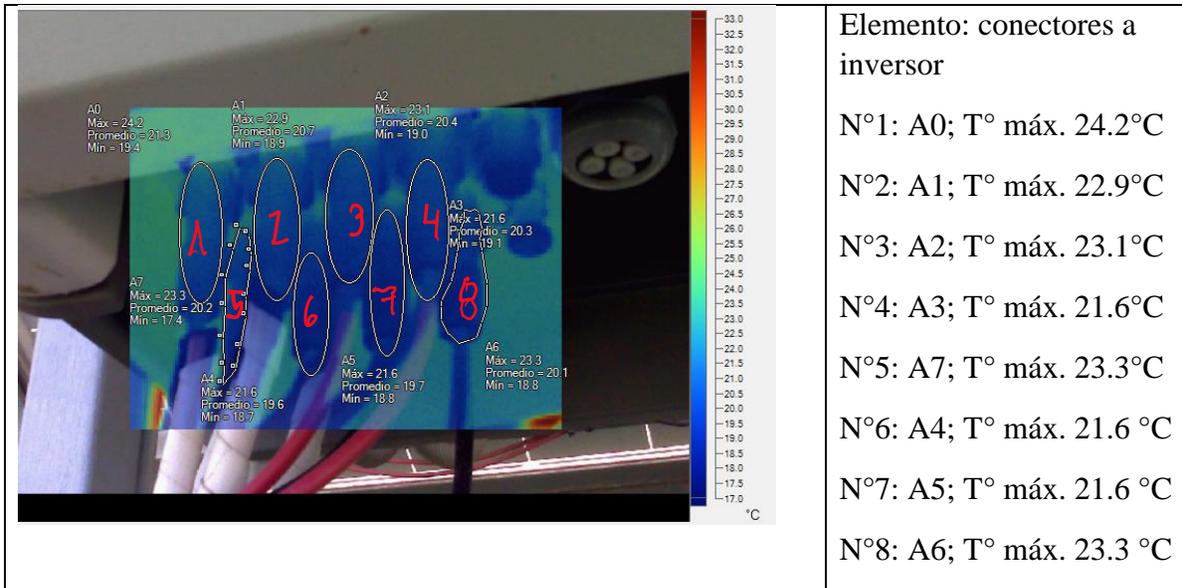
4.2 ANALISIS SISTEMA ELÉCTRICO

En relación con los componentes eléctricos del sistema fotovoltaico se presentan comparativas del espectro de temperaturas entre pares como lo señala la normativa NETA ATS 2017. En ellas no se presentaron mayores cambios importantes o diferencias altas que sobrepasaran los 4 grados C, ni para el panel de interruptores de fase, ni para conectores de inversor, ni para conectores de celdas en los paneles solares, cada uno de los resultados son parte del estudio de soiling que se encuentran en el apartado de anexo 4. Un ejemplo puede ser el del estudio de soiling 2 que muestra la tabla 4.11. El tablero de interruptores de fase, con ayuda del programa de FLUKE se encuadra para obtener lo necesario y sacar las temperaturas máximas en cada uno de ellos. También se puede ver un encuadre de forma de ovalo para los conectores.

Tabla 4.11: Temperaturas en sistemas eléctricos. Fuente Propia

Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos
	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° máx. 22.9°C</p> <p>N°2: A1; T° máx. 22.7°C</p> <p>N°3: A2; T° máx. 27.7°C</p> <p>N°4: A3; T° máx. 28.1°C</p> <p>N°5: A4; T° máx. 27.3°C</p> <p>N°6: A5; T° máx. 26.1 °C</p>

Capítulo 4. Análisis de resultados



Elemento: conectores a inductor

N°1: A0; T° máx. 24.2°C

N°2: A1; T° máx. 22.9°C

N°3: A2; T° máx. 23.1°C

N°4: A3; T° máx. 21.6°C

N°5: A7; T° máx. 23.3°C

N°6: A4; T° máx. 21.6 °C

N°7: A5; T° máx. 21.6 °C

N°8: A6; T° máx. 23.3 °C

El análisis estratégico es comparar las temperaturas de los sistemas pares o que se encuentran en conjunto y establecer las diferencias térmicas, por ejemplo, en el caso del interruptor de fase, se compara el 1 con el 2, el 3 con el 4 y 5 con el 6 obteniendo una diferencia de 0.2, 0.4, y 1.2 respectivamente. Con la misma metodología se aplica la regla para los conectores del inductor los cuales mostraron diferencias de 1.3, 1.5, 1.7 y 1.7 por lo tanto se consideran como elementos en buen estado, pero con regla de monitoreo.

4.3 BALANCE DE PERDIDA ECONÓMICA

Este apartado establece un valor monetario de producción de energía en los diferentes casos estudiados, extrapolando e interpretando los valores de rendimiento como rendimientos promedios anuales.

Como sistema empleado On-grid dependiente del suministro eléctrico de la compañía, esta acogido a la normativa chilena de la ley N° 20571 “Genera tu propia energía” con la ley de producción simple bajo la escala de tarifas BT1a según la compañía eléctrica de Curicó CGE presentada en la tabla del anexo número 7.

Como información fundamental de la planta se encuentra en el apartado de anexo 1 rescatando que:

- El sistema no proporciona energía a la red eléctrica debido a que cubre tan solo el 8.9% de la demanda energética.
- La energía generada anual por sub-planta es de 16.167 KWh/año en un máximo por simulación.

Para unos cálculos más realista se toma en cuenta la energía solar suministrada por día según la sonda solar chilena de la universidad de Chile como se aprecia en la figura 3.4. Ajustando los parámetros a meses y validando el sistema suministrado como lo indica la norma con un ajuste de precio por kilowatt/hora de 144.57 CLP a valor con IVA de noviembre 2022 (ver anexo 7) se presenta la siguiente tabla de comparativas en ganancias dependiendo del estado de la planta, utilizando el promedio de rendimientos obtenidos en el estudio y también el promedio de días de limpieza correspondiente a 5.4.

Tabla 4.12: Valores de venta de kW/h para los casos estudiados. Fuente propia

mes	radiacion kW/h/m2/dia	radiacion kW/h/m2/mes	radiacion captativa por mes en planta	limpio	abrasivo	natural	valor venta kw/h limpio	valor venta kw/h abrasivo	valor venta kw/h natural
				kW/h aprovechad o con 22,7%	kW/h aprovechad o con 12,8%	kW/h aprovechad o con 22,3%			
enero	8,83	264,9	30993,3	7035,4791	3967,1424	6911,5059	\$ 1.017.119	\$ 573.530	\$ 999.196
febrero	7,75	232,5	27202,5	6174,9675	3481,92	6066,1575	\$ 892.715	\$ 503.381	\$ 876.984
marzo	5,97	179,1	20954,7	4756,7169	2682,2016	4672,8981	\$ 687.679	\$ 387.766	\$ 675.561
abril	3,75	112,5	13162,5	2987,8875	1684,8	2935,2375	\$ 431.959	\$ 243.572	\$ 424.347
mayo	2,14	64,2	7511,4	1705,0878	961,4592	1675,0422	\$ 246.505	\$ 138.998	\$ 242.161
junio	1,62	48,6	5686,2	1290,7674	727,8336	1268,0226	\$ 186.606	\$ 105.223	\$ 183.318
julio	1,75	52,5	6142,5	1394,3475	786,24	1369,7775	\$ 201.581	\$ 113.667	\$ 198.029
agosto	2,54	76,2	8915,4	2023,7958	1141,1712	1988,1342	\$ 292.580	\$ 164.979	\$ 287.425
septiembre	4,13	123,9	14496,3	3290,6601	1855,5264	3232,6749	\$ 475.731	\$ 268.253	\$ 467.348
octubre	5,74	172,2	20147,4	4573,4598	2578,8672	4492,8702	\$ 661.185	\$ 372.827	\$ 649.534
noviembre	7,74	232,2	27167,4	6166,9998	3477,4272	6058,3302	\$ 891.563	\$ 502.732	\$ 875.853
diciembre	8,7	261	30537	6931,899	3908,736	6809,751	\$ 1.002.145	\$ 565.086	\$ 984.486
suma	60,66	1819,8	212916,6	48332,0682	27253,3248	47480,4018	\$ 6.987.367	\$ 3.940.013	\$ 6.864.242

Capítulo 4. Análisis de resultados

En resumen, la relación de limpieza y pérdida económica si se comparan los rendimientos con el factor máximo que es el de panel limpio se observa que abrasivamente el pérdida económica es ampliamente considerable, y este caso es el más representativo para una situación que no consta con una mantención programada de limpieza, es decir, durante los meses de mayor radiación como los son de noviembre a mayo al no existir una limpieza natural por lluvias tendríamos una acumulación de polvo muy similar al caso estudiado. Por otra parte, si se mantiene limpio el panel es representado por el ensuciamiento natural que se aplicó en el estudio con un promedio de días de 5.4. Esto significa que para mantener ese periodo de limpieza se necesita de alguien que proporcione este servicio: simulando ese caso, se considera que una persona debería hacer este trabajo al menos 6 veces al mes con un pago diario de \$12.000 pesos chilenos considerando que solo tomaría unas 4 horas diarias en total. También se considera que trabajaría durante todo el año. En relación con el supuesto anterior se resumen los siguientes valores.

Tabla 4.13: Valores de ganancias y pérdidas en producción de energía solar. Fuente propia

perdida anual panel sucio	\$	-3.047.354
perdida anual panel natural a promedio 5,4 días	\$	-123.125
valor horas hombre limpieza cada 5 días	\$	864.000
ganacias por mantener limpio a 5,4 días	\$	6.000.242
diferecia de ganancia a modo abrasivo vs con limpieza	\$	2.060.229

Entonces, al contratar una persona que mantenga los paneles limpios al menos 1 vez cada 5 días se invertirían 864.000 CLP obteniendo una ganancias totales de 6.000.242 CLP por la producción de energía de la planta, de caso contrario si se mantiene sin acción el sistema solo se ganaría 3.940.014 CLP, por lo tanto, se considera una pérdida económica de 2.060.229 CLP.

4.4 RECOMENDACIONES DE MANTENIMIENTO

Esta sección tiene por finalidad presentar recomendaciones para la implementación de un plan de mantenimiento en base a los datos obtenidos y analizados.

En primer lugar, se establecen parámetros de alerta y criticidad en los elementos eléctricos y paneles solares presentados en las tablas 4.14 y 4.15.

Tabla 4.14: Valores de riesgo en paneles solares. Fuente propia

Equipamiento	Valor t° de alerta	Valor t° Critico
Panel solar	10° > a temp. Media del panel	> 85 °C
Célula de panel solar	10° > a temp. De células contiguas	> 45°C

Tabla 4.15: Valores de riesgo en sistemas eléctricos. Fuente propia

Equipamiento	Valor t° de alerta	Valor t° Critico
Termo contactores	> 4°C en relación con pares contiguos	> 40° C
Conectores de inversor	> 4°C en relación con pares contiguos	No especifico
Conectores a panel	> 4°C en relación con pares contiguos	> 70 °C

Dentro de las recomendaciones básicas se encuentran:

- Actualizar el data-sheet oficial de la planta debido a que solo se presenta una sub-planta.
- No utilizar ningún jabón o detergente para la limpieza de los paneles
- Mantener un Angulo correcto para la medición de termografías futuras.
- Revisar el panel de inversor semanalmente para ver si existe problemas en algún sistema.
- Adaptar los tiempos de limpieza según sea conveniente, es decir investigar efecto de soiling a mayor tiempo y rango de ensuciamiento.
- Limpieza con periodos variables por temporada.
- Si existen lluvias por sobre 5mm, no limpiar.
- Cumplir con plan termografía para mantener un registro histórico.

Capítulo 4. Análisis de resultados

Finalmente se establece una planificación de tareas de limpieza simple para los paneles solares (recomendación) y periodos de chequeos en los cuales se puede monitorear el estado de eficiencia y envejecimiento de la planta. (ver tabla 4.16)

Tabla 4.16: Tareas recomendadas para mantenimiento de la planta. Fuente propia

Sistema	Componente	Modo de falla	Tarea de mantenimiento	Frecuencia de aplicación	Especialista responsable
Paneles solares	Placas fotovoltaicas	Soiling	Limpieza	Semanal	Persona natural designada
	Conexiones de placas	Mal conectado	Revisión de estado	Mensual	Eléctrico
	Celdas fotovoltaicas	Sobre temperaturas	Revisión termográfica	Mensual	Ing. Mecánico/técnico en mantenimiento
Sistema eléctrico	Inversor	Fusil quemado (potencia total disminuida)	Revisión /Cambio de fusil	Semanal	Eléctrico
	Conectores inversor	Sobre temperatura (corto eléctrico)	Revisión termográfica	Mensual	Ing. Mecánico/técnico en mantenimiento
	Disyuntores	Sobre temperatura	Revisión termográfica	Mensual	Ing. Mecánico/técnico en mantenimiento
	Cableado	Recubrimiento quemado (peligro eléctrico)	Revisión e informe	Trimestral	Eléctrico
Planta completa	Planta completa (alrededores)	Control vegetativo (sombreado por maleza)	Corte y eliminación de malezas	4-5 veces por año	Jardinero/personal designado
	Planta completa	Bajo Rendimiento	Análisis completo de potencias	Anual	Especialistas de análisis fotovoltaico
	Estructura	Falla estructural	Revisión visual	3-4 veces por año	Técnico en mantenimiento

CONCLUSIONES

Dada la bibliografía estudiada se establece una relación directa entre la teoría de análisis y las normativas para la toma de mediciones termográficas, enfatizando en el amplio resultado de éxito que tuvo la metodología aplicada, esta forma experimental es el resultado de la combinación de múltiples factores.

Las 5 primeras muestras que son de amplio espectro y de la planta completa mostraron cambios significativos en los rendimientos independientes de las placas solares que se sospechaba se encontraban en falla, obteniendo en la mayoría de los casos temperaturas superiores y encasilladas en un recuadro de las células. Un análisis más profundo dicta que podría deberse a posibles grietas en las placas por diversas razones, las cuales se descartan por una inspección más exhaustiva hecha posterior al muestreo. También podría ser causa de un corte interno en la conexión entre célula, pero los paneles en las mediciones no repetían el síntoma y existía un factor de disminución de amperaje solo en algunas de ella. El análisis más acertado es la relación directa con las temperaturas y el factor de ensuciado presentes en cada panel; estas fallas fortuitas pueden presentarse una vez que el panel alcance ciertas temperaturas medias que produzca que algunas células en su sistema de mono-Silicio alcance una variación de temperatura lo que según el fabricante no necesariamente pueda ser signo de un problema. De todas formas, con las primeras muestras ya se establece una relación de altas temperaturas en función del estado de limpieza de los paneles ya que, muchas ocasiones se encontraban restos de fecas de ave o algunas basuras más grandes como palos o residuos del forraje de parra, y es que a unos 50 metros aproximadamente de la planta se encuentra una plantación de viñas. Podría ser interesante el estudio del efecto de los químicos y residuos colindantes a la planta fotovoltaica ya que en ciertos periodos del año a las viñas se les aplica pesticidas y azufre para el control de plagas y por la cercanía podría resultar un daño colateral.

En promedio, existió una ineficiencia en paneles que presentaban algún tipo de alza de temperatura por célula o media de panel de un 30% siempre en relación con la efectividad que producían los paneles llamados sanos.

Referente a la segunda parte del estudio se destaca de los resultados el gran impacto que tiene el polvo en las corrientes de corto circuito que presentan los paneles, ya que, tan solo 350 gramos

Conclusiones

de polvo por superficie presentaron más de 55% de diferencias en la corriente producida de un mismo panel. Por otra parte, sus voltajes en circuito abierto no fueron de gran medida afectados presentando una variabilidad de 6 % en promedio. En relación con los días de ensuciamiento natural es correcto decir que en primera instancia no son de gran significancia, siendo el máximo 8 días solo se presenta un 2.3% de diferencia en eficiencia con el panel limpio, pero este valor significa que en comparativa porcentual entre ambas eficiencias se encuentra un 9.5% que dados los resultados el lineal el comportamiento entre eficiencia y soiling, es decir, que en un mes podrían presentar diferencias de un 20 a 30 % dependiendo del clima, viento y humedad relativa.

Aun con el presente estudio y la bibliografía presentada, es difícil predecir el comportamiento del soiling y más aún cuantificar y extrapolar las pérdidas energéticas que presentan.

El uso de los diodos de bypass es la tecnología más relevante a la hora de hablar de soiling permitiendo que la celda no extienda los problemas a la células cercanas.

Si se observa el daño económico que presenta el panel es claro que se necesita limpiar con cierta frecuencia, pero se pueden establecer diversas frecuencias de limpiado dependiendo de la estación del año y de la cantidad de lluvias que se presenten. Dado lo anterior es que se recomienda que un futuro estudio tome los datos y los extienda para ver el daño e influencia a mayor cantidad de días en ensuciado natural y compara para establecer un punto de máximo aprovechamiento con el menor costo de inversión en gastos de mantención por limpieza.

Complicaciones y observaciones

Dados los meses en que se realizaron las muestra fue altamente compleja la recolección de datos, debido a la presencia de nubosidad, lluvia y hasta la poca radiación que llevaron a descartar 4 muestras extras que no se lograron presentar por que presentaban un dispersión de datos diferentes o erróneos que llevarían a resultados incongruentes. También en relación a las muestras se observó que al limpiar los paneles con agua (especialmente la última muestra soiling) presentaban extrañamente mayor temperatura que en el ensuciado natural y se concluyó que luego de secar la superficie esta igual presentaba una leve presencia de vapores de agua o residuos que por el contrario de bajar la temperatura la aumentaban en 1 o 2 grados Celsius, manifestando que podría a ver efecto lupa en el panel o que la cámara termográfica presentaba

Conclusiones

resultados más elevados debido a que el espectro de emisividad se alteraba y con ella la captación de ondas electromagnéticas. Como recomendación adicional se aconseja la limpieza con agua destilada que presenta menos minerales que el agua potable o natural de pozo.

La posición angular de la cámara también es tema fundamental, pero lo más importante es que se cumpla la condición de los 30° y siempre se tome la termografía en el mismo Angulo y lugar.

Se debe tener especial cuidado en los conectores, ya que, se observó que después de tantas muestras estos fueron perjudicados en su estado, por ello, se recomienda hacer un análisis a lo máximo semestralmente o una vez al año para no comprometer la integridad de estos.

Por último, para monitoreos futuros considerar un envejecimiento de rendimiento anual de 2.5% para el primer año y 0.6% en degradación lineal hasta el año 25 tomando.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] (s.f.). biblioteca nacional .
- [2] Arancibia, G. (2016). *La importancia del uso de paneles solares en la generación*. España.
- Balageas, D. (2007). *Termografía Infrarroja : una técnica multifacética para la Evaluación no destructiva*. Buenos Aires .
- [3] Cambio energetico. (3 de juni de 2021). Obtenido de cambio energetico:
<https://www.cambioenergetico.com/blog/paneles-solares-eficientes/#:~:text=Entre%20los%20elementos%20que%20pueden,suciedad%20y%20la%20tecnolog%C3%ADas%20empleada>.
- [4] Castro , J. (2019). *Analisis de pérdidas por suciedad en plantas fotovoltaicas*. Madrid.
- [5] CEPAL. (2012). *economía del cambio climatico en Chile*. Santiago .
- [6] Cepeda, J., & Sierra, A. (2017). *Aspectos que afectan la eficiencia en los paneles fotovoltaicos y sus potenciales soluciones*. Bogota .
- [7] Comisión Nacional de Riego. (2018). *MANUAL DE INSPECCIÓN Y REVISIÓN DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS* . s: A Impresores S.A.
- [8] García, N. (2021). *Matriz energetica y eléctrica en Chile* . Santiago : Biblioteca nacinal .
- Garrido, J. (2020). *ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL ENSUCIAMIENTO POR POLVO EN LA*. Valaparaíso.
- [9] Gonzalez Celis, R. (2021). *MATRIZ ENERGÉTICA MUNDIAL Y EL CAMBIO CLIMÁTICO: ESTADO ACTUAL*. Bogotá.
- [10] Greenpeace. (2021). *calentamiento global en la Tierra* . Obtenido de
<https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/cambio-climatico/#:~:text=La%20temperatura%20media%20mundial%20ha,la%20m%C3%A1s%20c%C3%A1lida%20jam%C3%A1s%20registrada>.
- [11] Hoyos, S., Franco, C., & Dyner , I. (2017). *Integración de fuentes no convencionales*.
- [12] Hurtado Valenzuela, P. (2016). *TERMOGRAFÍA INFRARROJA APLICADA AL* .
- [13] Jofra , M. (s.f.). *Energía solar fotovoltaica* .
- [14] Jofra, M. (2015). *Energía solar fotovoltaica. La suma de todos*.
- [15] ministerio de energia Chile. (2021). *solar.minenergia*. Obtenido de
<https://solar.minenergia.cl/exploracion>

Bibliografía

- (2021). *Normativa aplicable a energía solar en Chile*. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones.
- [16] Pereda, I. (2005). *ELDAS FOTOVOLTAICAS EN* . Santiago.
- [17] Rau Andrade, F. J. (2017). *ESTUDIO DEL EFECTO SOILING EN EL RENDIMIENTO DE PANELES*.
- [18] Reguera Gil, F. (2015). *ANÁLISIS DE LA DEGRADACIÓN DE MÓDULOS*. Andalucía: Universidad Internacional de Andalucía .
- [19] Rojas, M. (2019). *Evidencia*. Santiago.
- [20] TESTO AG. (2012). *Pocket Guide thermography*.

ANEXOS

ANEXO 1: FICHA TECNICA PANEL SOLAR TIGER MONO-FACIAL 450-470 E INFORME DE PLANTA LOS NICHES, CURICO, UTALCA.

Engineering Drawings

Electrical Performance & Temperature Dependence

Mechanical Characteristics

Cell Type	P type Mono-crystalline
No. of cells	156 (2×78)
Dimensions	2182×1029×40mm (85.91×40.51×1.57 inch)
Weight	26.1 kg (57.54 lbs)
Front Glass	3.2mm Anti-Reflection Coating, High Transmission, Low Iron, Tempered Glass
Frame	Anodized Aluminium Alloy
Junction Box	IP67 Rated
Output Cables	TUV 1×4.0mm ² (+) 290mm, (-) 145 mm or Customized Length

Packaging Configuration

(Two pallets = One stack)

27pcs/pallets, 54pcs/stack, 540pcs/ 40'HQ Container

SPECIFICATIONS

	JKM450M-7RL3		JKM455M-7RL3		JKM460M-7RL3		JKM465M-7RL3		JKM470M-7RL3	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	450Wp	335Wp	455Wp	339Wp	460Wp	342Wp	465Wp	346Wp	470Wp	350Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	42.86V	39.20V	42.97V	39.32V	43.08V	39.43V	43.18V	39.58V	43.28V	39.69V
Maximum Power Current (Imp)	10.50A	8.54A	10.59A	8.61A	10.68A	8.68A	10.77A	8.74A	10.86A	8.81A
Open-circuit Voltage (Voc)	51.50V	48.61V	51.60V	48.70V	51.70V	48.80V	51.92V	49.01V	52.14V	49.21V
Short-circuit Current (Isc)	11.32A	9.14A	11.41A	9.22A	11.50A	9.29A	11.59A	9.36A	11.68A	9.43A
Module Efficiency STC (%)	20.04%		20.26%		20.49%		20.71%		20.93%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

Resultados Sistema completo

Instalación FV

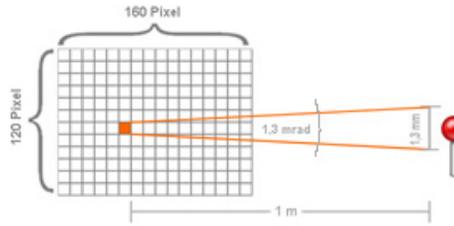
Potencia generador FV	10,4 kWp
Rendimiento anual espec.	1.554,50 kWh/kWp
Coefficiente de rendimiento de la instalación (PR)	81,3 %
Reducción de rendimiento por sombreado	1,2 %/Año
Energía de generador FV (Red CA)	16.167 kWh/Año
Consumo propio	16.167 kWh/Año
Inyección en la red	0 kWh/Año
Limitación en el punto de inyección	0 kWh/Año
Proporción de consumo propio	100,0 %
Emisiones de CO ₂ evitadas	9.700 kg / año

Consumidores

Consumidores	181.700 kWh/Año
Consumo Standby (Inversor)	4 kWh/Año
Consumo total	181.704 kWh/Año
cubierto mediante energía fotovoltaica	16.167 kWh/Año
cubierto mediante red	165.538 kWh/Año
Fracción de cobertura solar	8,9 %

ANEXO 2: MEDICION DEL IFOV -MEAS

El IFOVmeas (measured instantaneous field of view) es la designación del objeto más pequeño cuya temperatura se puede medir de forma precisa con una cámara termográfica. Al IFOVmeas también se le llama marca de medición.

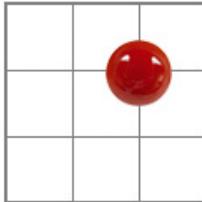


IFOVmeas = 3 x IFOV. Con el teleobjetivo, el objeto medible más pequeño tiene un tamaño de ¡3.9mm!



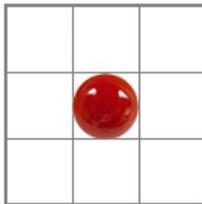
Ejemplo de objeto de medición

- La cabeza de 1.3 mm de un alfiler se mide (círculo rojo = objeto visible más pequeño) contra un muro, a una distancia de 1 m.



Caso real

La cabeza del alfiler solo llena parte del píxel / bolómetro del detector. Consecuentemente, la temperatura medida por el bolómetro no corresponde ni con la temperatura del alfiler ni con la de la pared. El bolómetro solo hace un cálculo del promedio de los dos valores.



Caso ideal

El objeto medido cubre caso por completo un píxel entero del detector. La temperatura medida por el bolómetro está muy cercana a la temperatura verdadera de la cabeza del alfiler.



Regla general: IFOVmeas = 3 x IFOV

Sólo si un objeto es tres veces mayor que el tamaño del objeto visible más pequeño un píxel del detector queda cubierto por completo. En este píxel se detecta la temperatura verdadera del objeto medido.

ANEXO 3: INFORME TECNICO PRIMERA PARTE Y SEGUNDA PARTE

DATOS DE MUESTRA

Muestra N°1			
Fecha de muestra	02-08-22	Temp. Pronostico	11° C @ 1 pm
Hora de la muestra	13:00 hrs	Temp. Muestra	11.3 °C
Radiación pronostico	559W/m2@1pm	Velocidad de viento	15km/h
Radiación de muestra	531.5 W/m2	Horómetro inversor	5575hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	N° PANEL	TEMP.PROM	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-1	2,9	9,1	150	2-1	4,3	8,1	178
1-2	7	10,2	151	2-2	7,6	12,7	179
1-3	7,7	11,7	152	2-3	8,7	13,8	180
1-4	8	11,9	153	2-4	6,9	11,6	181
1-5	7,5	11,7	154	2-5	7,3	11,9	182
1-6	9	12,5	155	2-6	7,2	12,7	183
1-7	9,2	13,3	156	2-7	6,2	11,9	184
1-8	9,7	13,3	157	2-8	6,4	11,5	185
1-9	8,7	12,3	158	2-9	8,1	12,7	186
1-10	9,1	13,4	159	2-10	8,2	13,2	187
1-11	9,7	13,3	160	2-11	7,5	12,4	188
1-12	9,6	14	161	2-12	8,6	13,4	189
1-13	9,7	13,6	162	2-13	8,7	13,6	190
1-14	9,6	13,1	163	2-14	7,1	10,3	191
1-15	10,4	12,7	164	2-15	9,3	12,9	192
1-16	11,7	14,2	165	2-16	9,1	12,7	193
1-17	12	12,1	166	2-17	9,3	13	194
1-18	12,1	14,3	167	2-18	9,9	13,5	195
1-19	11,5	14,2	168	2-19	9,5	13,1	196
1-20	12,1	14,1	169	2-20	10	13,7	197
1-21	12,1	14,3	170	2-21	9,6	12,8	198
1-22	12,4	14,7	171	2-22	10,3	14,2	199
1-23	12,9	15,2	172	2-23	9,4	13,5	200
1-24	12,8	15,3	173	2-24	10,7	14,7	201
1-25	13,7	16,3	174	2-25	10,6	13,9	202
1-26	13,9	16,7	175	2-26	13,1	15,7	203

BARRIDOS			
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-14	8,2	12,1	204
1-15	3,7	7,5	205
1-16	11,2	15,4	206
1-17	11,9	15,2	207
1-18	10,7	13,4	208

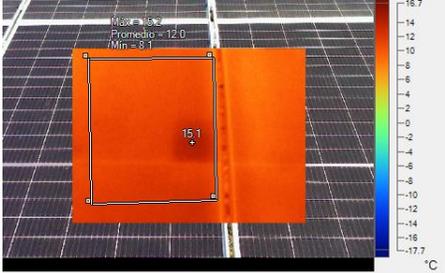
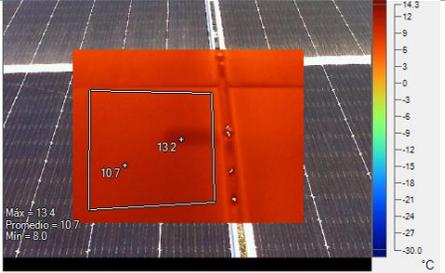
Anexos

Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)
2-14	51,7	8,6	444,62
2-15	51,7	8,8	454,96

Comentarios	En la muestra se observan diferentes temperaturas que a pesar de no superar el máximo permitido como puntos independientes deben seguir en observación. En la mayoría de los casos el polvo crea una capa superficial que afecta en 4° C celdas de los módulos. Los barridos detectaron incrementos específicos debido a polvo, suciedad orgánica, y causas a investigar. Existe leve baja de amperaje en comparación a paneles sanos.
-------------	--

IMAGEN IR	IMAGEN CORRIENTE	DATOS Y OBSERVACIONES
		<p>Panel 1-14</p> <p>Amperaje: 8.73 A</p> <p>Voltaje: 51 V</p> <p>Potencia: 445.23 W</p> <p>Obs: no se supera lo estandarizado como máximo en los puntos más caliente, se comprueba hermeticidad en correcta forma.</p>
		<p>Panel 1-19</p> <p>Amperaje: 8.2 A</p> <p>Voltaje: 49.3 V</p> <p>Potencia: 404.26 W</p> <p>Obs: el punto caliente marcado es producto de un montículo de fecas de ave, no afecta el rendimiento y es mínimo el punto.</p>
		<p>Panel 1-4</p> <p>Amperaje: 7.96 A</p> <p>Voltaje: 49.3 V</p> <p>Potencia: 392.4 W</p> <p>Obs: El punto caliente marcado es producto de un montículo de tierra, no afecta el rendimiento.</p>

Anexos

 	<p>Panel 1-24</p> <p>Amperaje: 8.2 A</p> <p>Voltaje: 51.5 V</p> <p>Potencia: 422.3 W</p> <p>Obs: la celda presenta mayor temperatura que la media, pero no supera lo estandarizado (+10° sobre media). No presenta mucho polvo</p>
 	<p>Panel 2-24</p> <p>Amperaje: 7.99 A</p> <p>Voltaje: 50 V</p> <p>Potencia: 399.5 W</p> <p>Obs: La celda no presenta exceso de temperatura, pero si una distinción. Se observa polvo modular</p>

DATOS DE MUESTRA

Muestra N°2			
Fecha de muestra	10-08-22	Temp. Pronostico	18° C @ 2 pm
Hora de la muestra	14:00 hrs	Temp. Muestra	18 °C
Radiación pronostico	599W/m2@2pm	Velocidad de viento	10 km/h
Radiación de muestra	586 W/m2	Horómetro inversor	5hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

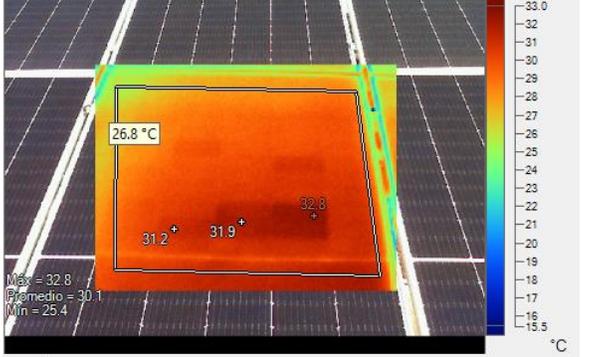
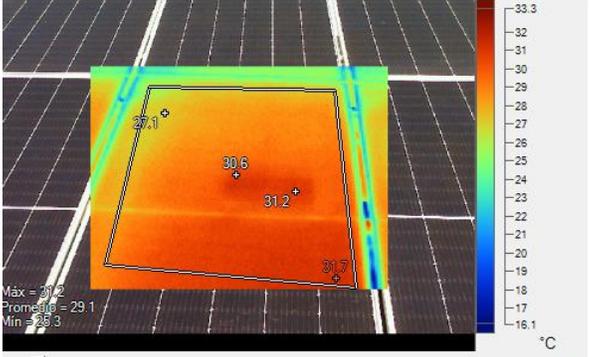
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	N° PANEL	TEMP.PROM	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-1	21,4	25,9	209	2-1	22,8	27,1	235
1-2	19,7	23,8	210	2-2	23,7	27,5	236
1-3	19,8	23,5	211	2-3	23,9	28,1	237
1-4	19,5	23,2	212	2-4	23,3	27,8	238
1-5	19	22,3	213	2-5	22,7	27,1	239
1-6	19,5	22,9	214	2-6	22	26,3	240
1-7	19,3	22,6	215	2-7	21,6	25,8	241
1-8	18,3	21,8	216	2-8	21,6	25,3	242
1-9	17,1	20,9	217	2-9	21,5	25,7	243
1-10	16,9	20,3	218	2-10	21,5	25,3	244
1-11	16,6	20,3	219	2-11	21,3	25,2	245
1-12	15,8	19,8	220	2-12	21,2	24,9	246
1-13	15,8	20,4	221	2-13	20,6	24,9	247
1-14	22,4	25,4	222	2-14	26,3	29,3	248
1-15	27,6	30,4	223	2-15	27	29,9	249
1-16	27,8	30,1	224	2-16	26,6	29,8	250
1-17	27,2	29,6	225	2-17	25,9	29,3	251
1-18	27,2	29,7	226	2-18	26,2	29,2	252
1-19	26,7	27,4	227	2-19	25,6	28,8	253
1-20	26,2	28,6	228	2-20	25,5	28,5	254
1-21	27,4	29,8	229	2-21	24,8	27,9	255
1-22	27	29,6	230	2-22	25,3	28,1	256
1-23	26,9	29,8	231	2-23	25	27,5	257
1-24	26,7	29,3	232	2-24	26,4	28,8	258
1-25	26,7	29,8	233	2-25	27,8	29,7	259
1-26	26,8	31	234	2-26	28,5	31,2	260

BARRIDOS			
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
2-25	30,1	32,8	262
2-23	29,1	31,7	263
2-19	29,4	32,1	264

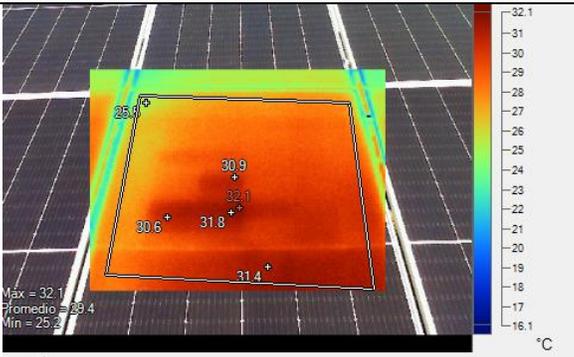
Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)
2-14	50,7	9,52	482,664
2-15	50,9	9,5	483,55

Anexos

Comentarios	Se debe tener cuidado con los espectros de enfoque y de colores con respecto a la cámara, ya que en presencia de la diferencia de colores se puede interpretar como una falla en el panel, pero al momento del análisis se descubre que puede estar mejor o igual que un panel sano. El polvo sigue siendo un factor de aumento en las temperaturas, pero afectando solo a parte y celdas del panel (se debe investigar)
-------------	--

IMAGEN IR	IMAGEN CORRIENTE	DATOS Y OBSERVACIONES
		<p>Panel 2-25</p> <p>Amperaje: 8.05 A</p> <p>Voltaje: 49.9 V</p> <p>Potencia: 401.7W</p> <p>Obs: con aproximadamente 6°C de diferencia de la tem. Mas baja y tan solo 2.9 de la media, el punto de mayor temperatura presente 1 amp menos que paneles sanos.</p>
		<p>Panel 2-23</p> <p>Amperaje: 8.85 A</p> <p>Voltaje: 50.9 V</p> <p>Potencia: 450.47 W</p> <p>Obs: la celda aislada no presenta la mayor temp. Del panel y la diferencia en amp entregado en</p>

Anexos

		comparación a panel sano es mínima
 <p>Max = 32.1 Promedio = 30.4 Min = 25.2</p> <p>32.1 30.9 31.8 31.4 30.6 25.8</p> <p>°C</p>		Panel 2-19 Amperaje: 9.6 A Voltaje: 50.9 V Potencia: 488.6 W Obs: las celdas con mayor coloración son debido a que la cámara entrega un rango de colores, pero los grados de diferencia suelen ser de 2 a 3 C como máximo de la media. Este panel entrega buen rendimiento en la muestra comparado a los paneles sanos.

DATOS DE MUESTRA

Muestra N°3			
Fecha de muestra	12-08-22	Temp. Pronostico	14° C @ 2 pm
Hora de la muestra	14:00 hrs	Temp. Muestra	14.1 °C
Radiación pronostico	561W/m2@2pm	Velocidad de viento	16 km/h
Radiación de muestra	555 W/m2	Horómetro inversor	5697hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

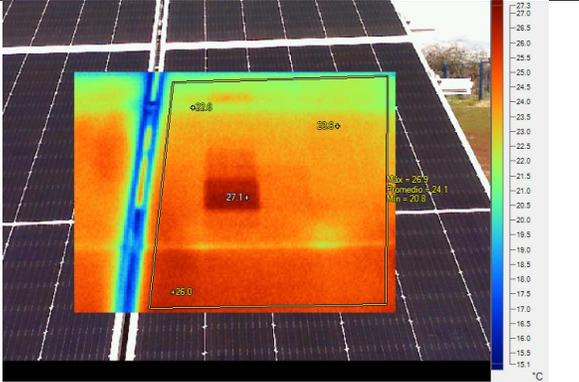
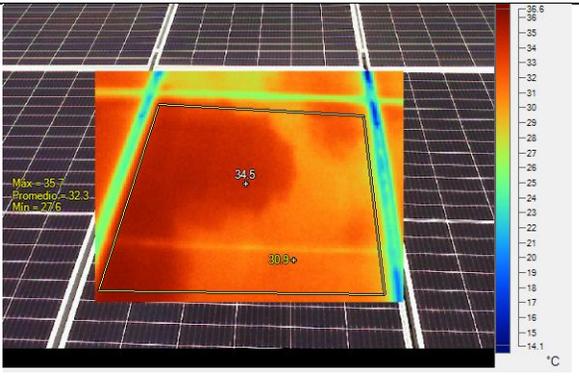
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	N° PANEL	TEMP.PROM	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-1	23,2	26,8	267	2-1	22,8	25,9	292
1-2	21,2	24,5	268	2-2	23,7	26,8	293
1-3	21,5	25,1	269	2-3	24,8	27,6	294
1-4	21,4	25,8	270	2-4	24,5	27,6	295
1-5	20,3	24	271	2-5	23,9	26,7	296
1-6	20,6	24,2	272	2-6	23,7	27,4	297
1-7	20,1	23,9	273	2-7	23,2	26,6	298
1-8	19,6	23,1	274	2-8	23,7	26,8	299
1-9	18,7	22,5	275	2-9	23,5	26,7	300
1-10	18,1	21,9	276	2-10	23	27,8	301
1-11	17,4	21,2	277	2-11	21,7	25,6	302
1-12	15,5	18,8	278	2-12	20,7	24,1	303
1-13	14,6	17,9	279	2-13	19,2	22,5	304
1-14	25	27,8	280	2-14	24,8	27,3	305
1-15	25,2	27,5	281	2-15	18,4	20,3	306
1-16	25,5	27,6	282	2-16	17,9	20	307
1-17	25,1	27,3	283	2-17	17,5	20,2	308
1-18	25,6	27,5	284	2-18	17,9	20,1	309
1-19	25,3	27,5	285	2-19	18,1	23,3	310
1-20	25,7	27,8	286	2-20	19,1	21,1	311
1-21	24,9	26,9	287	2-21	20,2	22,8	312
1-22	25,2	27,4	288	2-22	21	23,8	313
1-23	24,2	26	289	2-23	21	24,1	314
1-24	23,6	25,9	290	2-24	20,2	23,6	315
1-25	22,4	25,1	291	2-25	24,7	26,8	316
1-26	20,2	23,6	292	2-26	23,4	26,5	317

BARRIDOS			
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
2-26	24,1	27,1	320
1-24	32,3	35,7	321

Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)
2-14	50,6	9,4	475,64
2-15	51,6	9,47	488,652

Anexos

Comentarios	Se observa que en uno de los paneles (1-24) decae fuertemente el rendimiento a más de 50 % en comparación a paneles de prueba sanos. Requiere atención.
-------------	---

IMAGEN IR	IMAGEN CORRIENTE	DATOS Y OBSERVACIONES
		<p>Panel 2-26</p> <p>Amperaje: 7.2 A</p> <p>Voltaje: 51.66 V</p> <p>Potencia: 371.9W</p> <p>Obs: se observa una célula con clara marcación completa en mayor temperatura requiere observación. Baja eficiencia.</p>
		<p>Panel 1-24</p> <p>Amperaje: 4.5 A</p> <p>Voltaje: 56.9 V</p> <p>Potencia: 211 W</p> <p>Obs: se observa una muy alta deficiencia en el panel. A modo de rendimiento, pero con bajo gradiente temperatura</p>

DATOS DE MUESTRA

Muestra N°4			
Fecha de muestra	17-08-22	Temp. Pronostico	11° C @ 2 pm
Hora de la muestra	13:00 hrs	Temp. Muestra	11.4 °C
Radiación pronostico	627W/m2@2pm	Velocidad de viento	14 km/h
Radiación de muestra	503 W/m2	Horómetro inversor	5714 hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

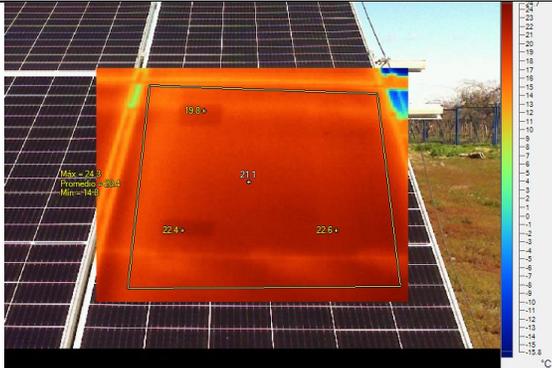
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	N° PANEL	TEMP.PROM	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-1	9,8	14,3	322	2-1	12,3	16,6	349
1-2	12,3	12,3	323	2-2	12,3	16,6	350
1-3	12,4	12,4	324	2-3	12,4	16,5	351
1-4	12,9	12,9	325	2-4	12,9	16,7	352
1-5	13,6	13,6	326	2-5	12,6	16,5	353
1-6	14,2	14,2	327	2-6	12,8	16,6	354
1-7	13,4	13,4	328	2-7	12,1	16,4	355
1-8	13,1	13,1	329	2-8	12,5	16,2	356
1-9	13	13	330	2-9	12,4	16,3	357
1-10	13,4	13,47	331	2-10	11,2	15,2	358
1-11	13,2	13,2	332	2-11	10,7	14,8	359
1-12	12,5	12,5	333	2-12	9,4	13,6	360
1-13	12,9	12,9	334	2-13	9,8	14,3	361
1-14	9,5	12,5	335	2-14	16,3	19,3	362
1-15	9,4	12,3	336	2-15	17,5	20,4	363
1-16	9,4	12,4	337	2-16	17,3	20,3	364
1-17	9,2	12,3	338	2-17	17,5	20,3	365
1-18	8,7	12,3	339	2-18	18	21,1	366
1-19	9,2	12,5	340	2-19	17,8	20,4	367
1-20	8,5	11,8	341	2-20	18,1	20,9	368
1-21	8	11,2	342	2-21	14,4	20,6	369
1-22	8,6	11,8	343	2-22	118	20,9	370
1-23	14,5	17,2	344	2-23	17,9	20,8	371
1-24	14,4	17,3	345	2-24	17,7	20,9	372
1-25	14,5	17,5	346	2-25	18,3	21,2	373
1-26	14,6	18,6	347	2-26	21,9	24,7	374

BARRIDOS			
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-26	20,4	24,3	375

Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)
2-14	52,2	8,92	465,624
2-15	52,5	8,95	469,875

Anexos

Comentarios	Se presenta una leve variación de temperatura solo en uno de los paneles, pero demuestra una baja de 30 W
-------------	---

IMAGEN IR	IMAGEN CORRIENTE	DATOS Y OBSERVACIONES
		<p>Panel 1-26</p> <p>Amperaje: 8.4 A</p> <p>Voltaje: 51.8 V</p> <p>Potencia: 435.12 W</p> <p>Obs: presenta leve baja de amperaje de entrega.</p>

DATOS DE MUESTRA

Muestra N°5			
Fecha de muestra	17-08-22	Temp. Pronostico	9° C @ 1 pm
Hora de la muestra	13:15 hrs	Temp. Muestra	12.4 °C
Radiación pronostico	631W/m2@1pm	Velocidad de viento	10 km/h
Radiación de muestra	501 W/m2	Horómetro inversor	5724 hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

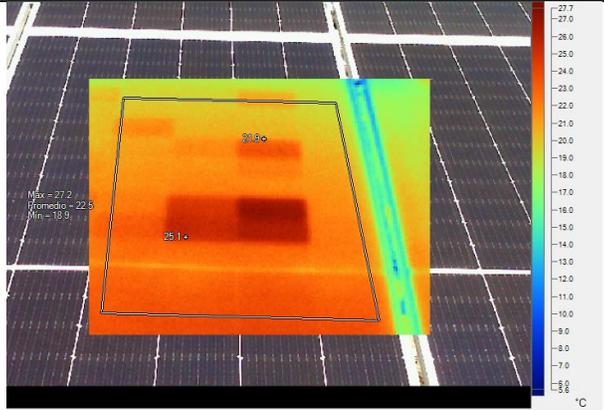
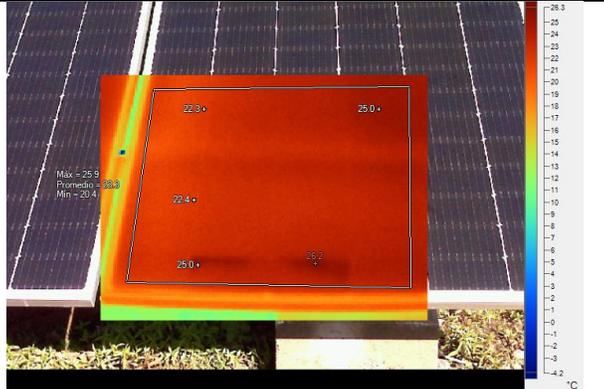
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	N° PANEL	TEMP.PROM	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
1-1	11,9	16,3	378	2-1	14,1	19	405
1-2	11,3	14,4	379	2-2	14,8	18,8	406
1-3	11,4	14,7	380	2-3	15,8	19,5	407
1-4	12,4	15,4	381	2-4	15,9	19,88	408
1-5	12,3	15,3	382	2-5	15,7	19,5	409
1-6	12,8	16,2	383	2-6	15,5	19,3	410
1-7	12,8	16,2	384	2-7	15,1	18,9	411
1-8	12,6	15,8	385	2-8	14,9	18,5	412
1-9	12,2	15,3	386	2-9	15	18,6	413
1-10	10,7	14,3	387	2-10	14,4	18,1	414
1-11	11,3	14,8	388	2-11	13,6	17,6	415
1-12	10,6	14,4	389	2-12	13	16,8	416
1-13	9,2	14,9	390	2-13	12,9	17,2	417
1-14	11,6	14,4	391	2-14	19,2	22,5	418
1-15	11,8	14,5	392	2-15	20,2	23,5	419
1-16	11,1	14,1	393	2-16	20,3	23,6	420
1-17	16,6	19	394	2-17	19,9	22,8	421
1-18	15,2	18	395	2-18	20,4	22,9	422
1-19	15,2	18	396	2-19	19,9	22,4	423
1-20	15,4	18,2	397	2-20	20,2	23	424
1-21	15,2	17,8	398	2-21	19,3	22,1	425
1-22	15,2	18,1	399	2-22	19,5	22	426
1-23	14,7	17,5	400	2-23	18,9	21,5	427
1-24	14,5	17,5	401	2-24	18,5	21,2	428
1-25	15,4	18,6	403	2-25	18	20,7	429
1-26	15,3	19,2	404	2-26	21,7	24,1	430

BARRIDOS			
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA
2-26	22,5	27,2	432
2-25	23,3	26,2	431

Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)
2-14	52,2	8,92	465,624
2-15	52,5	8,95	469,875

Anexos

Comentarios	Extrañamente los paneles en falla presentan mejor rendimiento que los sanos, puede deberse a la existencia de alguna radiación difusa
-------------	---

IMAGEN IR	IMAGEN CORRIENTE	DATOS Y OBSERVACIONES
		<p>Panel 2-26</p> <p>Amperaje: 9.5 A</p> <p>Voltaje: 52.1 V</p> <p>Potencia: 494.9W</p> <p>Obs: presenta coloración parcial, pero de forma gradual en células</p>
		<p>Panel 2-25</p> <p>Amperaje: 9.44 A</p> <p>Voltaje: 52.1 V</p> <p>Potencia: 491.8 W</p> <p>Obs: presenta leve baja de amperaje de entrega.</p>

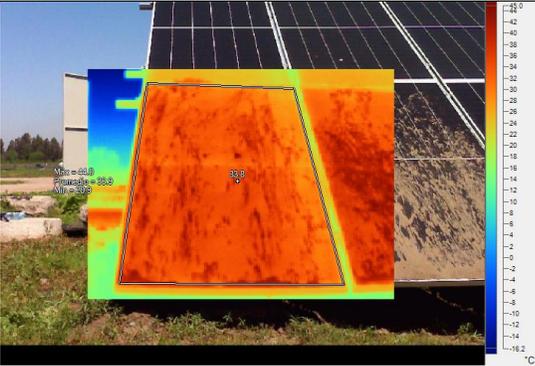
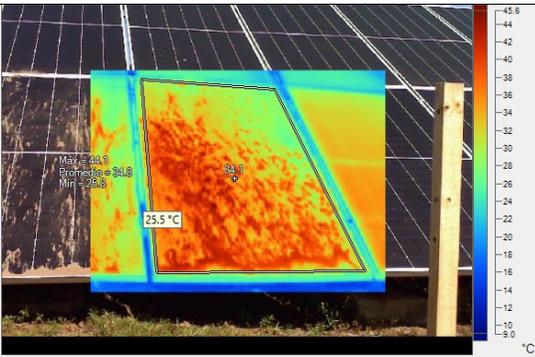
DATOS DE MUESTRA soiling 1

Muestra N°8			
Fecha de muestra	27-09-22	Temp. Pronostico	15° C @ 1:30 pm
Hora de la muestra	1:45 pm	Temp. Muestra	14.1 °C
Radiación pronostico	650W/m2@12:30pm	Velocidad de viento	1 km/h
Radiación de muestra	635 W/m2@1:30pm	Horómetro inversor	6144hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

*ensuciamiento natural de 7 días

Imagen IR	Imagen libre	Datos
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 10.15 A</p> <p>Volt: 50.2 V</p> <p>Poten: 509.5 W</p> <p>Temp. Max: 33.7°C</p> <p>Temp. Media: 30.3°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 10.12 A</p> <p>Volt: 50.1 V</p> <p>Poten: 507 W</p> <p>Temp. Max: 31.5°C</p> <p>Temp. Media: 28.3°C</p>

Anexos

		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 6.6 A</p> <p>Volt: 49.4 V</p> <p>Poten: 3027.04W</p> <p>Temp. Max: 44°C</p> <p>Temp. Media: 33.9°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 4.31A</p> <p>Volt: 49 V</p> <p>Poten: 211.19 W</p> <p>Temp. Max: 44.1°C</p> <p>Temp. Media: 34.8°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: limpio total</p> <p>Amp: 11.02 A</p> <p>Volt: 49.8 V</p> <p>Poten: 548.79 W</p> <p>Temp. Max: 29.5°C</p> <p>Temp. Media: 25.9°C</p>

Tipo de equipo	Elementos eléctricos	Instrumentos de medición	Fluke TI10
Ubicación	Universidad de Talca, Curico. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	Disyuntores: hasta 40°C Cableado: 4mm 70°C Conectores: no especificado
Emisividad (ε)	0.95	Unidades de temperatura	°C
Elementos totales	104 conectores a paneles 6 disyuntores 8 cables de inversor		

Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos
	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° max 20.9°C</p> <p>N°2: A1; T° max 21.5°C</p> <p>N°3: A2; T° max 28.3°C</p> <p>N°4: A3; T° max 28.3°C</p> <p>N°5: A4; T° max 27.4°C</p> <p>N°6: A5; T° max 25.7 °C</p>

<p>Thermal image showing temperature distribution across an inverter connector assembly. Eight points are marked with red numbers 1 through 8, corresponding to labels A0 through A7. A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 14.8 (blue) to 37.7 (red).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Label</th> <th>Max (°C)</th> <th>Promedio (°C)</th> <th>Min (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>A0</td> <td>22.3</td> <td>19.4</td> <td>17.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>A1</td> <td>21.5</td> <td>19.1</td> <td>18.5</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>A2</td> <td>22.4</td> <td>19.1</td> <td>18.5</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>A3</td> <td>22.0</td> <td>19.8</td> <td>18.4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>A4</td> <td>22.2</td> <td>19.4</td> <td>17.3</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>A5</td> <td>20.8</td> <td>18.8</td> <td>17.7</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>A6</td> <td>22.3</td> <td>19.0</td> <td>17.9</td> </tr> <tr> <td>8</td> <td>A7</td> <td>22.8</td> <td>19.7</td> <td>18.4</td> </tr> </tbody> </table>	Point	Label	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)	1	A0	22.3	19.4	17.5	2	A1	21.5	19.1	18.5	3	A2	22.4	19.1	18.5	4	A3	22.0	19.8	18.4	5	A4	22.2	19.4	17.3	6	A5	20.8	18.8	17.7	7	A6	22.3	19.0	17.9	8	A7	22.8	19.7	18.4	<p>Elemento: conectores a inversor</p> <p>N°1: A0; T° max 22.3°C</p> <p>N°2: A1; T° max 21.5°C</p> <p>N°3: A2; T° max 22.4°C</p> <p>N°4: A3; T° max 22°C</p> <p>N°5: A4; T° max 22.2°C</p> <p>N°6: A5; T° max 20.8 °C</p> <p>N°7: A6; T° max 22.3 °C</p> <p>N°8: A7; T° max 22.8 °C</p>
Point	Label	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)																																										
1	A0	22.3	19.4	17.5																																										
2	A1	21.5	19.1	18.5																																										
3	A2	22.4	19.1	18.5																																										
4	A3	22.0	19.8	18.4																																										
5	A4	22.2	19.4	17.3																																										
6	A5	20.8	18.8	17.7																																										
7	A6	22.3	19.0	17.9																																										
8	A7	22.8	19.7	18.4																																										
<p>Thermal image focusing on a single panel connector labeled A0. The temperature scale on the right ranges from 29.8 (blue) to 42.7 (red). The connector shows a localized high temperature area.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Label</th> <th>Max (°C)</th> <th>Promedio (°C)</th> <th>Min (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>A0</td> <td>40.4</td> <td>31.0</td> <td>27.8</td> </tr> </tbody> </table>	Point	Label	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)	1	A0	40.4	31.0	27.8	<p>Elemento: conector a panel</p> <p>N°1: A0; T° max 40.4</p> <p>No existe variación en temperaturas en los demás conectores.</p>																																			
Point	Label	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)																																										
1	A0	40.4	31.0	27.8																																										

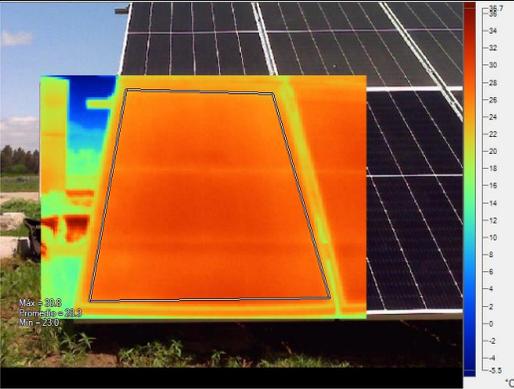
DATOS DE MUESTRA soiling 2

Muestra N°9			
Fecha de muestra	5-10-22	Temp. Pronostico	16° C @ 2:00 pm
Hora de la muestra	2:10 pm	Temp. Muestra	16.7 °C
Radiación pronostico	650W/m2@2:00pm	Velocidad de viento	12 km/h
Radiación de muestra	675 W/m2	Horómetro inversor	6234hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

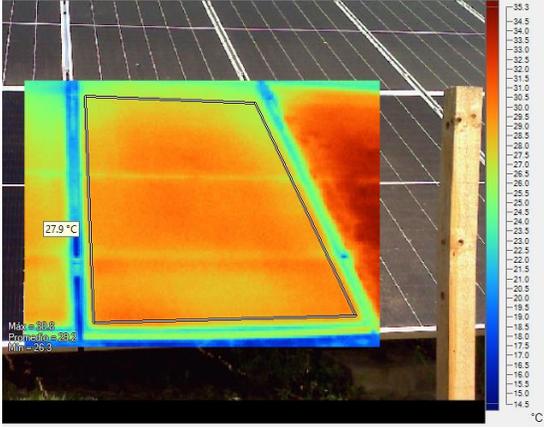
*Ensuciamiento natural de 8 días

Imagen IR	Imagen libre	Datos
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 5.23 A</p> <p>Volt: 48.6 V</p> <p>Poten: 554.17W</p> <p>Temp. Max: 43.9°C</p> <p>Temp. Media: 36.5°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 5.1 A</p> <p>Volt: 48.5 V</p> <p>Poten: 247.35 W</p> <p>Temp. Max: 45.4°C</p>

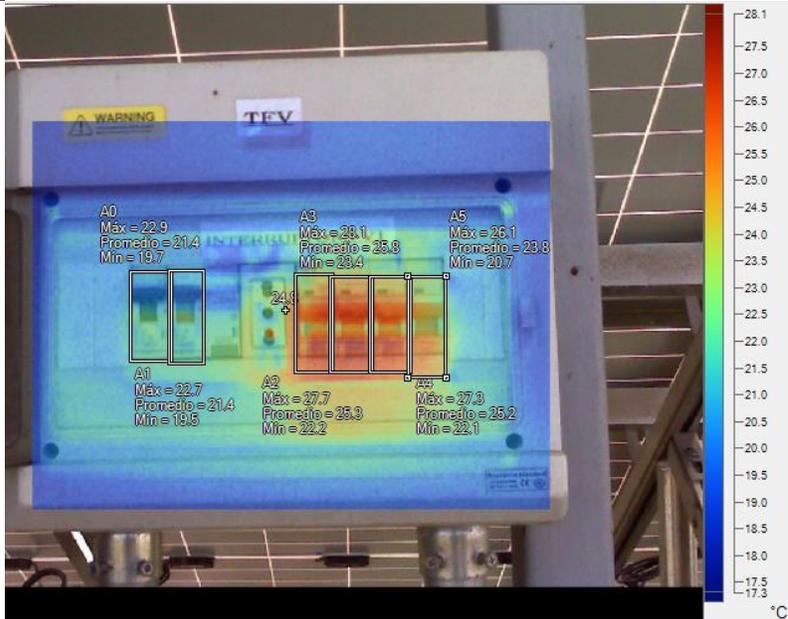
Anexos

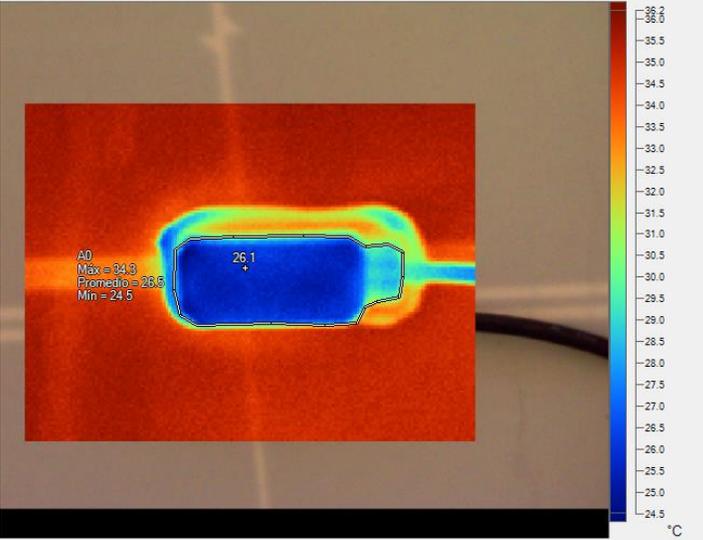
		<p>Temp. Media: 39.2°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14 Modo: soiling natural Amp: 10.96 A Volt: 50.5 V Poten: 553.48W Temp. Max: 31.9°C Temp. Media: 28.6°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15 Modo: soiling natural Amp: 10.99 A Volt: 50.3 V Poten: 552.79W Temp. Max: 32.9°C Temp. Media: 30°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14 Modo: limpio total Amp: 11.43 A Volt: 50.7 V Poten: 575.5 W Temp. Max: 30.8°C</p>

Anexos

		<p>Temp. Media: 28.3°C</p>
		<p>Nº Panel: 2-15</p> <p>Modo: limpio total</p> <p>Amp: 11.4 A</p> <p>Volt: 50.3V</p> <p>Poten: 553.42 W</p> <p>Temp. Max: 30.8°C</p> <p>Temp. Media: 29.2°C</p>

Tipo de equipo	Elementos eléctricos	Instrumentos de medición	Fluke TI10
Ubicación	Universidad de Talca, Curico. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	Disyuntores: hasta 40°C Cableado: 4mm 70°C Conectores: no especificado
Emisividad (ε)	0.95	Unidades de temperatura	°C
Elementos totales	104 conectores a paneles 6 disyuntores 8 cables de inversor		

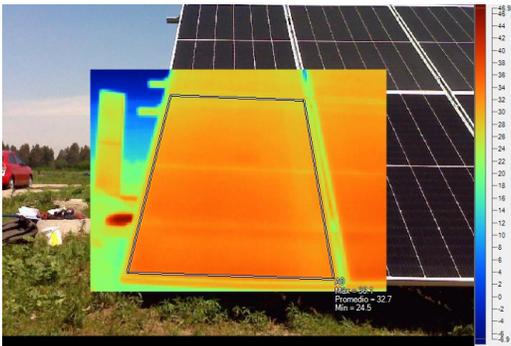
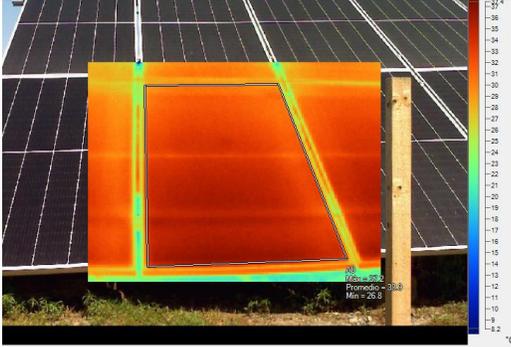
Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos
 <p>The image shows an infrared thermal scan of a circuit breaker panel. Six specific points are identified and labeled A0 through A5. Each point has associated maximum, average, and minimum temperature readings. A color scale on the right side of the image indicates the temperature range from 17.3°C (blue) to 28.1°C (red).</p>	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° max 22.9°C</p> <p>N°2: A1; T° max 22.7°C</p> <p>N°3: A2; T° max 27.7°C</p> <p>N°4: A3; T° max 28.1°C</p> <p>N°5: A4; T° max 27.3°C</p> <p>N°6: A5; T° max 26.1 °C</p>

 <p>Thermal image showing temperature distribution on an inverter connector. Eight points are marked with red numbers 1-8 and labeled A0 through A7. A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 17.0 to 33.0.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Max (°C)</th> <th>Promedio (°C)</th> <th>Min (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A0</td> <td>24.2</td> <td>21.3</td> <td>19.4</td> </tr> <tr> <td>A1</td> <td>22.9</td> <td>20.7</td> <td>18.9</td> </tr> <tr> <td>A2</td> <td>23.1</td> <td>20.4</td> <td>19.0</td> </tr> <tr> <td>A3</td> <td>21.6</td> <td>20.3</td> <td>19.1</td> </tr> <tr> <td>A4</td> <td>21.6</td> <td>19.6</td> <td>18.7</td> </tr> <tr> <td>A5</td> <td>21.6</td> <td>19.7</td> <td>18.8</td> </tr> <tr> <td>A6</td> <td>23.3</td> <td>20.1</td> <td>18.8</td> </tr> <tr> <td>A7</td> <td>23.3</td> <td>20.2</td> <td>17.4</td> </tr> </tbody> </table>	Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)	A0	24.2	21.3	19.4	A1	22.9	20.7	18.9	A2	23.1	20.4	19.0	A3	21.6	20.3	19.1	A4	21.6	19.6	18.7	A5	21.6	19.7	18.8	A6	23.3	20.1	18.8	A7	23.3	20.2	17.4	<p>Elemento: conectores a inverter</p> <p>N°1: A0; T° max 24.2°C</p> <p>N°2: A1; T° max 22.9°C</p> <p>N°3: A2; T° max 23.1°C</p> <p>N°4: A3; T° max 21.6°C</p> <p>N°5: A7; T° max 23.3°C</p> <p>N°6: A4; T° max 21.6 °C</p> <p>N°7: A5; T° max 21.6 °C</p> <p>N°8: A6; T° max 23.3 °C</p>
Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)																																		
A0	24.2	21.3	19.4																																		
A1	22.9	20.7	18.9																																		
A2	23.1	20.4	19.0																																		
A3	21.6	20.3	19.1																																		
A4	21.6	19.6	18.7																																		
A5	21.6	19.7	18.8																																		
A6	23.3	20.1	18.8																																		
A7	23.3	20.2	17.4																																		
 <p>Thermal image showing a hot spot on a panel connector. The connector is labeled A0. A color scale on the right indicates temperature in degrees Celsius, ranging from 24.5 to 36.5.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Point</th> <th>Max (°C)</th> <th>Promedio (°C)</th> <th>Min (°C)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>A0</td> <td>34.3</td> <td>26.6</td> <td>24.5</td> </tr> </tbody> </table>	Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)	A0	34.3	26.6	24.5	<p>Elemento: conector a panel</p> <p>N°1: A0; T° max 34.3</p>																												
Point	Max (°C)	Promedio (°C)	Min (°C)																																		
A0	34.3	26.6	24.5																																		

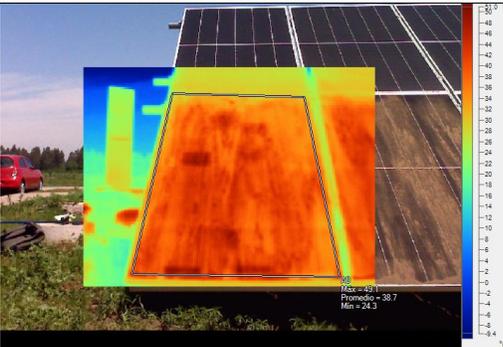
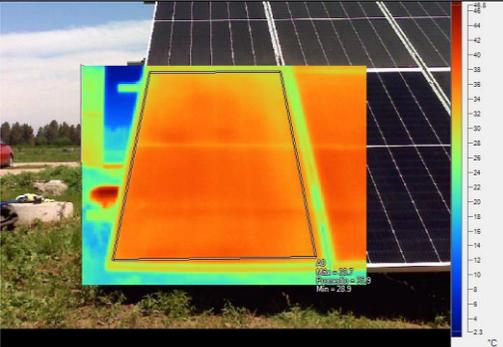
DATOS DE MUESTRA soiling 3

Muestra N°10			
Fecha de muestra	11-10-22	Temp. Pronostico	22° C @ 2:00 pm
Hora de la muestra	2:00 pm	Temp. Muestra	21.1 °C
Radiación pronostico	650W/m2@2:00pm	Velocidad de viento	9 km/h
Radiación de muestra	645 W/m2@2:00pm	Horómetro inversor	6306 hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

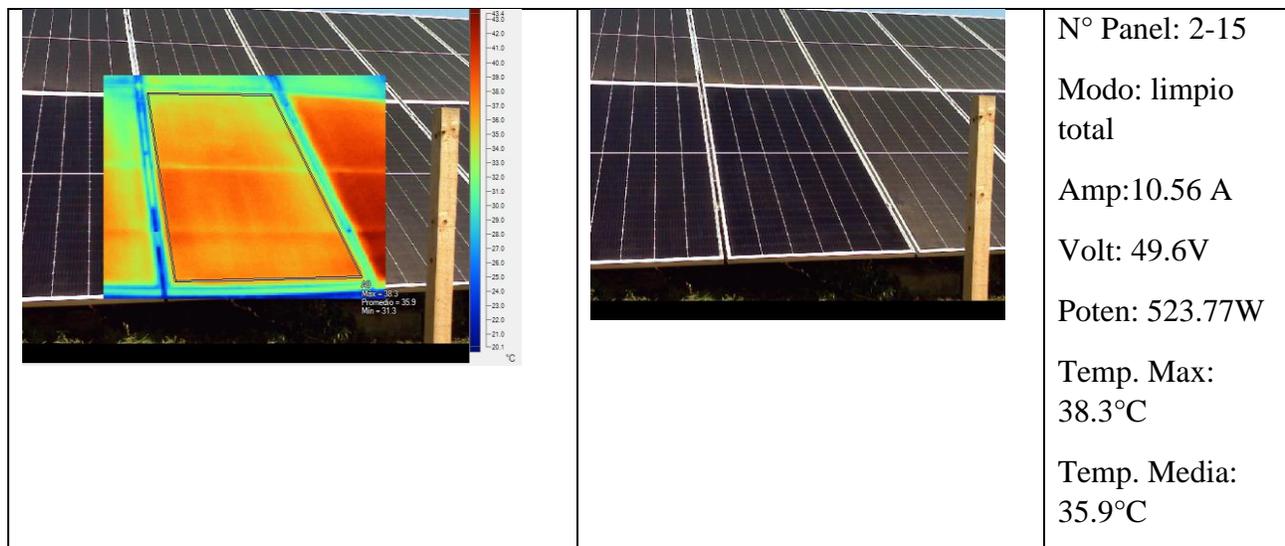
*ensuciamiento natural de 6 días

Imagen IR	Imagen libre	Datos
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 10.95A</p> <p>Volt: 49.5 V</p> <p>Poten: 542W</p> <p>Temp. Max: 36.1°C</p> <p>Temp. Media: 32.7°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 10.9A</p> <p>Volt: 49.5V</p> <p>Poten: 539.55W</p> <p>Temp. Max: 37.2°C</p> <p>Temp. Media: 33.9°C</p>

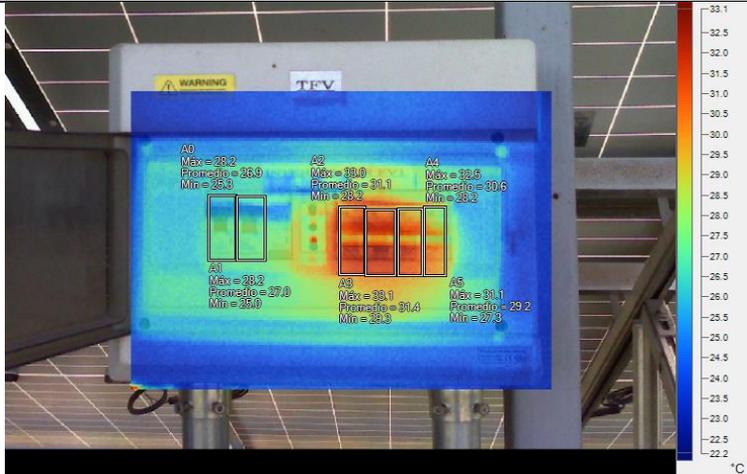
Anexos

		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 6.98 A</p> <p>Volt: 48.6V</p> <p>Poten: 339.22W</p> <p>Temp. Max: 49.1°C</p> <p>Temp. Media: 38.7°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 6.47 A</p> <p>Volt: 48.5V</p> <p>Poten: 313.79W</p> <p>Temp. Max: 50.3°C</p> <p>Temp. Media: 39.5°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: limpio total</p> <p>Amp: 10.64 A</p> <p>Volt: 49.5V</p> <p>Poten: 526.68W</p> <p>Temp. Max: 38.7°C</p> <p>Temp. Media: 35.9°C</p>

Anexos



Tipo de equipo	Elementos eléctricos	Instrumentos de medición	Fluke TI10
Ubicación	Universidad de Talca, Curico. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	Disyuntores: hasta 40°C Cableado: 4mm 70°C Conectores: no especificado
Emisividad (ε)	0.95	Unidades de temperatura	°C
Elementos totales	104 conectores a paneles 6 disyuntores 8 cables de inversor		

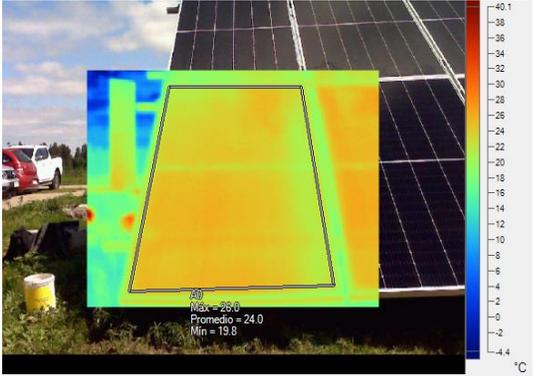
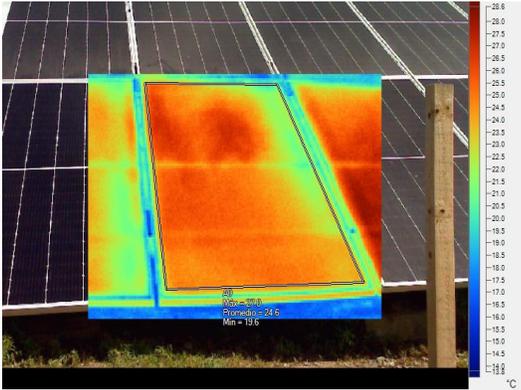
Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos
	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° max 28.2°C</p> <p>N°2: A1; T° max 28.2°C</p> <p>N°3: A2; T° max 33°C</p> <p>N°4: A3; T° max 33.1°C</p> <p>N°5: A4; T° max 32.5°C</p> <p>N°6: A5; T° max 31.1 °C</p>

	<p>Elemento: conectores a inductor</p> <p>N°1: A0; T° max 26.1°C</p> <p>N°2: A1; T° max 26.1°C</p> <p>N°3: A2; T° max 26°C</p> <p>N°4: A3; T° max 27.6°C</p> <p>N°5: A4; T° max 25.8°C</p> <p>N°6: A5; T° max 25.7 °C</p> <p>N°7: A6; T° max 25.5 °C</p> <p>N°8: A7; T° max 25.6 °C</p>
	<p>Elemento: conector a panel</p> <p>N°1: A0; T° max 38</p> <p>No existe variación en temperaturas en los demás conectores.</p>

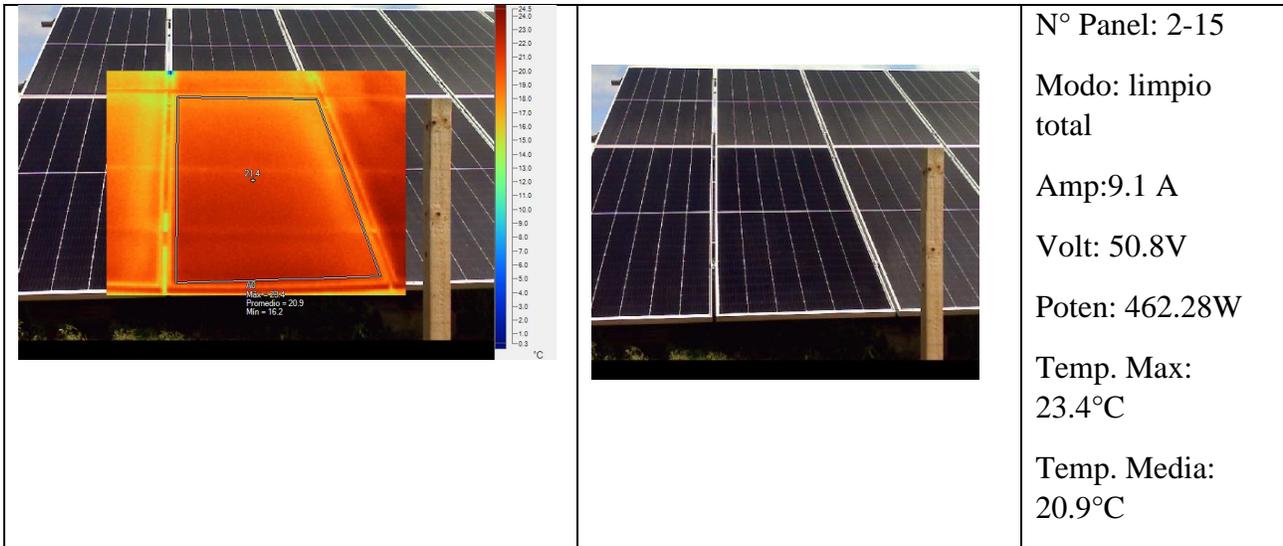
DATOS DE MUESTRA soiling 4

Muestra N°11			
Fecha de muestra	12-10-22	Temp. Pronostico	17° C @ 3:00 pm
Hora de la muestra	3:00 pm	Temp. Muestra	15.3 °C
Radiación pronostico	512W/m2@3:00pm	Velocidad de viento	12 km/h
Radiación de muestra	562 W/m2@3:00pm	Horómetro inversor	6319 hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

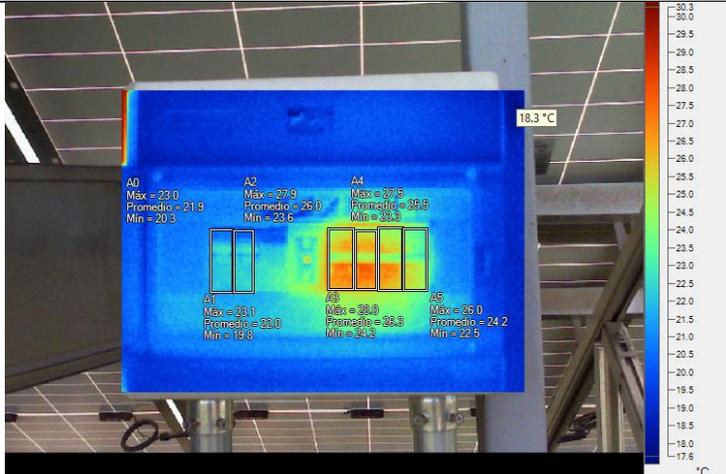
*ensuciamiento natural de 1 días

Imagen IR	Imagen libre	Datos
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 8.8A</p> <p>Volt: 51.7 V</p> <p>Poten: 454.96W</p> <p>Temp. Max: 26°C</p> <p>Temp. Media: 24°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 8.9A</p> <p>Volt: 51.7V</p> <p>Poten: 460.13W</p> <p>Temp. Max: 27°C</p> <p>Temp. Media: 24.6°C</p>

Anexos



Tipo de equipo	Elementos eléctricos	Instrumentos de medición	Fluke TI10
Ubicación	Universidad de Talca, Curico. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	Disyuntores: hasta 40°C Cableado: 4mm 70°C Conectores: no especificado
Emisividad (ε)	0.95	Unidades de temperatura	°C
Elementos totales	104 conectores a paneles 6 disyuntores 8 cables de inversor		

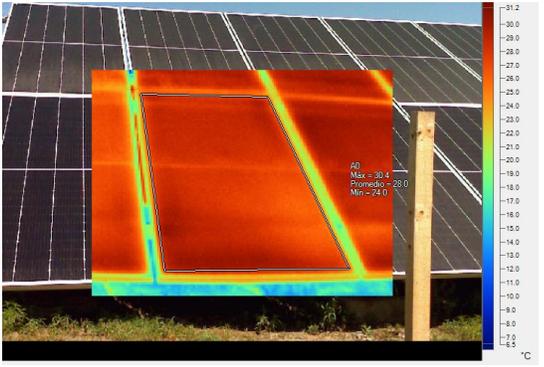
Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos
	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° max 23°C</p> <p>N°2: A1; T° max 23.1°C</p> <p>N°3: A2; T° max 27.9°C</p> <p>N°4: A3; T° max 28°C</p> <p>N°5: A4; T° max 27.5°C</p> <p>N°6: A5; T° max 26 °C</p>

	<p>Elemento: conectores a inductor</p> <p>N°1: A0; T° max 21.9°C</p> <p>N°2: A1; T° max 22.9°C</p> <p>N°3: A2; T° max 21.7°C</p> <p>N°4: A3; T° max 21.6°C</p> <p>N°5: A4; T° max 21.8°C</p> <p>N°6: A5; T° max 21.9 °C</p> <p>N°7: A6; T° max 21.6 °C</p> <p>N°8: A7; T° max 21.7 °C</p>
	<p>Elemento: conector a panel</p> <p>N°1: A0; T° max 28.7</p> <p>No existe variación en temperaturas en los demás conectores.</p>

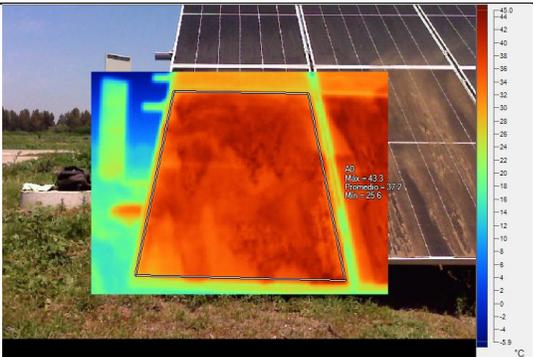
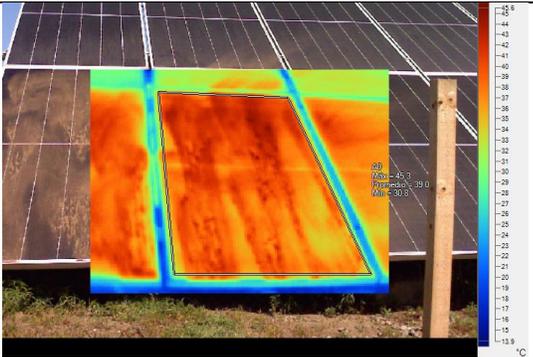
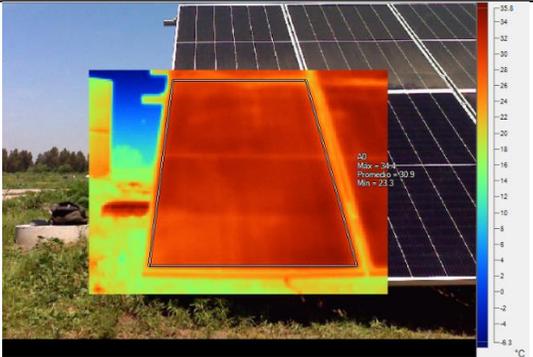
DATOS DE MUESTRA soiling 5

Muestra N°12			
Fecha de muestra	17-10-22	Temp. Pronostico	22° C @ 1:00 pm
Hora de la muestra	1:30 pm	Temp. Muestra	15.6 °C
Radiación pronostico	650W/m2@1:00pm	Velocidad de viento	4 km/h
Radiación de muestra	638 W/m2@1:30pm	Horómetro inversor	6377 hrs
Encargado de muestra	Cristobal A. Olave Miño		

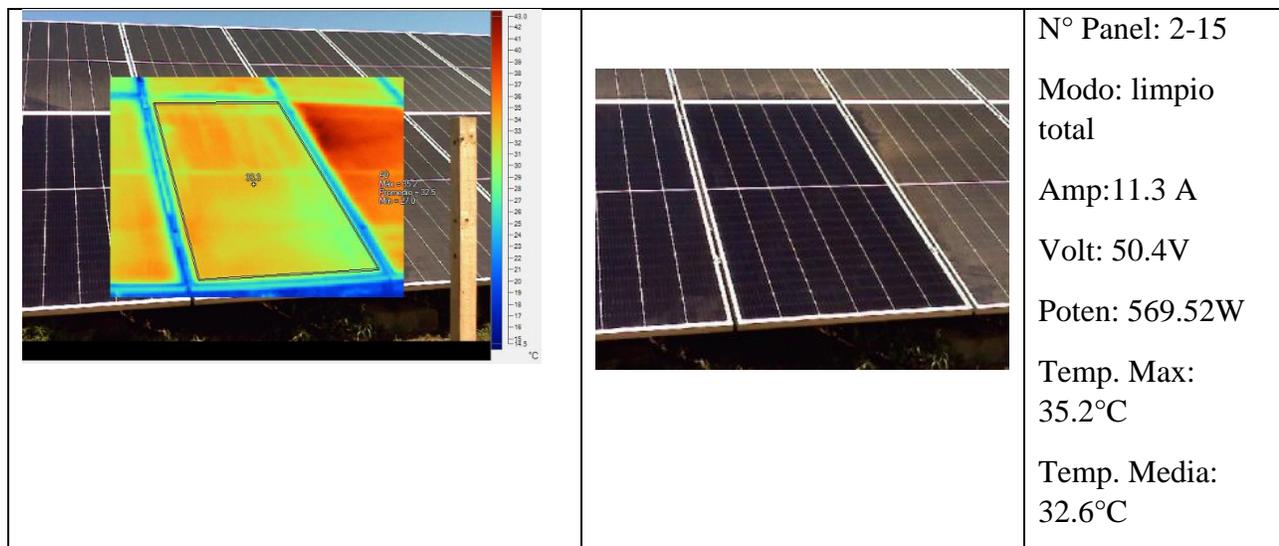
*ensuciamiento natural de 5 días

Imagen IR	Imagen libre	Datos
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 11.3A</p> <p>Volt: 50V</p> <p>Poten: 565W</p> <p>Temp. Max: 29.7°C</p> <p>Temp. Media: 26.7°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling natural</p> <p>Amp: 11.3A</p> <p>Volt: 49.8V</p> <p>Poten: 562.74W</p> <p>Temp. Max: 30.4°C</p> <p>Temp. Media: 28.6°C</p>

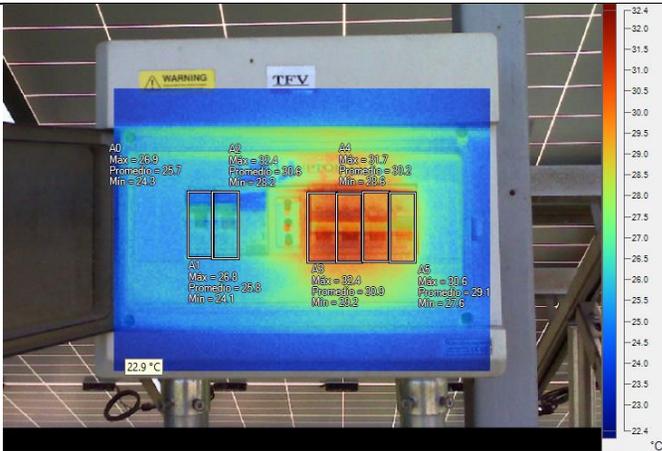
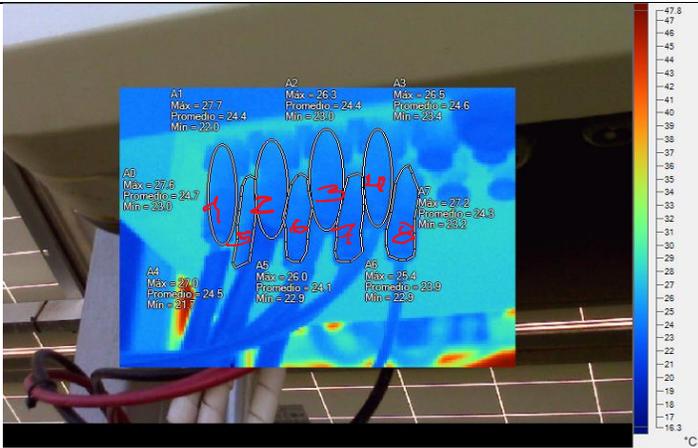
Anexos

		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 7.5 A</p> <p>Volt: 49.1V</p> <p>Poten: 368.25W</p> <p>Temp. Max: 43.3°C</p> <p>Temp. Media: 37.2°C</p>
		<p>N° Panel: 2-15</p> <p>Modo: soiling abrasivo</p> <p>Amp: 7.9 A</p> <p>Volt: 49V</p> <p>Poten: 387.1W</p> <p>Temp. Max: 45.3°C</p> <p>Temp. Media: 39°C</p>
		<p>N° Panel: 2-14</p> <p>Modo: limpio total</p> <p>Amp: 11.26 A</p> <p>Volt: 50.5V</p> <p>Poten: 568.63W</p> <p>Temp. Max: 34.4°C</p> <p>Temp. Media: 30.9°C</p>

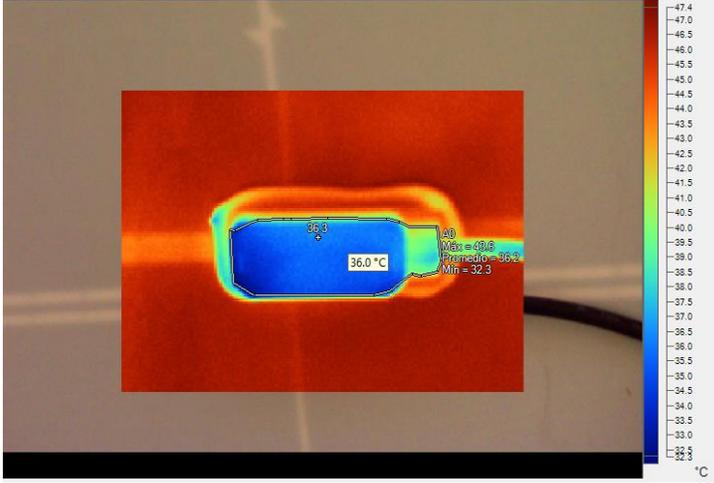
Anexos



Tipo de equipo	Elementos eléctricos	Instrumentos de medición	Fluke TI10
Ubicación	Universidad de Talca, Curico. Lat -35°, long -71.23°	Temp.nominal de trabajo	Disyuntores: hasta 40°C Cableado: 4mm 70°C Conectores: no especificado
Emisividad (ε)	0.95	Unidades de temperatura	°C
Elementos totales	104 conectores a paneles 6 disyuntores 8 cables de inversor		

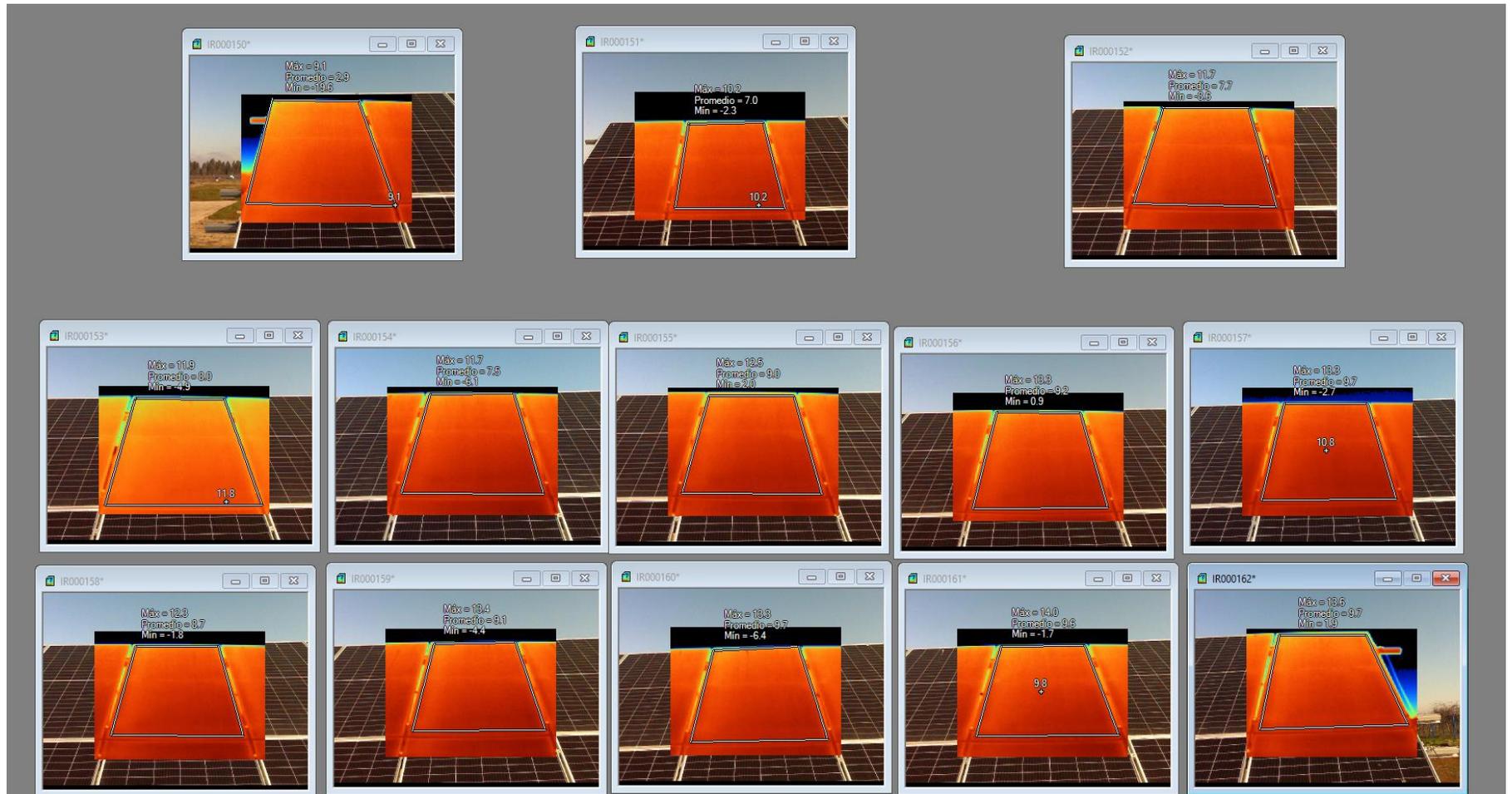
Imagen IR 50% imagen libre 50 %	Datos
 <p>IR image of a circuit breaker panel. The image shows a color-coded temperature map with a scale on the right ranging from 22.4°C to 32.4°C. Six points are marked: A0, A1, A2, A3, A4, and A5. Each point has its maximum, average, and minimum temperature values listed.</p>	<p>Elemento: disyuntor</p> <p>N°1: A0; T° max 26.9°C</p> <p>N°2: A1; T° max 26.8°C</p> <p>N°3: A2; T° max 32.4°C</p> <p>N°4: A3; T° max 32.4°C</p> <p>N°5: A4; T° max 31.7°C</p> <p>N°6: A5; T° max 30.6°C</p>
 <p>IR image of an inverter connector panel. The image shows a color-coded temperature map with a scale on the right ranging from 16.3°C to 47.8°C. Six points are marked: A0, A1, A2, A3, A4, and A5. Each point has its maximum, average, and minimum temperature values listed.</p>	<p>Elemento: conectores a inversor</p> <p>N°1: A0; T° max 27.6°C</p> <p>N°2: A1; T° max 27.7°C</p> <p>N°3: A2; T° max 26.3°C</p> <p>N°4: A3; T° max 26.5°C</p> <p>N°5: A4; T° max 27°C</p> <p>N°6: A5; T° max 26 °C</p>

Anexos

	<p>N°7: A6; T° max 25.4 °C N°8: A7; T° max 27.2 °C</p>
	<p>Elemento: conector a panel N°1: A0; T° max 43.3 No existe variación en temperaturas en los demás conectores.</p>

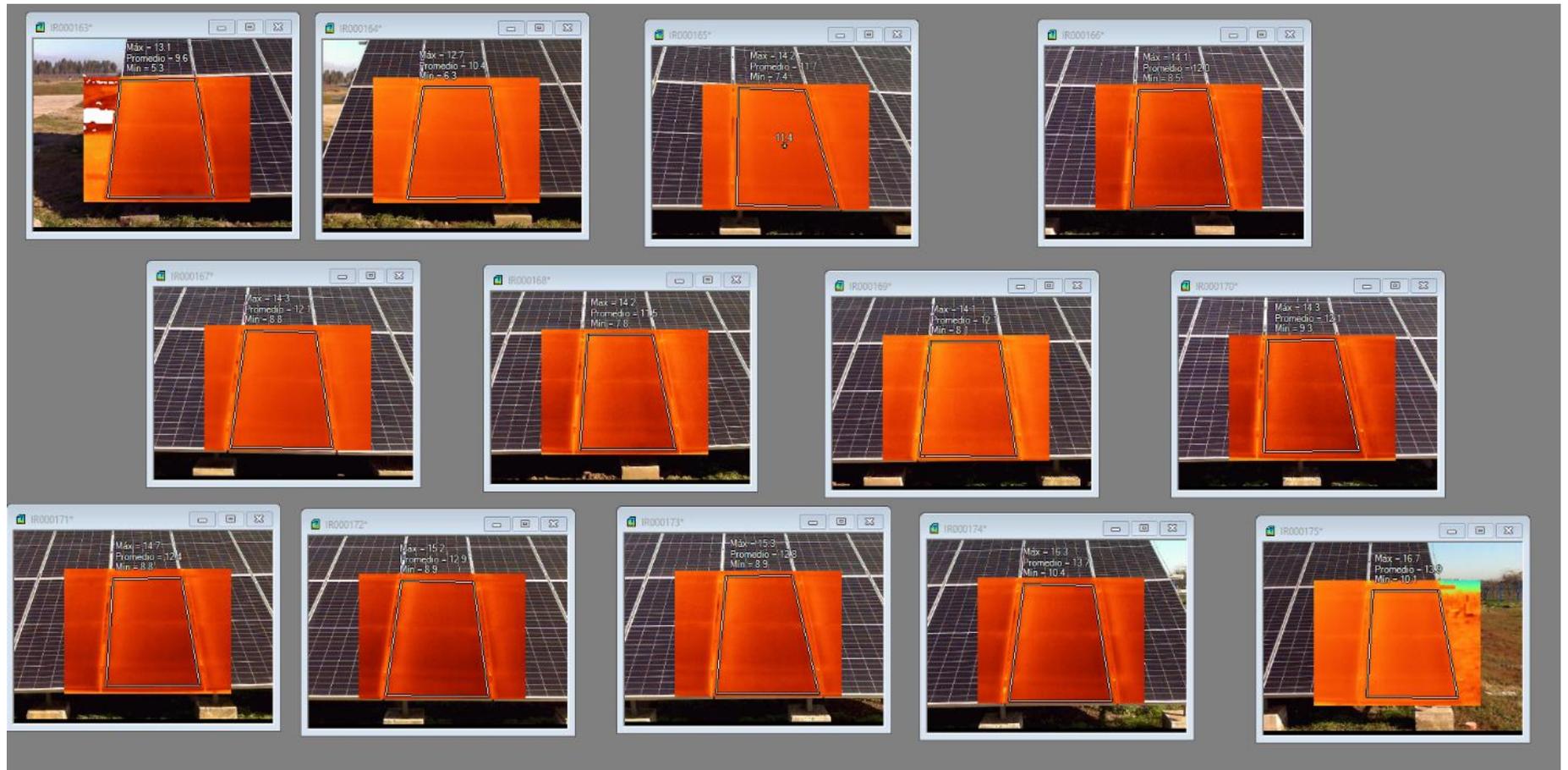
Anexos

Muestra 1_2-8-22 paneles 1-13_ PANELES PLANTA 1



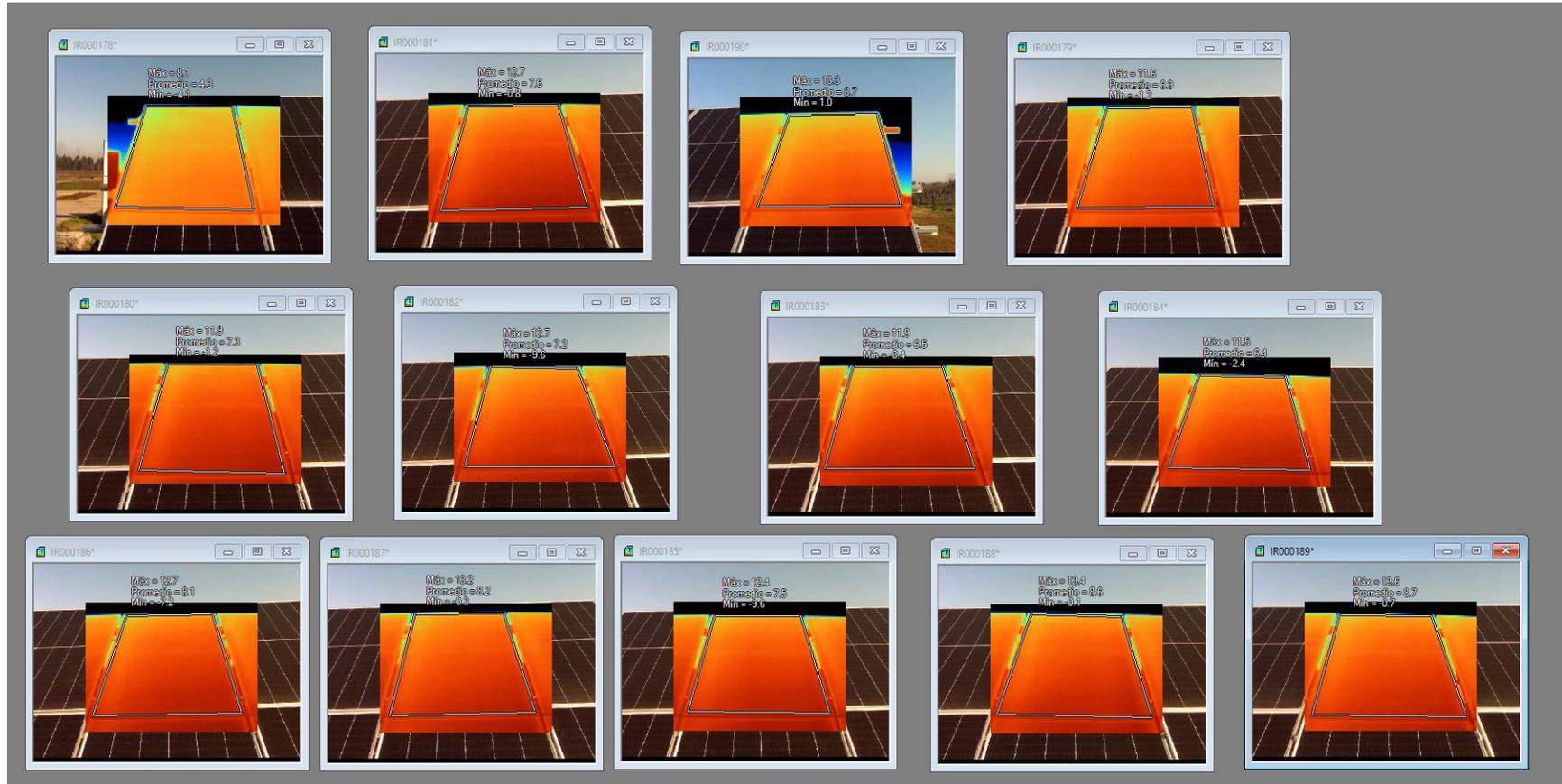
Anexos

Muestra 1_2-8-22 PANEL 14-26_ PANELES PLANTA 1



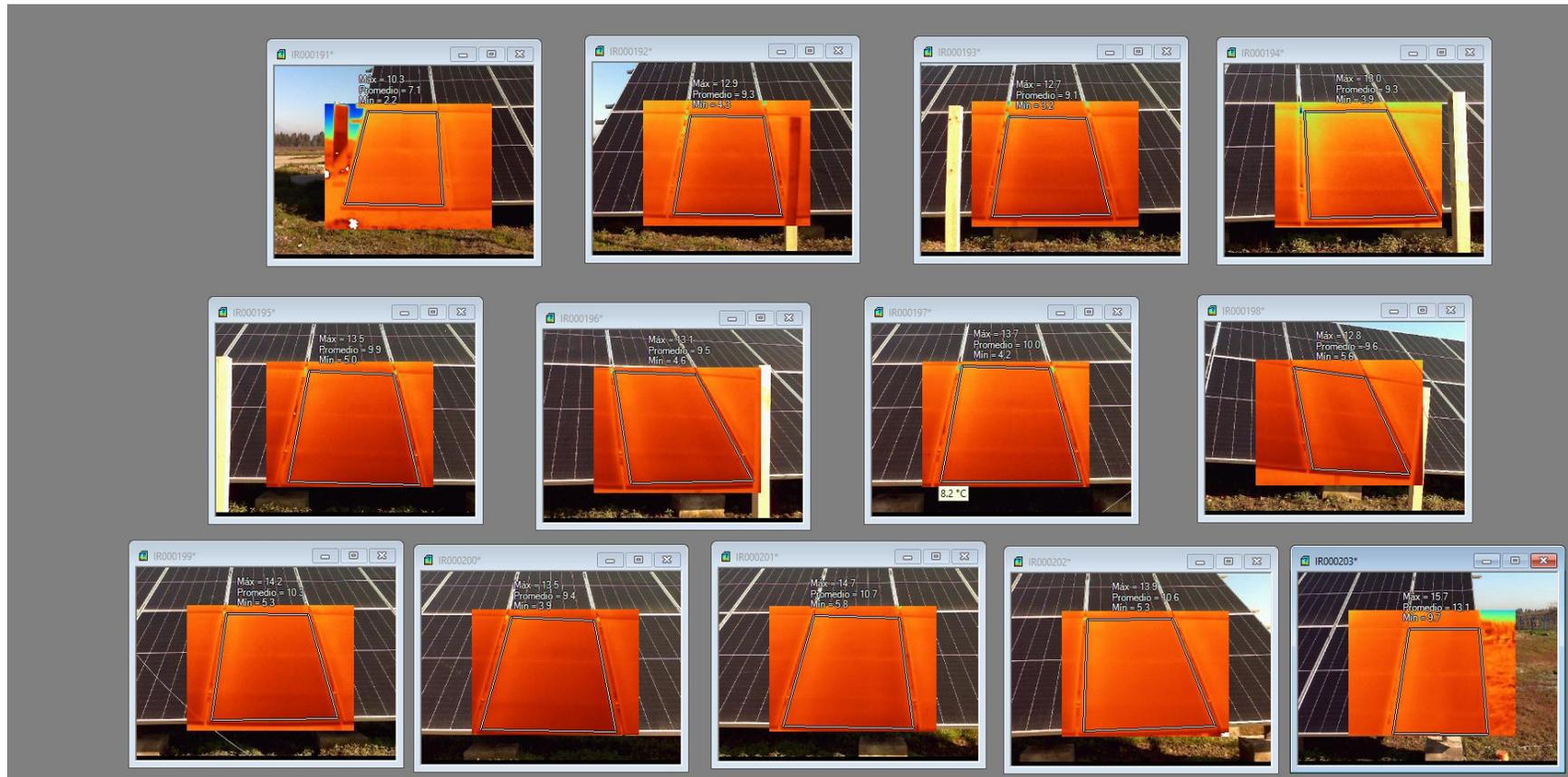
Anexos

Muestra 1_2-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 2



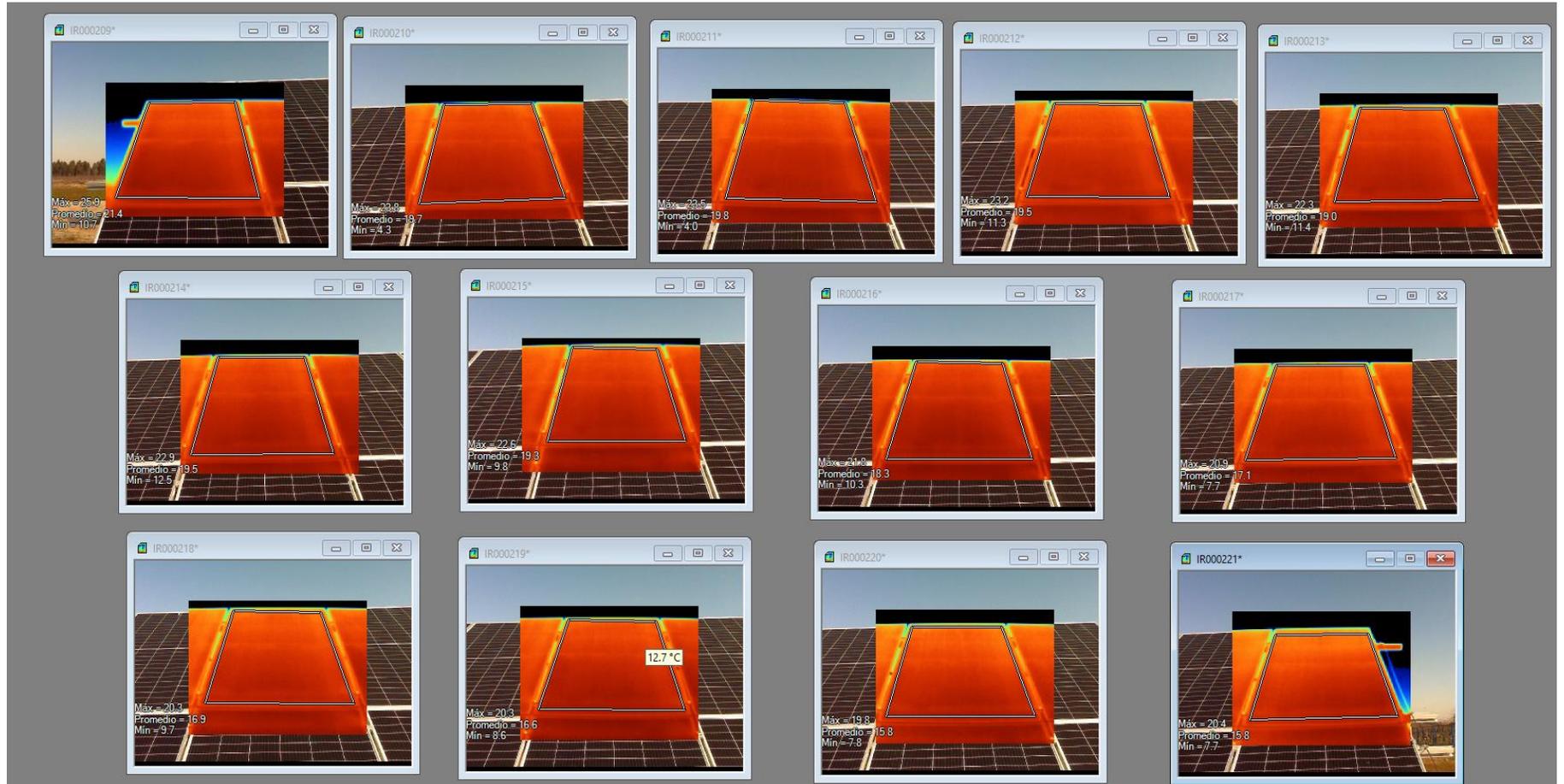
Anexos

Muestra 1_2-8-22 PANELES 14-26_ PLANTA 2



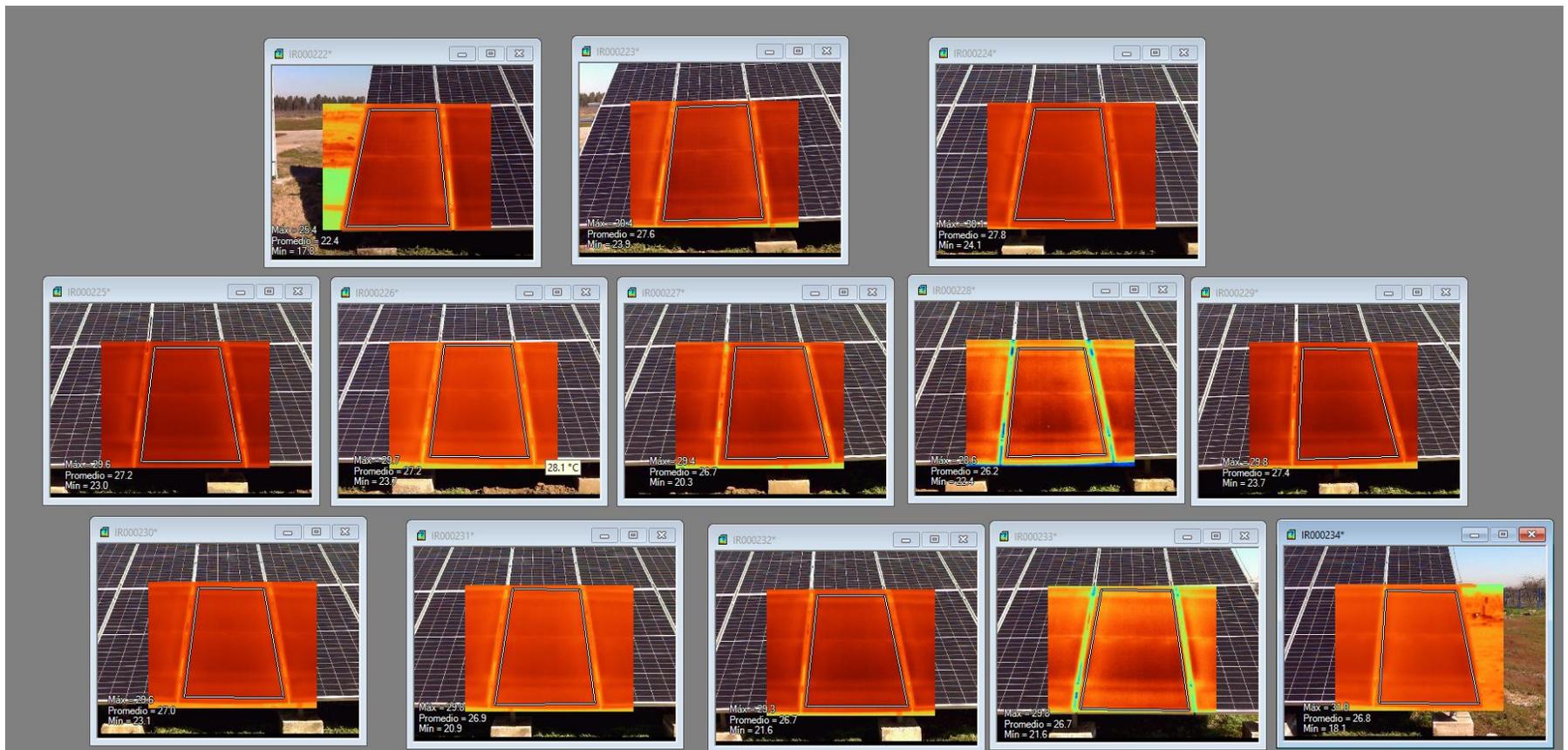
Anexos

Muestra 2_10-8-22 PANELES 1-13_ PLANTA 1



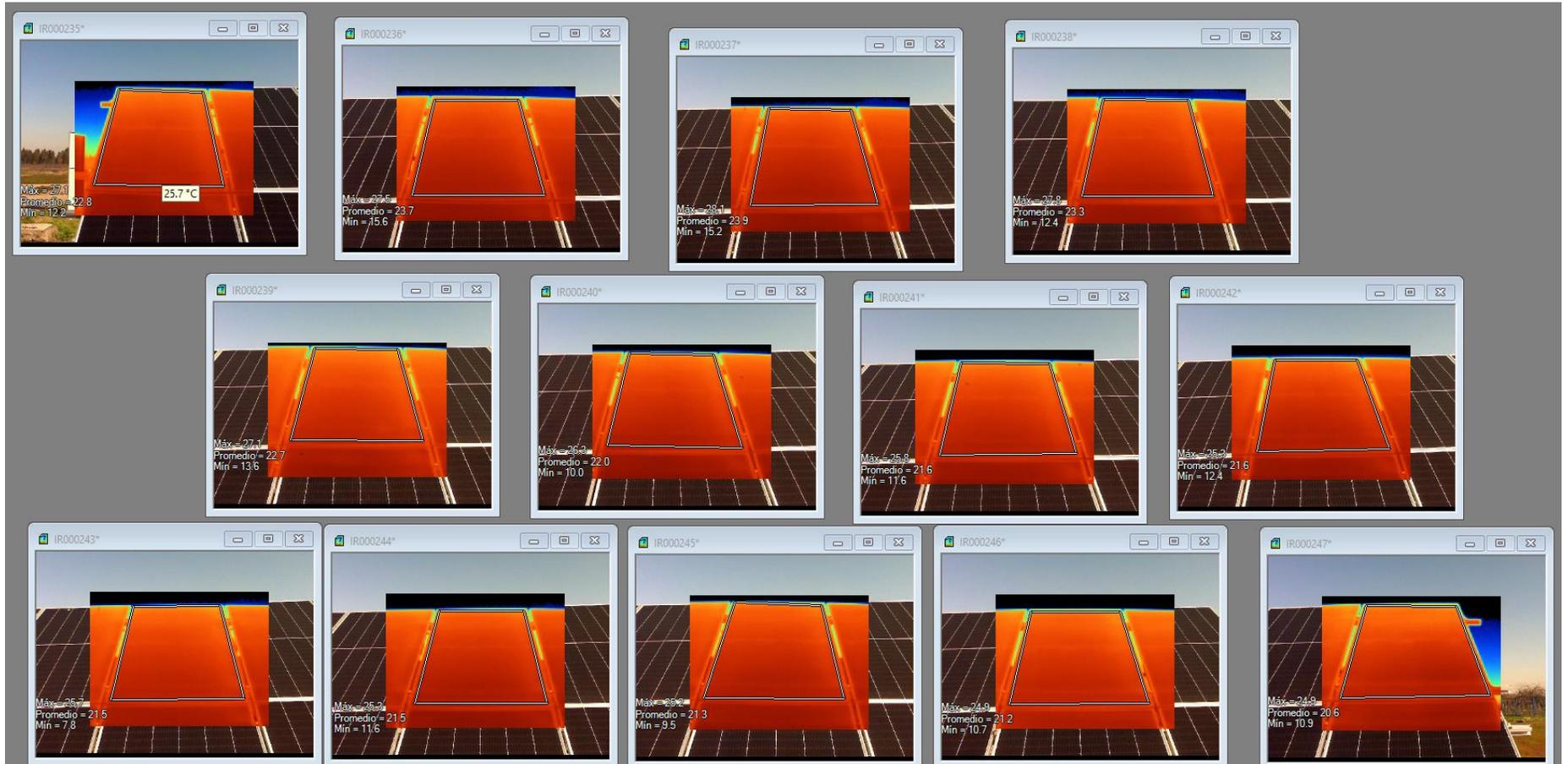
Anexos

Muestra 2_10-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 1



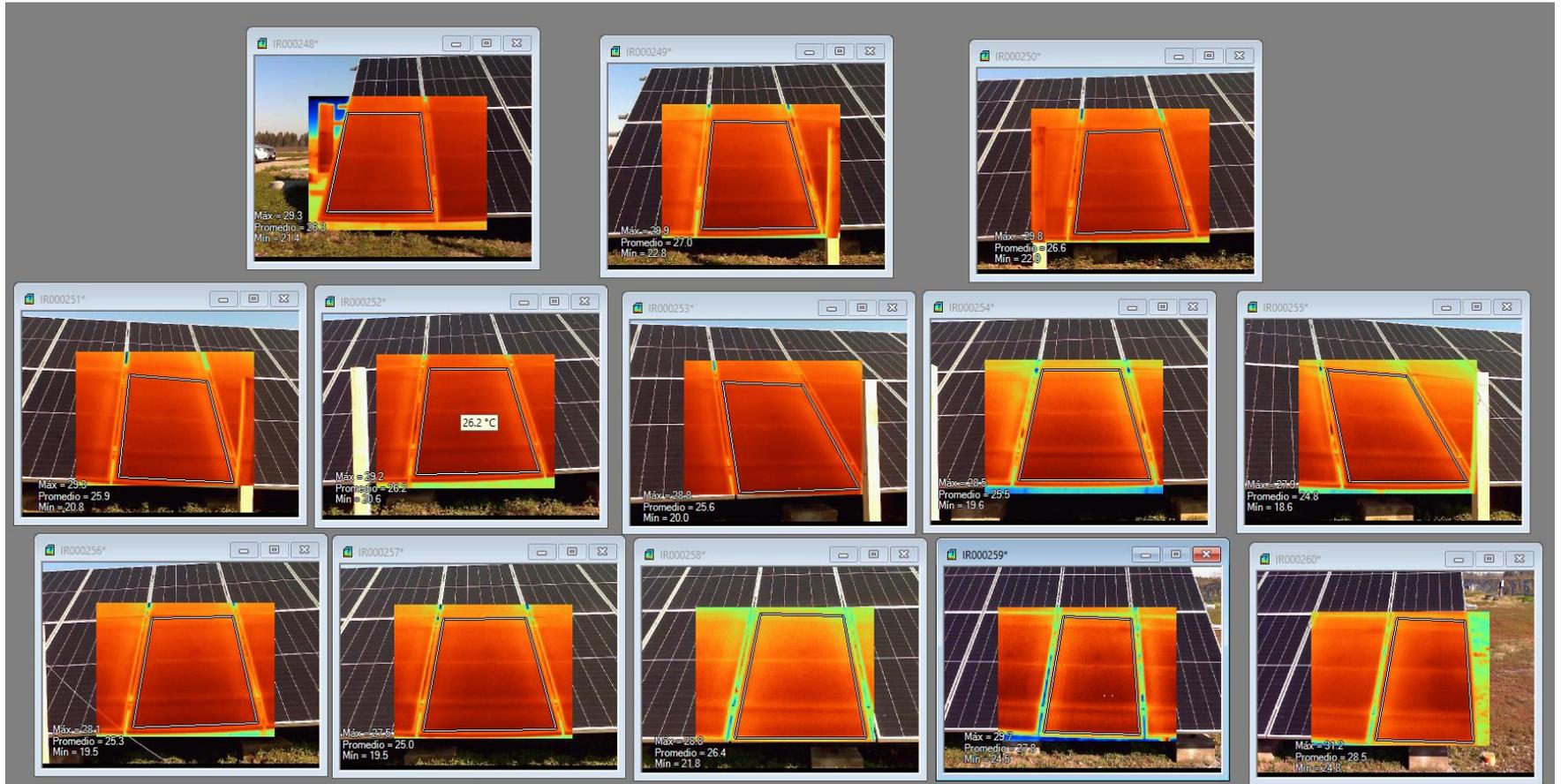
Anexos

Muestra 2_10-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 2



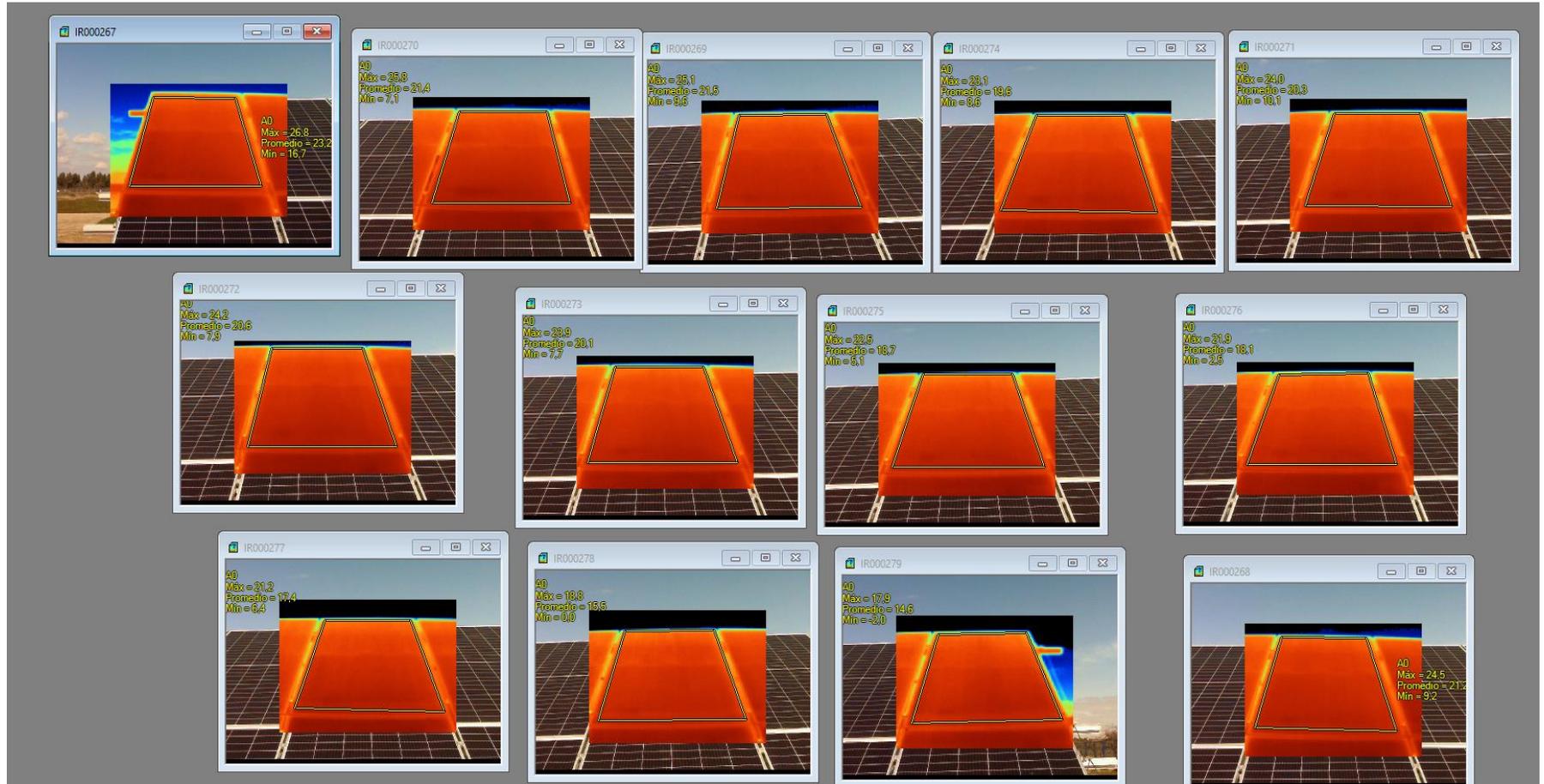
Anexos

Muestra 2_10-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 2



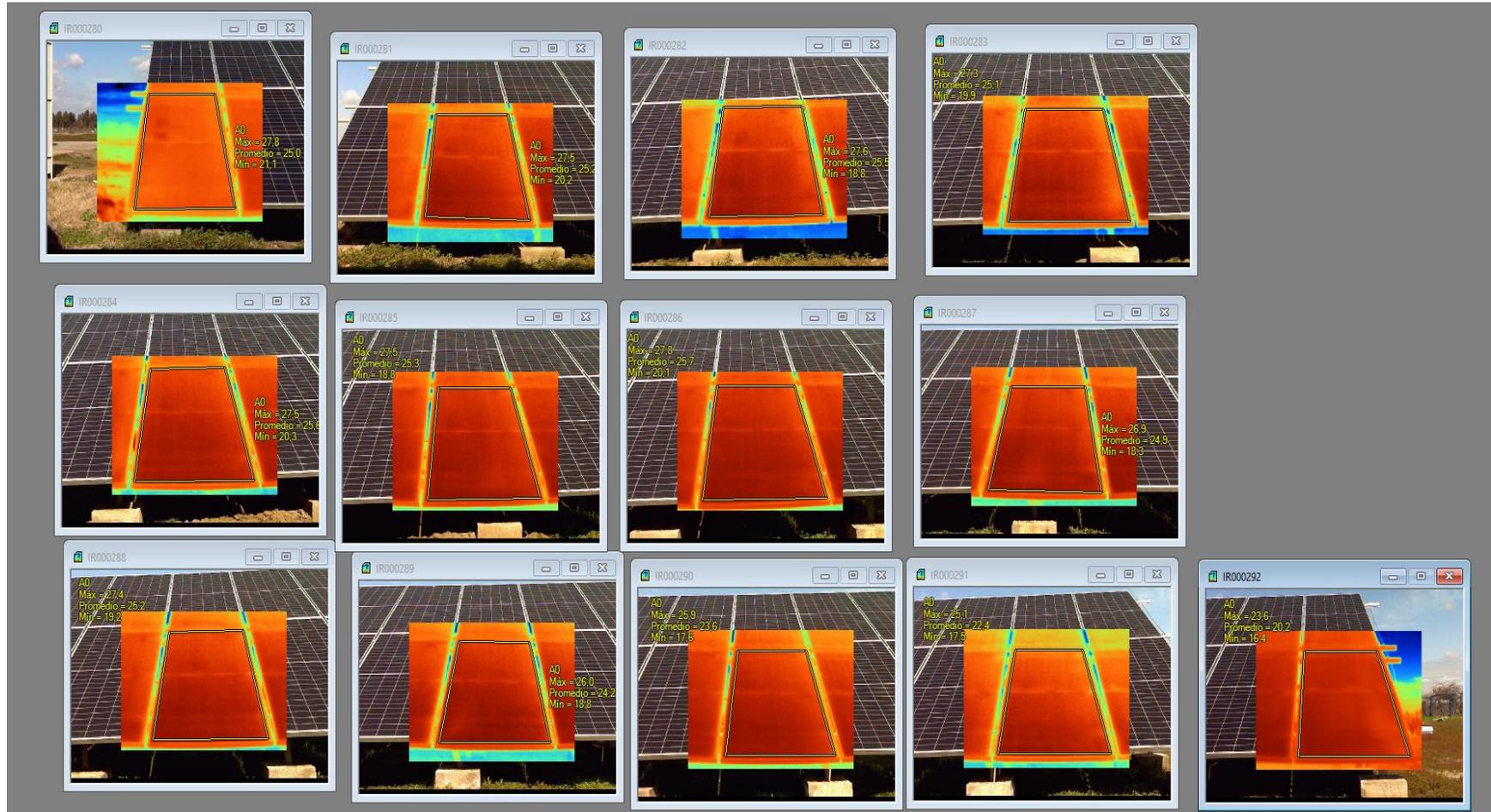
Anexos

Muestra 3_12-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 1



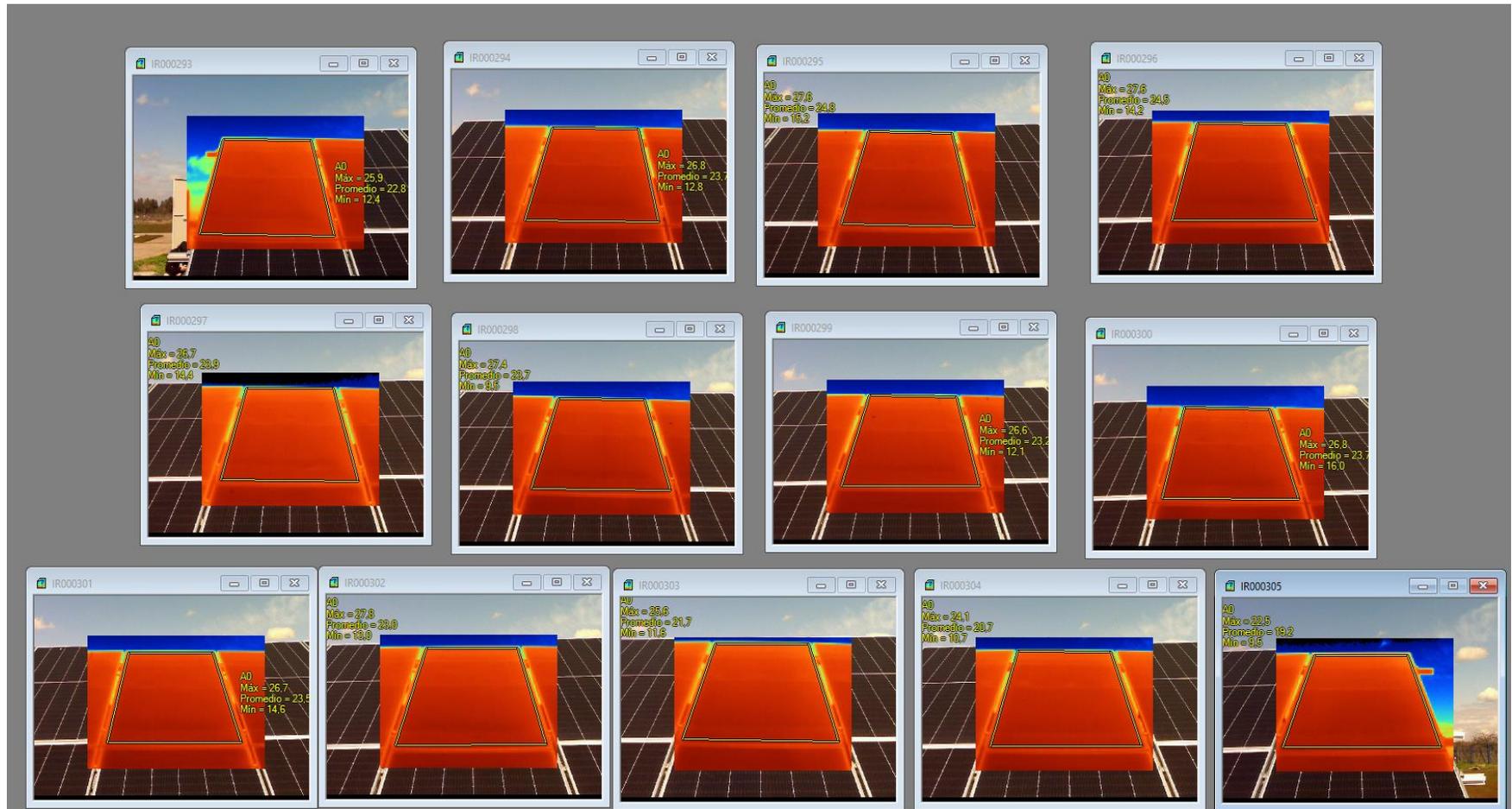
Anexos

Muestra 3_12-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 1



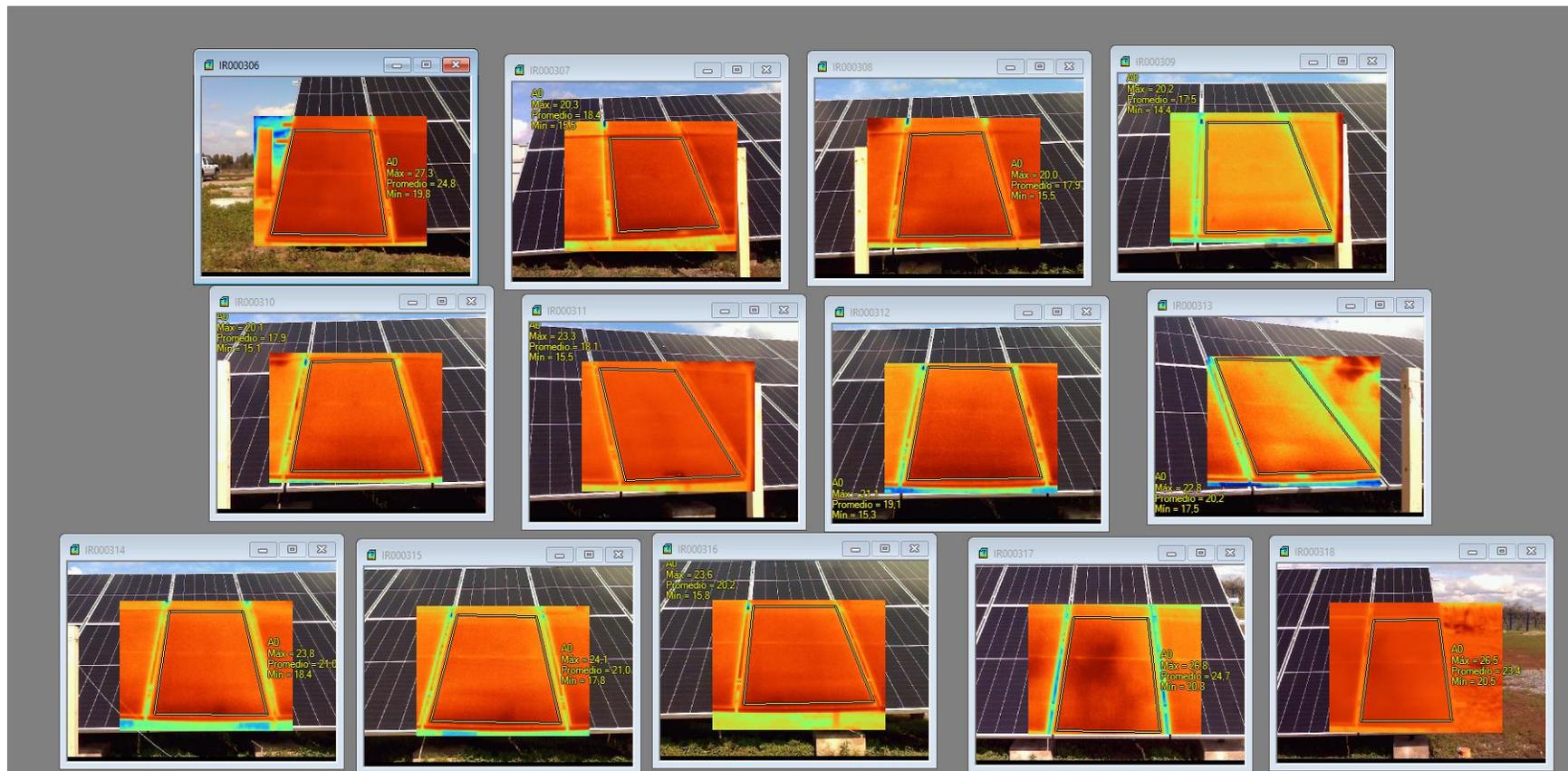
Anexos

Muestra 3_12-8-22 PANELES 1-13_ PLANTA 2



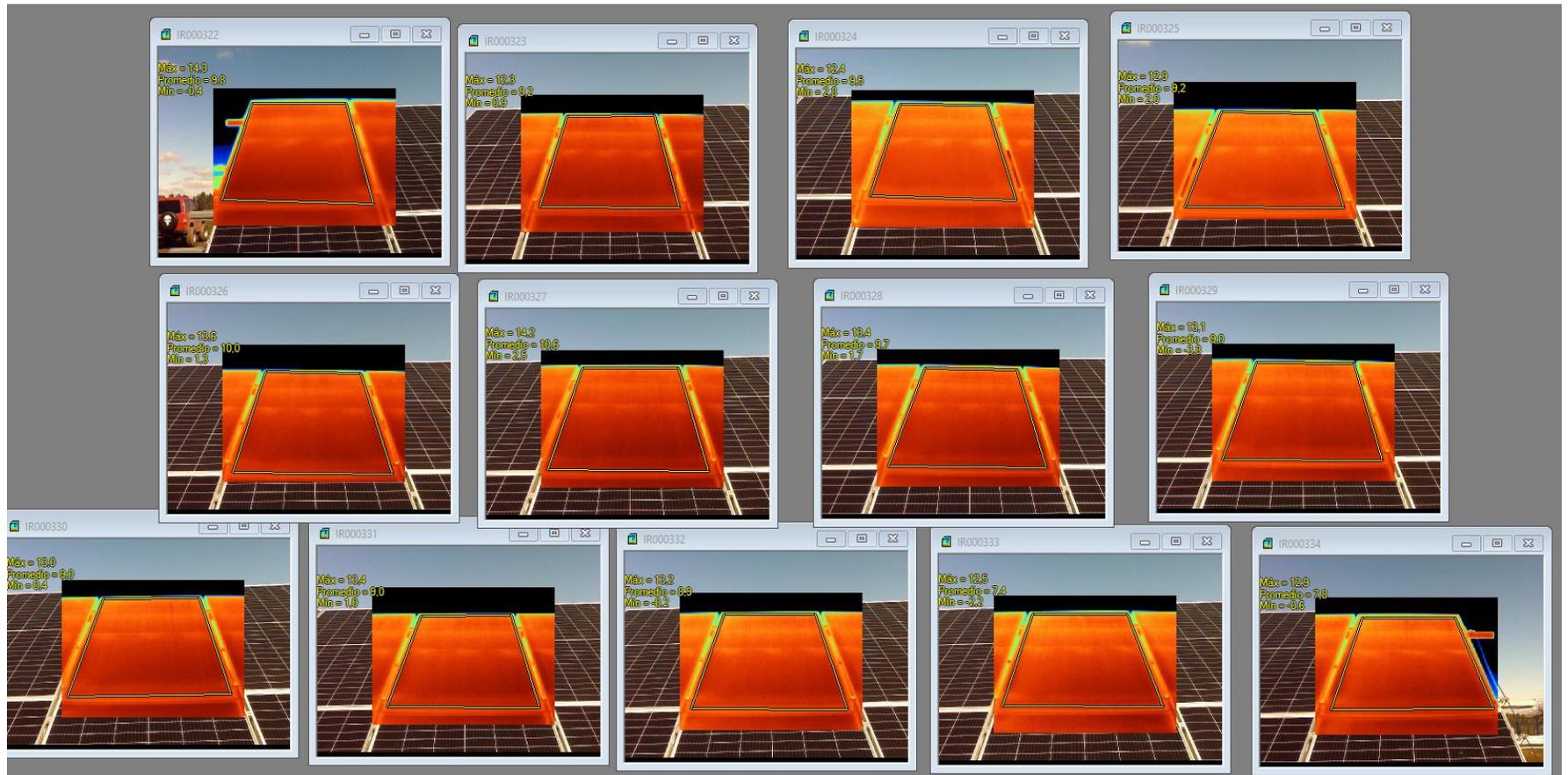
Anexos

Muestra 3_12-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 2



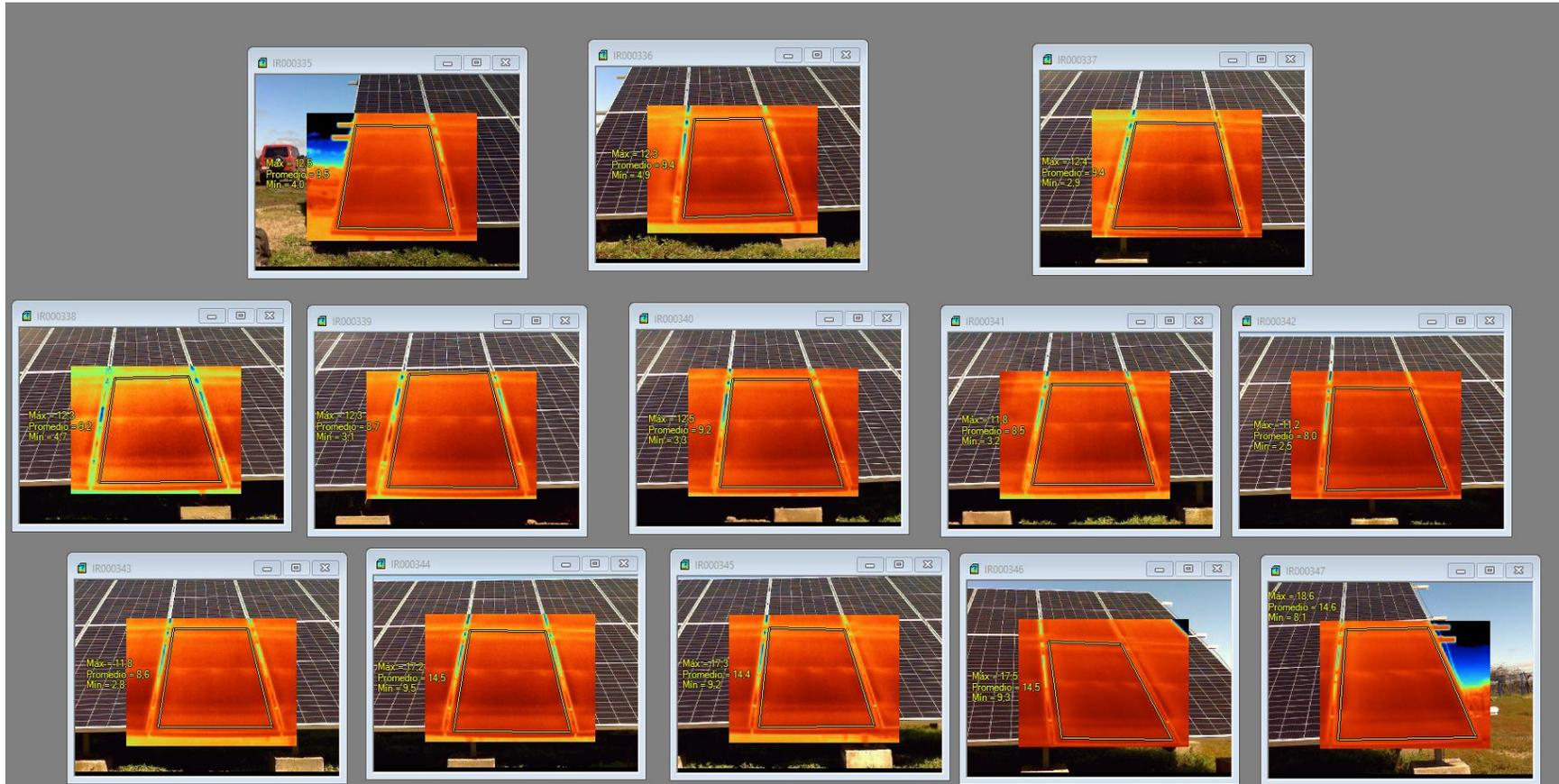
Anexos

Muestra 4_17-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 1



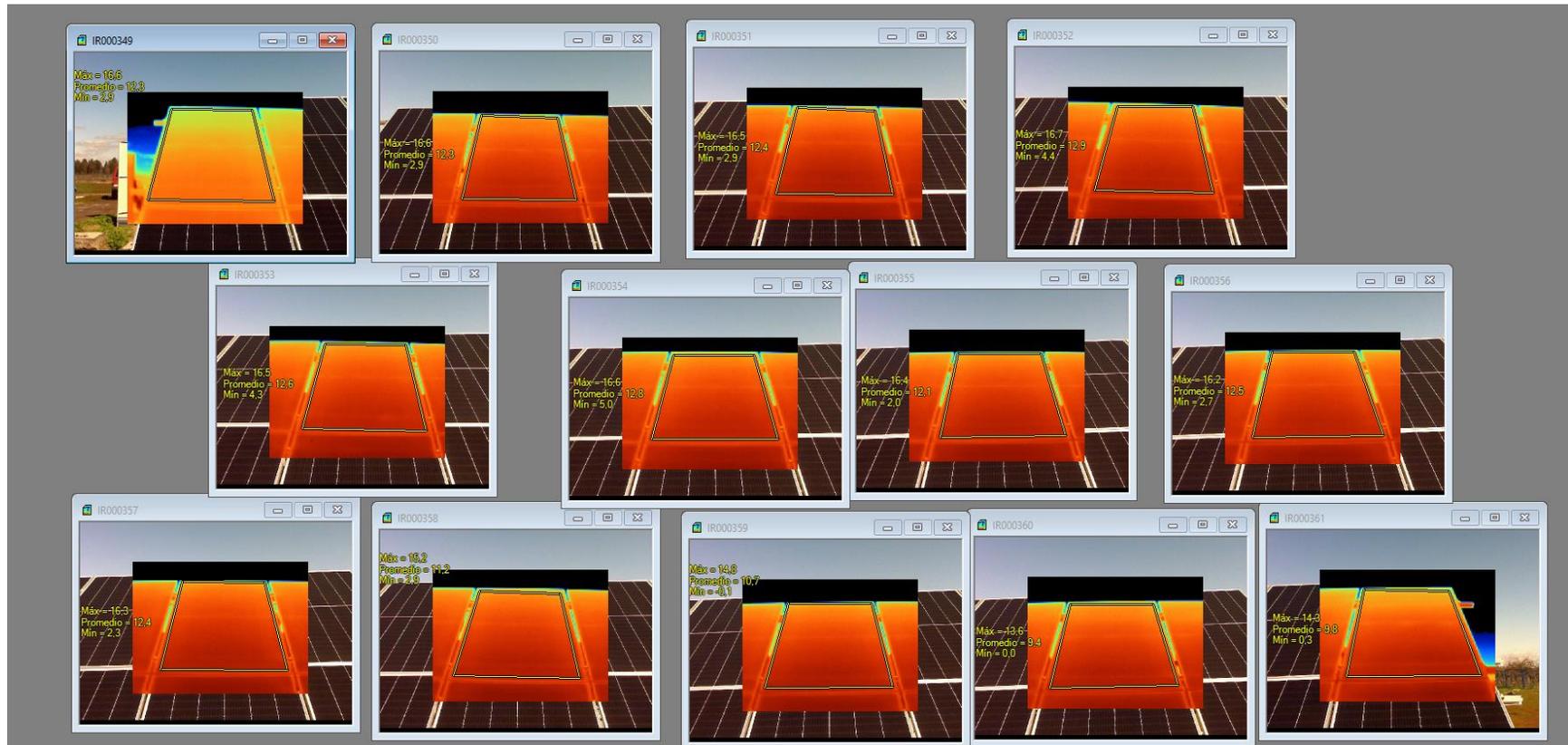
Anexos

Muestra 4_17-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 1



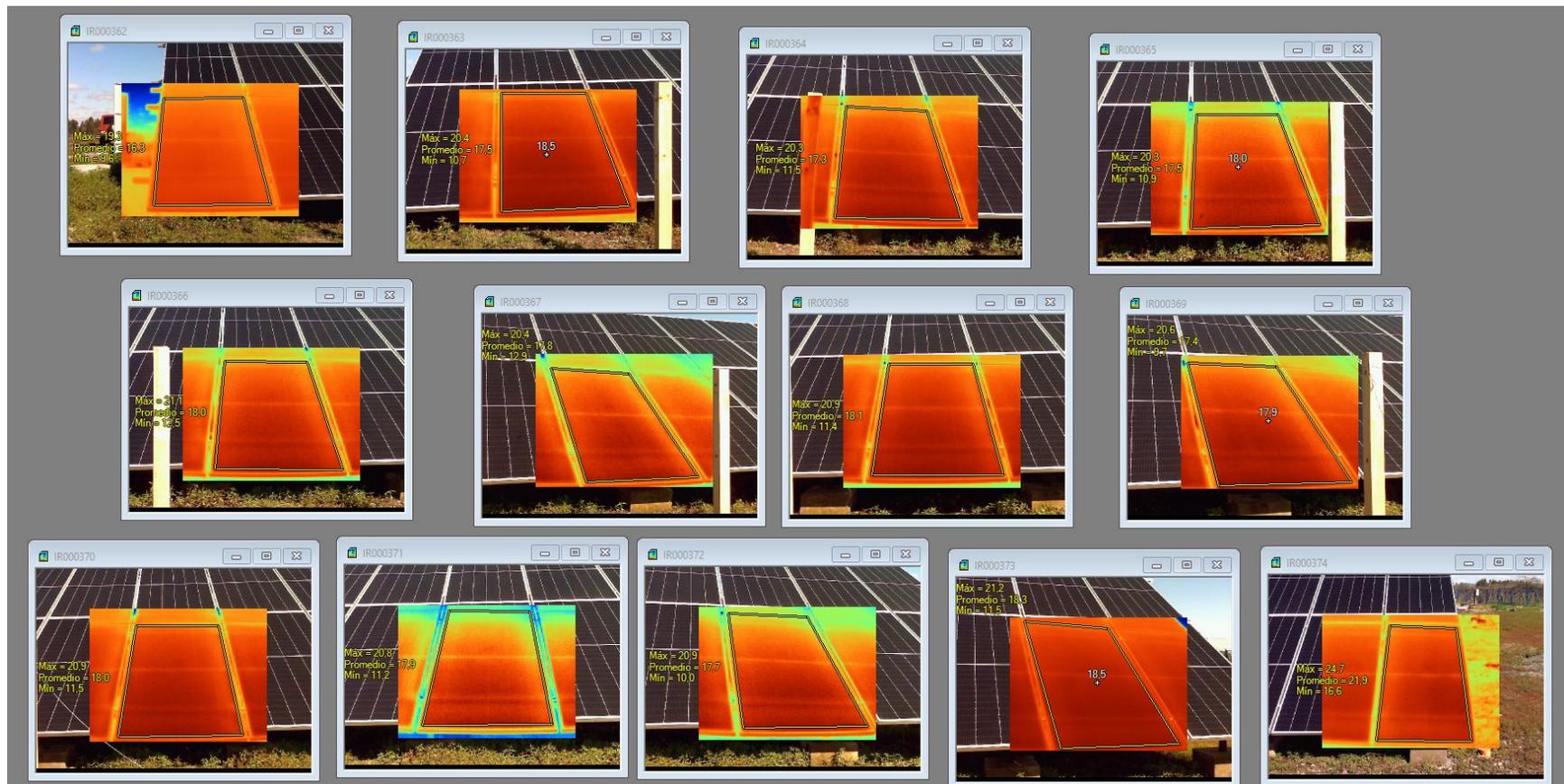
Anexos

Muestra 4_17-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 2



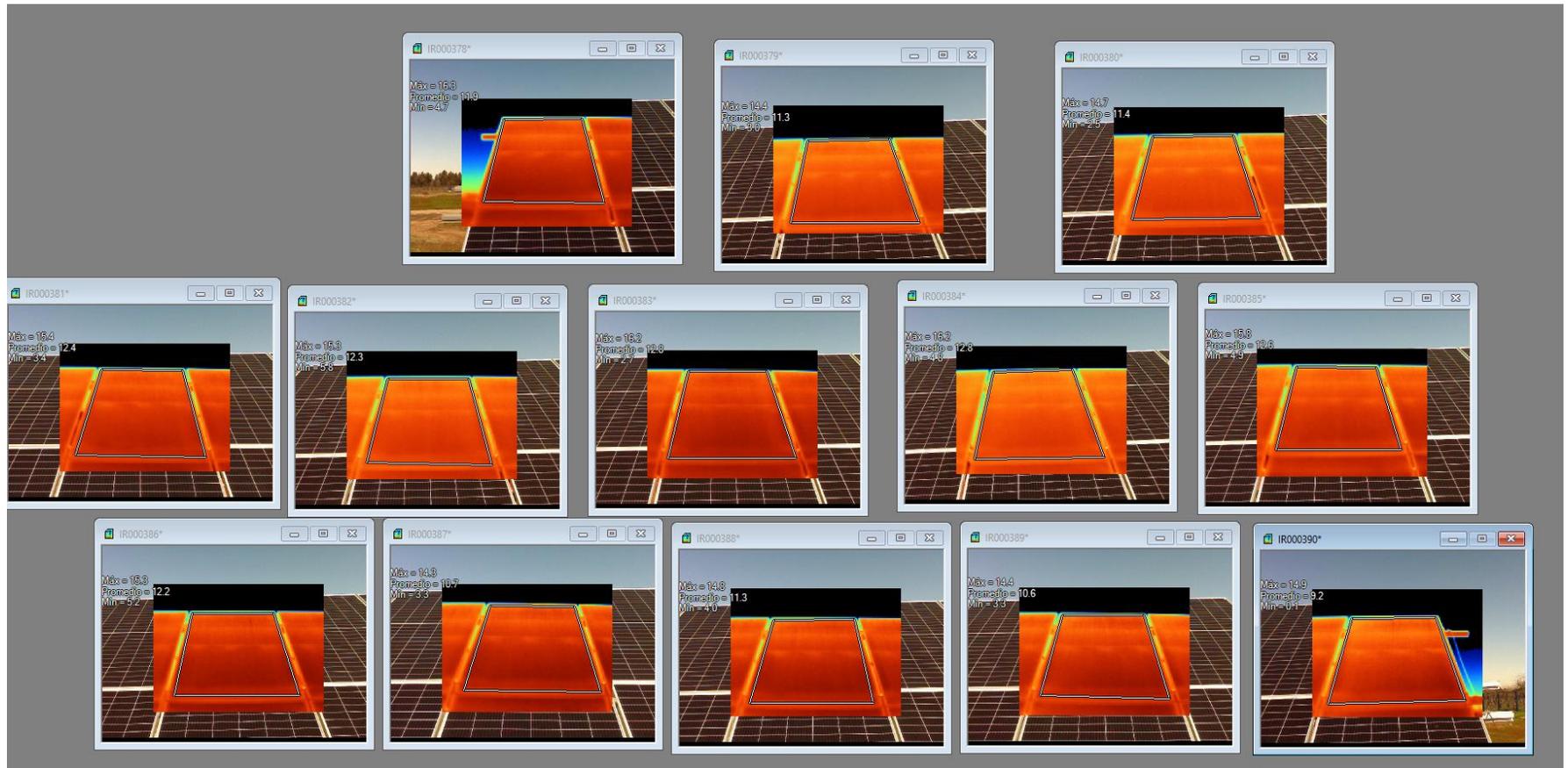
Anexos

Muestra 4_17-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 2



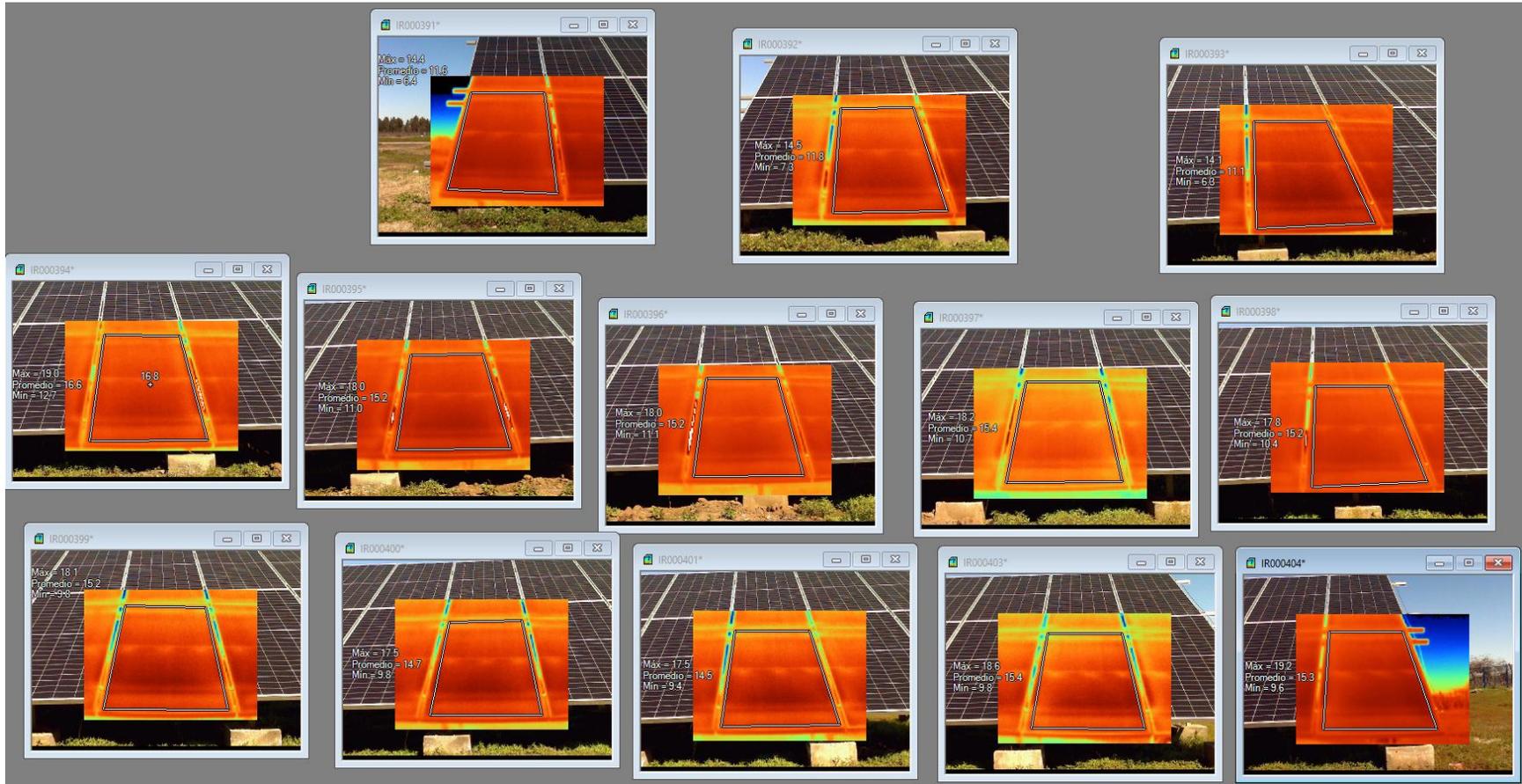
Anexos

Muestra 5_18-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 1



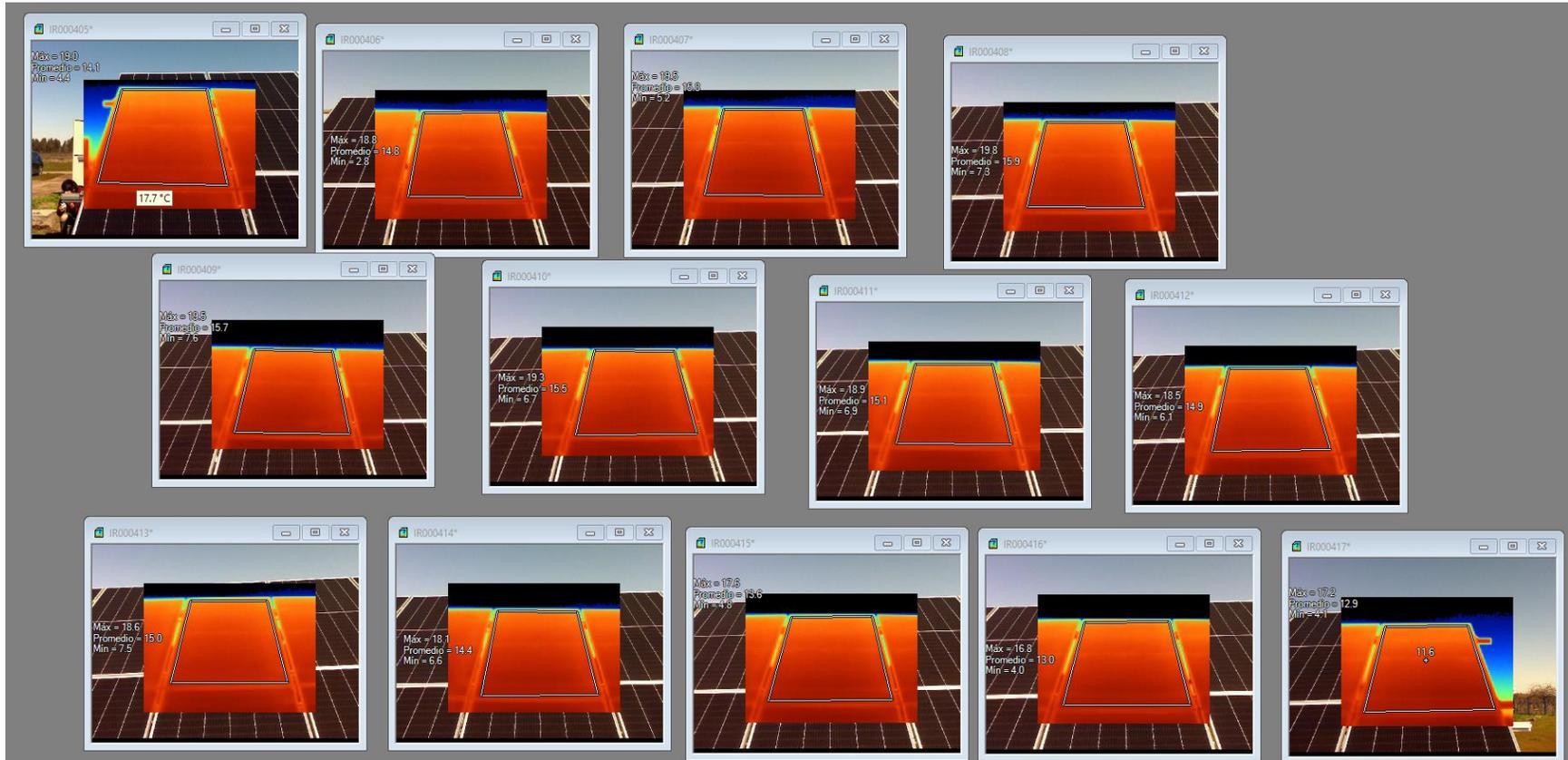
Anexos

Muestra 5_18-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 1



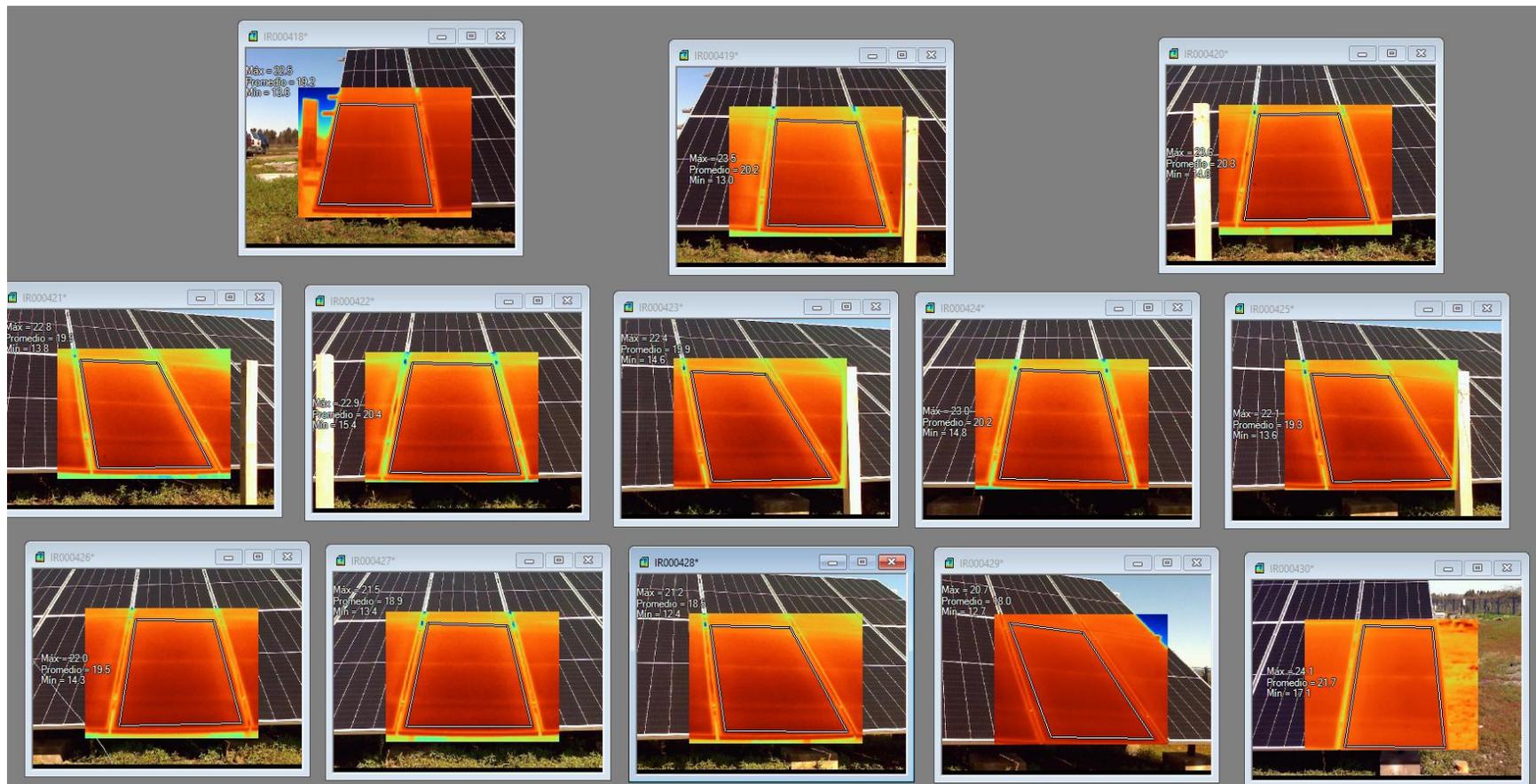
Anexos

Muestra 5_18-8-22 PANELES 1-13_PLANTA 2



Anexos

Muestra 5_18-8-22 PANELES 14-26_PLANTA 2



**ANEXO 4: CÓDIGO DE EJECUCIÓN EN MATHLAB. AUTOR:
ING. HÉCTOR TORRES ORTEGA**

```
clc
borrar todo
cerrar todo

C = 25 ;
k = 1,38e - 23 ; _
T = 273,15 + C ;
q = 1,6e - 19 ; _
I0 = 50e-9 ;
vpv = 0,1 ;
Vt = k * T / q ;
Rs = 1 ;
Rsh = 100 ;
Vd = 0 : 1e-3 : 0,5 ;
s = tamaño ( Vd );
I = Ipv ;
para n = 1 : s ( 2 )
    para i = 1 : 10
        Id1 = Ipv - I0 * exp (( Vd ( n ) + I ( i ) * Rs ) / Vt ) - (( Vd ( n ) + I ( i ) * Rs ) / Rsh ) - I ( i );
        dId1 = 0 - ( Rs / Vt ) * I0 * exp (( Vd ( n ) + I ( i ) * Rs ) / Vt ) - ( Rs / Rsh ) - 1 ;
        yo ( yo + 1 ) = yo ( yo ) - Id1 / dId1 ;
    final
    Id ( n ) = I ( fin );
final

[ valt , post ] = min ( sqrt ( Id .* Id ));
Id = Id ( 1 : publicación );
Vd = Vd ( 1 : publicación );
```

Anexos

$$P = Vd .* Id ;$$

trama (Vd , Id , Vd , P)

$$[val , pos] = \max (P);$$

$$Im\acute{a}x = Id (pos);$$

$$Vm\acute{a}x = Vd (pos);$$

$$Pm\acute{a}x = P (pos);$$

$$\text{pendiente1I} = [Id (1) Id (150)];$$

$$\text{pendiente1V} = [Vd (1) Vd (150)];$$

$$\text{pendiente2I} = [Id (final - 80) Id (final)];$$

$$\text{pendiente2V} = [Vd (final - 80) Vd (final)];$$

$$\text{pendiente3I} = [0 Imax];$$

$$\text{pendiente3V} = [0 Vmax];$$

espera _

trazar (pendiente1V , pendiente1I , ' ancho de línea ' , 2)

trazar (pendiente2V , pendiente2I , ' ancho de línea ' , 2)

trazar (pendiente3V , pendiente3I , ' ancho de línea ' , 2)

rejilla en

$$Rshc = - 1 / ((\text{pendiente1I} (2) - \text{pendiente1I} (1)) / (\text{pendiente1V} (2) - \text{pendiente1V} (1)));$$

$$Rsc = - 1 / ((\text{pendiente2I} (2) - \text{pendiente2I} (1)) / (\text{pendiente2V} (2) - \text{pendiente2V} (1)));$$

Anexos

$RLc = 1 / ((\text{pendiente3I} (2) - \text{pendiente3I} (1)) / (\text{pendiente3V} (2) - \text{pendiente3V} (1)));$

título (' Curva IV Celda Solar ')

xlabel (' Voltaje ')

ylabel (' Corriente/Potencia ')

leyenda (' IV Curva ' , ' Potencia ' , [' Rsh= ' num2str (Rshc) ' Ohmios '],...

[' Rs= ' num2str (Rsc) ' Ohmios '],...

[' RL= ' num2str (RLc) ' Ohmios '])

ANEXO 5: MUESTRA DE ANÁLISIS PRIMERA PARTE EN BARRIDOS Y FALLAS.

BARRIDOS muestra 3								
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	volt	amp´	potn	pon real	% inef
2-26	24,1	27,1	320	51,66	7,2	371,952	286,403	77%
1-24	32,3	35,7	321	46,9	4,5	211,05	162,5085	44%
Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)	poten real	prom.p			
2-14	50,6	9,4	475,64	366,2428	371,2524			
2-15	51,6	9,47	488,652	376,262				

BARRIDOS muestra 4								
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	volt	amp´	potn	pon real	% inef
1-26	20,4	24,3	375	51,8	8,4	435,12	335,0424	93%
Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)	poten real	prom.p			
2-14	52,2	8,92	465,624	358,5305	360,1671			
2-15	52,5	8,95	469,875	361,8038				

BARRIDOS muestra 5								
N° PANEL	TEMP.PROM °C	TEMP. MAX °C	IR DE MUESTRA	volt	amp´	potn	pon real	% inef
2-26	22,5	27,2	432	52,1	9,5	494,95	381,1115	106%
2-25	23,3	26,2	431	52,1	9,44	491,824	378,7045	105%
Paneles sanos	voltaje (V)	amperaje (A)	potencia (W)	poten real	prom.p			
2-14	52,2	8,92	465,624	358,5305				
2-15	52,5	8,95	469,875	361,8038	360,1671			

ANEXO 6: DATOS AJUSTADOS DE SOILING CON ANÁLISIS.

Muestras soiling 2: 8 días ensuciado natural

estado ensuciado natural 8 días															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	675	2:00	16,7	12	31,9	28,6	50,5	10,96	553,48	426,1796	951,39946	332,7396691	28,1%	28,2%	21,9%
2-15	675	2:00	16,7	12	32,2	30	50,3	10,99	552,797	425,65369	953,3641001	331,7721369	28,0%	28,2%	21,8%
estado de ensuciado abrasivo															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	675	2:00	16,7	12	43,9	36,5	48,6	5,23	254,178	195,71706	452,28599	153,7516598	12,9%	13,0%	10,1%
2-15	675	2:00	16,7	12	45,4	39,2	48,5	5,1	247,35	190,4595	440,4759766	148,2625663	12,5%	12,6%	9,8%
estado limpio total															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	675	2:00	16,7	12	30,8	28,3	50,7	11,43	579,501	446,21577	992,3411751	347,4275665	29,4%	29,5%	22,9%
2-15	675	2:00	16,7	12	30,8	29,2	50,3	11,4	573,42	441,5334	989,3098991	345,2624868	29,1%	29,2%	22,7%

Muestras soiling 3: 6 días ensuciado natural

estado ensuciado natural 6 días															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	645	2:00	21,1	9	36,1	32,7	49,5	10,95	542,025	417,35925	948,6676375	326,96239	28,8%	28,9%	22,5%
2-15	645	2:00	21,1	9	37,5	33,9	49,5	10,9	539,55	415,4535	943,7941981	323,8787121	28,6%	28,8%	22,3%
estado de ensuciado abrasivo															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	645	2:00	21,1	9	49,1	38,7	48,6	6,98	339,228	261,20556	602,9912513	203,3383641	18,0%	18,1%	14,0%
2-15	645	2:00	21,1	9	50,3	39,5	48,5	6,47	313,795	241,62215	558,7200044	187,8552703	16,6%	16,7%	12,9%
estado limpio total															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	645	2:00	21,1	9	38,3	35,9	49,5	10,64	526,68	405,5436	920,4018488	313,5691932	27,9%	28,1%	21,6%
2-15	645	2:00	21,1	9	38,3	35,9	49,6	10,53	522,288	402,16176	910,8864162	310,3274064	27,7%	27,8%	21,4%

Muestras soiling 4: 1 día ensuciado natural

estado ensuciado natural 1 días															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	562	3:00	15,3	12	26	24	51,7	8,8	454,96	350,3192	765,584872	272,1192572	27,7%	27,8%	21,5%
2-15	562	3:00	15,3	12	27	24,6	51,7	8,9	460,13	354,3001	774,0616633	274,5564828	28,0%	28,2%	21,7%
estado de ensuciado abrasivo															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	562	3:00	15,3	12	31,6	24,5	50	6,4	320	246,4	556,6553364	197,512363	19,5%	19,6%	15,6%
2-15	562	3:00	15,3	12	31,8	24,2	50,1	6,5	325,65	250,7505	565,4345182	200,8376817	19,8%	19,9%	15,9%
estado limpio total															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2-14	562	3:00	15,3	12	23,8	20,8	50,9	9	458,1	352,737	784,1896219	281,8430356	27,9%	28,0%	22,3%
2-15	562	3:00	15,3	12	23,4	20,9	50,8	9,1	462,28	355,9556	792,8647056	284,8626277	28,1%	28,3%	22,5%

Anexos

Muestras soiling 4: 5 día ensuciado natural

estado ensuciado natural 5 días															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2--14	638	1:30	15,6	4	29,7	26,7	50	11,3	565	423,75	981,8075407	345,6870813	29,5%	30,5%	24,1%
2--15	638	1:30	15,6	4	30,4	28,6	49,8	11,3	562,74	422,055	980,9136768	343,0618851	29,4%	30,3%	23,9%
estado de ensuciado abrasivo															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2--14	638	1:30	15,6	4	43,3	37,2	49,1	7,5	368,25	276,1875	648,3770172	219,848865	19,2%	19,9%	15,3%
2--15	638	1:30	15,6	4	45,3	39	49	7,9	387,1	290,325	682,3709887	229,8527098	20,2%	20,9%	16,0%
estado limpio total															
panel	radiacion W/m2	hora (pm)	tem. Ambiente °C	vel.viento km/h	temp.max °C	temp.med °C	volt (V)	amp (A)	potencia max muestral (W)	potencia muestral real	correccion rad	correccion P. temp	ef.real	ef teo	ef.corregida
2--14	638	1:30	15,6	4	34,4	30,9	50,5	11,26	568,63	426,4725	976,3653681	338,6872525	29,7%	30,7%	23,6%
2--15	638	1:30	15,6	4	35,2	32,6	50,4	11,3	569,52	427,14	979,0371681	337,5507509	29,8%	30,7%	23,5%

ANEXO 7: TARIFA DE CONSUMO, DISTRIBUCION Y MANEJO DE ENEFIA ELECTRICA CGE CURICÓ. FUENTE: MINISTERIO DE ECONOMIA, FOMENTO Y RECONSTRUCCIÓN, CEC.

		Vigencia										nov-2022										
		Comuna de Curicó		Comuna de Molina		Comuna de Romeral		Comuna de Teno		Comuna Chimbarongo		Comuna de Curicó		Comuna de Molina		Comuna de Romeral		Comuna de Teno		Comuna Chimbarongo		
		\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	\$ Neto	\$ C/IVA	
Decreto N° 11T : Fija fórmulas tarifarias para las empresas eléctricas concesionarias de servicio público de distribución a contar del 01.11.2016																						
Decreto N° 2T : Fija Factor de Ajuste de potencia de las Fórmulas Tarifarias a contar del 01.11.2016																						
Decreto N° 5T : Fija Actualización de Parámetros de Decreto 11T a contar del 28.09.2018																						
Of.Ord CNE N° 490/2019 : Modifica Parámetros de Decreto N° 5T (Sin Medición Inteligente) a contar del 01.10.2018																						
Res. Ex. CNE N° 488/2021 Cargo Servicio Público 01.12.2021 al 30.11.2022																						
Res. Ex. CNE N° 442/2022 Cargos Transmisión 01.07.2022 al 31.12.2022																						
Res. Ex. CNE N° 379/2019 Factor Corte y Reposición 01.07.2019 al 31.12.2019																						
Decreto N° 20T - 2019: Fija Precios de Nudo Promedio Ponderado a contar del 01.01.2019																						
Decreto N° 9T- 2022: Indexación PEC por factor IPC y factor alfa a contar del 01.01.2022																						
Ley N° 21.185 crea Mecanismo de Estabilización de Precios (PEC) a partir del 01.07.2019																						
Ley N° 21.194 Art. Decimotercero, inciso primero, establece nivel de precios constantes de costos de distribución desde 21.12.2019																						
Área Típica 2																						
TARIFA BT1a	Cargo en Boleta/Factura																					
	Administración del servicio (\$/cliente)	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	
	Cargo por servicio público (\$/kWh)	0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		
	Transporte de Electricidad (\$/kWh)	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	
	Electricidad base consumida (\$/kWh)	121,48	144,57	121,50	144,58	121,48	144,56	117,16	139,42	121,51	144,59											
	Consumo por sobre el límite de invierno (\$/kWh)	168,01	199,93	168,02	199,95	168,00	199,92	163,68	194,78	168,03	199,96											
TARIFA TRAT1	Administración del servicio (\$/cliente)	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	879,77	1.046,93	
	Cargo por servicio público (\$/kWh)	0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		0,508		
	Transporte de Electricidad (\$/kWh)	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	18,70	22,25	
	Electricidad base consumida (\$/kWh)	94,80	112,81	94,81	112,83	94,79	112,80	90,75	108,00	94,82	112,84											
	Consumo por sobre el límite de invierno (\$/kWh)	119,48	142,18	119,49	142,19	119,47	142,17	115,43	137,36	119,50	142,20											