UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO – CHILE

“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO PARA ESTUDIO DE FALLAS EN PANELES FOTOVOLTAICO”

WLADIMIR ARTURO ZELADA KORZE

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. ING. RODRIGO BARRAZA V.

PROFESOR CORREFERENTE: DR. ING. PATRICIO VALDIVIA L.

MAYO 2019

Dedicatoria

Agradezco haber tenido el apoyo constante

para sólo dedicarme a estudiar, por tener

una familia detrás, amigos que me acompañan y

al equipo completo del proyecto Fondef.

RESUMEN

Debido a la necesidad de realizar investigaciones en el ámbito solar fotovoltaico, se requiere un espacio en la universidad, el cual contenga los instrumentos correspondientes para la experimentación, con las principales tecnologías y equipos disponibles en la industria. Por esto, se diseña e implementa un laboratorio para el estudio de fallas en paneles FV.

El enfoque del laboratorio es contener módulos FV en diferentes condiciones de operación, ya sea en estado normal o fallas inducidas, para posteriormente tener herramientas para el desarrollo de investigaciones en base a las variables eléctricas y análisis de imágenes. Se requiere un continuo monitoreo de condiciones en el módulo, de manera que sea posible obtener un perfil de generación y estado de funcionamiento. El método consistió en realizar una propuesta preliminar, luego, efectuar la compra de instrumentos y equipos, para su posterior montaje.

ABSTRACT

Due to the need to carry out research in the solar photovoltaic field, a space in the university is required, which contains the corresponding instruments for experimentation, with the main technologies and equipment available in the industry. For this, a laboratory for the study of faults in PV panels is designed and implemented.

The focus of the laboratory is to contain PV modules in different operating conditions, either in normal or induced failures, to subsequently have tools for the development of research based on electrical variables and image analysis. Continuous monitoring of conditions in the module is required, so that it is possible to obtain a generation profile and operating status. The method consisted of making a preliminary proposal, then, making the purchase of instruments and equipment, for subsequent assembly.

GLOSARIO

FV: Fotovoltaico.

Indoor: Condiciones interiores (controladas) para sistemas fotovoltaicos.

Outdoor: Condiciones exteriores (al aire libre) para sistemas fotovoltaicos.

MPPT: Seguidor de punto de máxima potencia (Máximum Power Point Tracer).

Curvas IV: Curva de intensidad y voltaje.

CNN: Red neuronal convencional (Convolutional Neural Network).

RGB: Modelo cromático que representa los distintos colores a partir de la mezcla de los primarios rojo, verde y azul (Red, Green y Blue).

EL: Electroluminiscencia.

IR: Infrarrojo.

PL: Fotoluminiscencia.

IEC: Comisión electrónica internacional.

String: Conjunto de modulos conectados en serie.

NOCT: Temperatura de operación nominal de la celda (Nominal Operating Cell Temperature).

STC: Condiciones estándar de prueba (Standard Test Conditions).

UV: Radiación ultravioleta.

PID Degradación inducida por potencial (Potencial Induced Degradation).

C-Si: Silicio cristalino.

TCO: Conductor transparente.

Soiling: Ensuciamiento en módulos FV producto de partículas aerotransportadas.

On Grid: Conexión a la red eléctrica.

NOMENCLATURA

Abreviación	Nombre	Unidad
P_{max}	Potencia máxima en condiciones STC	Wp
V_{oc}	Voltaje en circuito abierto	V
I_{sc}	Corriente en circuito abierto	A
V_{mp}	Voltaje en el punto máximo de potencia	V
I_{mp}	Corriente en el punto de máxima potencia	A

ÍNDICE

RESUMEN iii

ABSTRACT iv

GLOSARIO v

NOMENCLATURA vi

ÍNDICE vii

ÍNDICE DE TABLAS xi

ÍNDICE DE FIGURAS xiii

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS 1

1.1. Introducción general 1

1.2. Objetivo general 2

1.3. Objetivos específicos 2

2. ESTADO DEL ARTE 1

2.1. Laboratorios FV 1

2.1.1. Universidad de Aalborg 1

2.1.2. Fraunhofer 2

2.1.3. NREL, Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los EE.UU. 3

2.1.4. SERIS, Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur 4

2.1.5. Universidad de Washington, Deep Solar Eye 5

2.1.6. CFV, Laboratorio de Testeo Solar 5

2.1.7. ZSW, Centro de Investigación de Energía Solar e Hidrógeno de Baden-Württemberg 6

2.2. Análisis comparativo 6

2.2.1. Laboratorios Indoor 6

2.2.2. Laboratorios Outdoor 8

3. LABORATORIO ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA 12
3.1. Propuesta de laboratorio 12
3.1.1. Ubicación 12
3.1.2. Requerimiento de espacio 13
3.1.3. Diseño preliminar 15
3.2. Recursos materiales 18
3.2.1. Trazador de curva I-V 19
3.2.2. Estación meteorológica 21
3.2.3. Piranómetro CMP 10 23
3.2.4. Cámara térmica posición fija 24
3.2.5. Cámara térmica manual 26
3.2.6. Inversor On Grid 27
3.2.7. Microinversor 29
3.2.8. Módulo fotovoltaico 31
3.2.9. Estructura de soporte 33
3.2.10. Registrador de datos 35
3.2.11. Multiplexor 36
3.2.12. Drone y cámara drone 37
3.2.13. Notebook 41
3.2.14. Cámara Logitech C920 41
3.2.15. Carro metálico 42
3.2.16. Caja metálica 43
3.2.17. Ventilador tablero 44
3.2.18. Materiales conexión eléctrica 45
3.2.19. Sensor de temperatura 47

3.2.20. Sensor de corriente 48
3.2.21. Sensor de voltaje 49
3.3. Montaje preliminar Laboratorio FV 50
3.3.1. Conexión eléctrica 51
3.3.2. Instalación de equipos 53
4. METODOLOGÍAS 63
4.1. Variables eléctricas 64
4.1.1. Trazado de curvas IV 64
4.1.2. Registrador de datos 65
4.2. Imágenes termográficas 68
4.2.1. Cámara termográfica fija Bosch 68
4.2.2. Cámara termográfica manual Fluke 70
4.3. Estación meteorológica 73
4.3.1. Sensor de variables medioambientales 083E 74
4.3.2. Piranómetro CMP10 74
4.3.3. Monitor de viento helicoidal 05103 75
4.3.4. Radiómetro de banda giratoria sombreadora RSR2 76
4.3.5. Módulo FV de referencia 77
4.4. Variables módulos FV 79
4.4.1. Temperatura 79
4.4.2. Corriente 80
4.4.3. Voltaje 81
5. CONCLUSIONES 82
6. BIBLIOGRAFÍA 84
7. ANEXOS 92

7.1. Ensayos laboratorio indoor 92

7.2. Modos de falla en condiciones aceleradas para ensayos indoor 97

7.3. Planos estructuras paneles PV 99

7.4. Características módulos policristalinos instalados en el laboratorio 102

7.5. Especificaciones técnicas equipos Metodologías 102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Comparativa entre trazadores de curva I-V. 19
Tabla 3.2: Diferentes sistemas de monitoreo para las variables meteorológicas. 21
Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del piranómetro CMP10. 23
Tabla 3.4: Comparativa de cámaras térmicas fijas disponibles en el mercado. 24
Tabla 3.5: Comparativa de cámaras térmicas manuales disponibles en el mercado. 26
Tabla 3.6: Comparación de inversores disponibles en el mercado. 27
Tabla 3.7: Especificaciones técnicas microinversor. 29
Tabla 3.8: Especificaciones técnicas sistema de monitoreo Envoy. 30
Tabla 3.9: Características paneles FV del laboratorio. 31
Tabla 3.10: Registrador de datos CR1000 y CR1000X. 35
Tabla 3.11: Multiplexor, incrementa el número de sensores para el registrador de datos. 36
Tabla 3.12: Características técnicas drone con cámara térmica evaluados. 38
Tabla 3.13:Características técnicas cámara drone. 39
Tabla 3.14: Cámara C920 HD Logitech. 41
Tabla 3.15: Caja metálica Rhona. 43
Tabla 3.16: Ventilador tablero, marca Jason Fan. Es posible inducir el aire hacia adentro (intractor) o hacia afuera (extractor) mediante la modificación de conexiones en el ventilador. 44
Tabla 3.17: Especificaciones técnicas sensor de temperatura CS240, marca Campbell. 47
Tabla 3.18: Paneles FV tecnología policristalina instalados en el laboratorio. 50
Tabla 4.1: Resumen frecuencia de actividades en el mantenimiento preventivo. 63
Tabla 4.2: Frecuencia de mantenimiento preventivo en equipos presentes en la estación meteorológica. 73
Tabla 7.1: Resumen de los tipos de prueba en módulos PV [19]. 92
Tabla 7.2: Modos de falla para pruebas de estrés acelerado en módulos PV [94]. 97
Tabla 7.3: Especificaciones técnicas paneles policristalinos instalados en el laboratorio. 102
Tabla 7.4: Especificaciones técnicas trazador de curva IV CetisPV-Outdoortest. 102
Tabla 7.5: Especificaciones técnicas registrador de datos CR1000/CR1000X. 102
Tabla 7.6: Especificaciones técnicas cámara termográfica fija MIC612. 103
Tabla 7.7: Especificaciones técnicas cámara termográfica manual TI400. 104

Tabla 7.8: Especificaciones técnicas estación meteorológica RSR100. 105
Tabla 7.9: Especificaciones técnicas piranómetro CMP10. 105
Tabla 7.10: Especificaciones técnicas sensor de temperatura CS240. 106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Uso de drone para la inspección por electroluminiscencia y fotoluminiscencia en el proyecto DronEL [20]..... 9
Figura 2.2: Laboratorio de análisis de imágenes FV de la Universidad de Aalborg [3]. 9
Figura 2.3: Herramienta de imágenes de luminiscencia ”*DaySy*” de módulos FV [11]. 10
Figura 2.4:En la izquierda se observa la termografía del laboratorio. A plena luz de día (derecha), se realiza el análisis de electroluminiscencia [11]..... 10
Figura 2.5: Las imágenes son capturadas cada cinco segundos, registrando la energía generada por los módulos [12]. 11
Figura 2.6: Cámara para la adquisición de imágenes de cielo “*Sky InSight*”, de Reuniwatt [22]. 11
Figura 3.1: Plano edificio F, quinto piso sector poniente. Dimensiones del bosquejo en cm. En la dirección Este de la azotea, se encuentran instalados equipos de climatización..... 12
Figura 3.2: Modelamiento en tres dimensiones para la azotea del edificio F. La aleta central de la figura posee una altura de 7.700 mm, lo cual provocará problemas de sombreamiento en el sector Oeste y Sur de la azotea. 13
Figura 3.3: Modelamiento en tres dimensiones para la azotea del edificio F. 13
Figura 3.4: Sombreado en azotea del edificio F. Condiciones para el día 08 de junio a las 11:00 AM y un huso horario de UTC -4. 14
Figura 3.5: Sombreado en azotea del edificio F. Condiciones para el día 28 de noviembre a las 10:00 AM y un huso horario de UTC -4. 14
Figura 3.6: Sombreado en azotea del edificio F. Condiciones para el día 28 de noviembre a las 18:00 h y un huso horario de UTC -4. 15
Figura 3.7: Condiciones de sombreado para el día 06 de junio a las 11:00 AM y un huso horario de UTC -4. 16
Figura 3.8: Condiciones de sombreado para el día 06 de junio a las 11:00 AM y un huso horario de UTC -4. 16
Figura 3.9: Espacio solicitado para las instalaciones del Laboratorio Solar Fotovoltaico. Dimensiones del bosquejo en cm. 17
Figura 3.10: Imagen satelital campus San Joaquín de la UTFSM [26]. 18
Figura 3.11: Trazador de curva CetisPV-Outdoortest, marca Halm [29]..... 21

Figura 3.12: Estación meteorológica RSR100, marca Campbell [30]. 23
Figura 3.13: Piranómetro CMP10, marca Kipp & Zonen [32]..... 24
Figura 3.14: Cámara térmica MIC Series 612, marca Bosch [34]. 26
Figura 3.15: Cámara térmica TI 400 9HZ, marca Fluke [35]..... 27
Figura 3.16: Inversor 3k-TL2, marca Omniksol [36]..... 29
Figura 3.17: Microinversor M250-72-2LN-S2, marca Enphase [37]..... 30
Figura 3.18: Sistema de monitoreo Envoy, marca Enphase [38]. 31
Figura 3.19: En la izquierda se encuentra el panel de tecnología policristalina, marca AstroEnergy [39]. En la derecha, el módulo bifacial, marca RisenEnergy [40]. 33
Figura 3.20: Estructura individual para panel policristalino (ver módulo en Figura 3.19). El soporte es variable, ajustando los bastidores traseros. El ángulo de inclinación varía entre 15 y 45°. Los planos de fabricación se encuentran en la Figura 7.1 (ver Apéndice 7.3) [41]... 34
Figura 3.21: Estructura individual para panel bifacial (ver módulo en Figura 3.19). El soporte es fijo, con ángulo de 90°. Los planos de fabricación se encuentran en la Figura 7.2 (ver Apéndice 7.3) [41]..... 34
Figura 3.22: Estructura individual para panel bifacial (ver módulo en Figura 3.19). El soporte es variable, ajustando los bastidores traseros. El ángulo de inclinación varía entre 15 y 40°. Los planos de fabricación se encuentran en la Figura 7.3 (ver Apéndice 7.3) [41]. 35
Figura 3.23: Registrador de datos Campbell, en la izquierda el CR1000 [42] y en la izquierda el CR1000X [43] 36
Figura 3.24: Multiplexor AM16/32B, marca Campbell [44]. 37
Figura 3.25: Drone matrice 200, marca DJI [45]. 39
Figura 3.26: Cámara drone Zenmuse XT, marca DJI [46]..... 41
Figura 3.27: Notebook Inspiron 14" 3467, marca Dell [47]. 41
Figura 3.28: C920 HD, marca Logitech [48]..... 42
Figura 3.29: Dimensiones totales 680x435x660 mm. Tres gavetas de 551x403x75 mm, dos gavetas de 551x403x155 mm. Incluye cuatro ruedas macizas. Marca Big Red [49]..... 43
Figura 3.30: Caja metálica, marca Toten [50]..... 44
Figura 3.31: Ventilador tablero, marca Jason Fan [51]. 45
Figura 3.32: Cable solar AWG 10 La sección es equivalente a 6 mm2 [52]..... 45

Figura 3.33: Conector MC4 simple. El voltaje máximo es de 1000 Vdc, mientras que la intensidad máxima es de 25 A [53]. 45
Figura 3.34: Cable de control con pantalla. Posee una sección de 1,5 mm2 y un voltaje máximo de 500 Vdc [54]. 45
Figura 3.35: Interruptor monofásico de 16 A y 20 A. Imagen referencial [55]. 46
Figura 3.36: Interruptor diferencial de 20 A. Imagen referencial [56]. 46
Figura 3.37: Fusible cilíndrico de 10 A. Requiere su respectiva caja porta fusible. Imagen referencial [57]. 46
Figura 3.38: Tubo flexible metálico de 1 pulgada, con sus respectivos terminales de conexión [58]. 46
Figura 3.39: Riel din simétrico [59]. 46
Figura 3.40: Cable de control, AWG 14 [60]. 46
Figura 3.41: Placa PCB universal [61]. 47
Figura 3.42: Resistencias eléctricas con disipación de potencia de 0,25 W y tolerancia del 5% [62]. 47
Figura 3.43: Placa de acrílico [63]. 47
Figura 3.44: Resistencia shunt, clase 05. Ejecución normalizada de 60 mV y 150 A [64].. 47
Figura 3.45: Terminal de anillo [65]. 47
Figura 3.46: Terminal tornillo [66] 47
Figura 3.47: Sensor de temperatura CS240, marca Campbell [67]. 48
Figura 3.48: Base de acrílico para la aislación de resistencias shunt. Se fijan a la caja metálica mediante sujeción de pernos. 49
Figura 3.49: Caja de acrílico para la aislación de resistencias shunt. Por las secciones laterales se realizan las conexiones eléctricas, mientras que los sacados frontales permiten la ventilación interna. 49
Figura 3.50: Numeración para los paneles FV policristalinos. Vista desde el norte en azotea F. La numeración comienza en la fila posterior, con el primer módulo correspondiente al Panel 1 y terminando en la segunda fila con el Panel 8. 50
Figura 3.51: Conexión eléctrica individual. El subíndice n corresponde al número de string, donde Vxn es el voltaje del panel x en el string n, Isn la corriente del string actual y Vred el voltaje de la red. Por otra parte, Vcncs es el control de señal de la corriente actual. 51

Figura 3.52: Método para la medición de tensión en base a resistencias eléctricas. Vxn corresponde al voltaje del panel x en el string n, R1 y R2 son las resistencias eléctricas del divisor de tensión, de valores 2 MW y 9,1 kW respectivamente. Por último, Vvxcs es el control de señal de voltaje para el panel actual. 52
Figura 3.53: Interacción de equipos de medición para el registro de temperatura, tensión y corriente del módulo FV. 52
Figura 3.54: Conexión eléctrica de dos o más módulos en el string número 1. El control de señal para la corriente se realiza a nivel de string, debido a su conexión en serie, mientras que el control de señal de voltaje del panel se mide de manera individual, según la Figura 3.52. 53
Figura 3.55: Instalación de módulos FV policristalinos, estructuras paneles y estación meteorológica. 54
Figura 3.56: Instalación preliminar estación meteorológica RSR100. 54
Figura 3.57: Ubicación cámara Logitech C920. 55
Figura 3.58: Vista de captura de imágenes en la cámara Logitech C920. 55
Figura 3.59: Conexión de inversor, registrador de datos, ventiladores, divisor de tensión y corriente en la caja metálica. 56
Figura 3.60: Canalización de cableado. 56
Figura 3.61: Medición de temperatura en la parte posterior del módulo mediante termistores. 56
Figura 3.62: Carro metálico de 5 gavetas. Su función es la protección del notebook, el cual se encarga de recopilar imágenes captadas por la cámara Logitech. 56
Figura 3.63: Captura de imágenes desde la cámara Logitech C920. 56
Figura 3.64: Reubicación de la estación meteorológica hacia el lado norte de la azotea del edificio F. Instalación de la cámara térmica fija MIC 612 en lo más alto de la estación meteorológica. 57
Figura 3.65: Se añaden los piranómetros CMP10 en extensiones de la estación meteorológica. 57
Figura 3.66: Disposición de ocho módulos FV de tecnología policristalina. Se observa que existen paneles que se mantienen limpios, mientras que otros módulos se ensucian de manera natural o inducida, a fin de comparar el comportamiento de los equipos. 58

Figura 3.67: Módulos con vidrios rotos. En la izquierda se encuentra el panel 1 (ver Figura 3.50), mientras que en la derecha el panel 4. 58
Figura 3.68: Ensuciamiento en los módulos. En la izquierda se observa el módulo 7 y 8 (ver Figura 3.50), donde el primero se limpia constantemente y el módulo 8 se encuentra sucio con soiling natural. En la figura derecha se encuentra el módulo 5, el cual se le añadió agua y residuos pegajosos para simular un ensuciamiento artificial. 59
Figura 3.69: Modificaciones en la caja metálica. Se instalaron cuatro microinversores Enphase, protecciones eléctricas, medidores de tensión y corriente en el registrador de datos CR1000. 60
Figura 3.70: Se instala una caja metálica al oeste de la azotea, destinada sólo a proteger un registrador de datos CR1000X, el cual se encuentra almacenando información de los sensores de temperatura. 60
Figura 3.71: Conexión sensores de temperatura PT1000. Se encuentran montadas de manera continua en la parte posterior del módulo (imagen izquierda) en los módulos 3, 4, 7 y 8 (ver Figura 3.50). Se han realizado experimentaciones en las que se requiere medición en la parte frontal (imagen derecha), para luego volver al sector posterior. 61
Figura 3.72: Divisor de tensión. La conexión eléctrica se muestra en la Figura 3.52. Fabricado en base a terminales tornillo (Figura 3.46) montados en una placa PCB (Figura 3.41) y conectados mediante cable de control (Figura 3.40). 61
Figura 3.73: Divisor de corriente. resistencias shunt (Figura 3.44) montadas en una placa de acrílico (Figura 3.49). Se conectan mediante terminales de anillo (Figura 3.45) y cable de control (Figura 3.40). 61
Figura 3.74: Canalización eléctrica mediante tubos flexibles metálicos, reemplazando las canaletas (Figura 3.60). 62
Figura 3.75: Espacio asignado para la tecnología bifacial y Fresnel (ver Figura 3.9). 62
Figura 4.1: Esquema de conexión para cargas pequeñas [68]. 65
Figura 4.2: Sincronización horaria para el registrador de datos con respecto al UTC 0 del portal en línea hora oficial de Chile [70]. 66
Figura 4.3: Conexión física al equipo CR1000/CR1000X [71]. Se realiza mediante el puerto RS-232 para computadores, sensores o RS-232 módems. Para la conexión con ordenadores de corriente alterna o equipos periféricos se emplea el puerto CS I/O. 67

Figura 4.4: Software para la captura de imágenes de la cámara MIC 612. 68
Figura 4.5: Escritorio del notebook. Destacado en rojo se encuentra la aplicación “Cámara”. 69
Figura 4.6: Software de la cámara Bosch. 69
Figura 4.7: Sensor de temperatura y humedad relativa 083E [31]. 74
Figura 4.8: Subcomponentes del piranómetro CPM10 [76]. 75
Figura 4.9: Anemómetro helicoidal y veleta, de Campbell Scientific [31]. 76
Figura 4.10: En la derecha se observa el radiómetro de banda sombreadora giratoria, RSR2. En la izquierda, se encuentra el piranómetro de licro Li200R, el cual es parte del equipo RSR2 [31]. 77
Figura 4.11: Celda solar de referencia SMP100 [79]. 78
Figura 4.12: Sensor de temperatura montado en la parte posterior del panel fotovoltaico [80]. 80
Figura 4.13: Resistencia shunt clase 05. Posee una ejecución normalizada de 60 mV y 150 A. Se encuentra en una base de acrílico para evitar la energización de la caja metálica. 81
Figura 4.14: Divisor de tensión. Se energiza mediante cable de control y terminales de tornillo. 81
Figura 7.1: Plano estructura para panel de tecnología policristalina, variable entre 15 y 40°. Dimensiones en mm. Elaboración de Sufija [41]. 99
Figura 7.2: Plano estructura para panel de tecnología bifacial, fija en un ángulo de 90°. Dimensiones en mm. Elaboración de Sufija [41]. 100
Figura 7.3: Plano estructura para panel de tecnología bifacial, variable entre 15 y 40°. Dimensiones en mm. Elaboración de Sufija [41]. 101

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción general

Con el propósito de mejorar la investigación que contribuya al desarrollo de sistemas de operación y mantenimiento de paneles fotovoltaicos, la Universidad Técnica Federico Santa María se adjudicó un Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondef). Dentro de los trabajos realizados en dicho proyecto, se busca tener un espacio para la implementación de tecnologías con soluciones innovadoras, orientadas a potenciar el ámbito de la energía solar para el sector industrial y residencial del país.

El presente trabajo consiste en la implementación de un laboratorio para el estudio de falla en módulos fotovoltaicos. La instalación contendrá equipos en estado normal y otros con falla inducida, a fin de entender el comportamiento para distintas condiciones de operación. Se requiere un monitoreo continuo de distintas variables que permitan obtener un perfil del panel solar y la medición de condiciones ambientales, para lograr una reproducibilidad en los resultados obtenidos.

El trabajo desarrollado para la instalación de un laboratorio fotovoltaico modular, consistió en el análisis de los centros existentes alrededor del mundo, comprendiendo los estudios realizados y las pruebas ejercidas en equipos para condiciones indoor e outdoor. Posteriormente, se realiza una propuesta preliminar para el diseño del laboratorio solar fotovoltaico, considerando la ubicación y espacio requerido. Luego, se contemplan los principales equipos e instrumentos, los cuales son montados e instalados. Finalmente, se realizan metodologías para los distintos tipos de actividades para el mantenimiento de los equipos, la frecuencia de registro de datos, y un formato claro para su almacenamiento en la nube virtual del proyecto.

1.2. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo de título es diseñar e implementar un laboratorio outdoor para estudio de fallas en sistemas fotovoltaico. Se busca el desarrollo de instalaciones para el estudio de fallas y condiciones operacionales en plantas fotovoltaicas, ya sea en condiciones outdoor e indoor para el estudio de fallas existentes y su efecto en sistemas, fallas autogeneradas y deterioro acelerado de los componentes.

1.3. Objetivos específicos

- Estudiar laboratorios existentes que analizan el deterioro de sistemas fotovoltaicos y modos de falla en equipos solares.
- Diseñar un laboratorio de fallas y características operacionales de sistemas fotovoltaicos.
- Especificar y seleccionar instrumentos y equipos requeridos.
- Implementar el laboratorio y los manuales y/o guías para la realización de experiencias

2. ESTADO DEL ARTE

A continuación, se describirán laboratorios que estudian el deterioro en sistemas fotovoltaicos, específicamente en degradación inducida para condiciones indoor y análisis de modos de fallas en outdoor. Su principal objetivo es monitorear el desempeño de los equipos requeridos para el aprovechamiento del recurso solar.

2.1.Laboratorios FV

2.1.1. Universidad de Aalborg

Ubicada en Dinamarca, la universidad de Aalborg cuenta con instalaciones de laboratorio de sistemas FV, pruebas y monitoreo de equipos FV al aire libre, laboratorio de análisis de imágenes FV, entre otros.

El laboratorio de sistemas FV (PVLab) [1] posee fines investigativos para el desarrollo de pruebas y estrategias de control en convertidores de energía verde conectados a la red, especialmente en inversores fotovoltaicos. Contiene dos áreas, donde la primera tiene para una conexión monofásica o trifásica a la red. Las principales investigaciones en esta sección son: Control de inversor fotovoltaico, equipos MPPT, problemas de sincronización a la red, control de voltaje y control de potencia activa/ reactiva. La segunda sección contiene un simulador solar de alto rendimiento, el cual realiza mediciones de eficiencia del panel solar mediante curvas IV con luz y oscuridad, además de pruebas de EL y un análisis térmico con cámara IR.

La plataforma de pruebas y monitoreo de equipos FV al aire libre (PVMON) [2]**,** tiene como objetivo medir el rendimiento de la tecnología solar fotovoltaica. Se emplean pruebas de análisis de imágenes IR y EL. El laboratorio posee una estación meteorológica de alta precisión con mediciones de irradiancia global horizontal, velocidad de viento, humedad y temperatura ambiente. Además, se tiene una celda de referencia en el plano inclinado, sensores de temperatura PT1000 en la parte posterior de los módulos fotovoltaicos y mediciones de variables eléctricas en corriente continua y alterna. Las pruebas evalúan el desempeño térmico y eléctrico en condiciones ambientales de módulos fotovoltaicos, micro inversores y optimizadores de potencia. Posee dos trazadores de curva IV de alta precisión

con seguimiento de MPPT integrado y cámaras termográficas en el espectro IR, las cuales registran termogramas en módulos sanos y dañados. Se tiene una cámara All-Sky para la adquisición de imágenes completas del cielo, a fin de investigar la variabilidad en la irradiancia solar y una correlación de las nubes con la producción de energía de los módulos.

El Laboratorio de análisis de imágenes FV [3] realiza una caracterización completa y diagnósticos de falla de paneles fotovoltaicos de silicio y capa fina. Con pruebas de imagen termográfica EL e IR, se analizan modos de falla imperceptibles en el espectro visual, como puntos calientes, células solares agrietadas, envejecidas o degradadas y problemas en el circuito eléctrico. Con el procesamiento de las imágenes obtenidas, se cuantifica la falla, como el tamaño y posición de la grieta en la celda. El análisis de imágenes se realiza con el equipamiento de cámaras termográficas manuales y drones aéreos pertenecientes al proyecto DronEL [4], el cual busca una solución automatizada para la inspección rápida y precisa de grandes plantas solares, a fin de disminuir su costos de operación y mantenimiento, mediante una inspección que combina técnicas de IR, EL, PL e imágenes visuales. Se desarrolla un método para la estimación del ángulo de la cámara del drone y una corrección automática de la perspectiva completa del panel FV.

2.1.2. Fraunhofer

Se realizan pruebas en condiciones exteriores del rendimiento de los módulos fotovoltaicos fabricados por Fraunhofer [5], con instalaciones en Revere (Massachusetts) y Albuquerque (New Mexico). Los experimentos consisten en el monitoreo de módulos fotovoltaicos, analizando su rendimiento, vida útil, estudios de ensuciamiento y degradación.

Las plantas fotovoltaicas poseen mediciones automatizadas del recurso solar y meteorológico, temperatura del módulo solar, trazado de curvas IV individual por panel y a nivel de string, monitoreo en corriente continua y corriente alterna. En base a la predicción de generación de energía en el software PVSyst, se compara el coeficiente de rendimiento con respecto al experimental. En New Mexico, se tiene la particularidad de trabajar con condiciones altas de radiación y temperatura, llegando a más de 60 ℃, además de estructuras con ángulos variables del panel con respecto a la horizontal y tracker con seguimiento en dos ejes. En Massachusetts, se realizan pruebas de puntos calientes, caracterización NOCT y análisis térmico en operación.

2.1.3. NREL, Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los EE.UU.

El Centro Nacional de Energía Fotovoltaica (NCPV) [6], perteneciente al Laboratorio Nacional de Energía Renovable. Tiene como objetivo desarrollar las distintas áreas de la tecnología solar FV. Las investigaciones se centran en aumentar la eficiencia de las celdas solares, disminuir el costo de producción de módulos y sistemas, mejorar la confiabilidad de los componentes y del conjunto FV. En el NCPV, se estudia y evalúan tecnologías fotovoltaicas avanzadas o emergentes en condiciones interiores simuladas y en condiciones exteriores [7].

Para el desarrollo de la simulación indoor, se alterna el nivel de exposición UV, humedad relativa y temperatura. La información del módulo FV son proporcionados por el análisis de imágenes de EL e IR, trazado de curvas IV y temperatura del panel. Las pruebas realizadas evalúan la vida útil del equipo, corrosión en los espejos, delaminación de polímeros, caracterización mecánica óptica, entre otros. Se testea la resistencia del módulo con elevados ciclos de trabajo o hasta la falla del equipo, alternando las condiciones climáticas de temperatura, humedad relativa y exposición. Se realizan ensayos como el Hi-Pot trabaja con un alto voltaje para condiciones de baja humedad o sumergidos en una solución humectante. La caracterización mecánica óptica (FTLB/ 158-01) analiza las propiedades óptimas de la muestra de prueba, obteniendo la capacidad para reflectar o transmitir luz y se realiza una caracterización de propiedades mecánicas de la muestra de prueba, analizando la resistencia, adhesión y su capacidad para mantener la humedad y el oxígeno.

En la medición en condiciones outdoor, la experimentación tiene como fin medir el rendimiento y la estabilidad de los módulos a largo plazo y emplear pruebas en sistemas fotovoltaicos conectados a la red. Miden continuamente los módulos FV, caracterizando los equipos en base a la energía generada y trazado de curvas IV. Se emplea un piranómetro para la radiación, un espectrómetro para determinar el contenido espectral de la luz y sensores para la obtención de temperatura del panel. Existen centros de investigación en diferentes regiones [8], con plantas que validan las nuevas tecnologías solares y configuraciones de sistemas en diversos climas, demostrando la confiabilidad y rendimiento a largo plazo. Se

ubican en Alburquerque (New México), Denver (Colorado), Orlando (Florida), Williston (Vermont) y Las Vegas (Nevada).

2.1.4. SERIS, Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur

El SERIS posee instalaciones para la caracterización de materiales en dispositivos fotovoltaicos, investigación y desarrollo de nuevas células solares, sistemas de energía solar y pruebas en módulos fotovoltaicos.

El laboratorio de pruebas de módulos fotovoltaicos [9], ofrece simulaciones en condiciones interiores y certificación en módulos a clientes de la industria solar. Además de pruebas estándar, se investiga la degradación de paneles en condiciones climáticas cálidas y húmedas, simulando el ambiente presente en el sudeste asiático, a fin de ser una referencia para dicha región. Las pruebas de investigación incluyen la determinación de la temperatura de funcionamiento nominal del módulo (NMOT), pruebas de degradación inducida por potencial (PID) en un entorno de niebla y estudios de degradación del módulo. Se realiza la caracterización de celdas solares y modulos completos, con tecnologías de silicio cristalino y película delgada para realizar trabajos a distintas condiciones (incluida la STC) y obteniendo los coeficientes de temperatura de los módulos. En cuanto a los ensayos de laboratorio, se realizan pruebas de estabilización de módulos, resistencia a puntos calientes, pruebas a altas temperaturas, exposición ultravioleta, envejecimiento acelerado, pruebas de aislamiento, de esfuerzo mecánico, testeo de fiabilidad térmica, y análisis de fallas (EL e imágenes IR).

El testeo de módulos se realiza en ambientes exteriores para diferentes condiciones de operación [10], a fin de evaluar el rendimiento de los equipos. Con tres plantas, instaladas en Alemania, Singapur y Australia, se adquiere información en la producción de energía, demostrando la confiabilidad y rentabilidad del sistema fotovoltaico. Se registra de manera remota variables ambientales, como temperatura de módulo y ambiental, humedad relativa, dirección y velocidad del viento, presión del aire, parámetros eléctricos en corriente continua y alterna. Se emplea un sistema especial denominado “DaySy” [11], el cual, mediante el filtrado de la luz solar, permite la medición de electroluminiscencia (EL) y fotoluminiscencia (PL) a plena luz del día.

2.1.5. Universidad de Washington, Deep Solar Eye

Un estudio realizado por investigadores de la universidad de Washington [12], reveló un importante avance en la predicción de suciedad y modos de falla, utilizando un enfoque basado en la red neuronal convencional (CNN). El método consiste en el empleo de imágenes RGB del módulo FV y factores ambientales como entrada para predecir la pérdida de potencia, la localización de la suciedad y el tipo de suciedad.

El modelo de red neuronal, llamado Deep Solar Eye, consta de cuatro pasos; la capacitación de un programa para la clasificación basado en el método CNN en granjas solares, predicción de la pérdida de potencia y localización de defectos, para finalmente categorizar el estado del panel. Para mejorar la capacidad de localización de CNN, se implementó un bloque de difusión bidireccional, con reconocimiento de entrada (BiDIAF), el cual refuerza la entrada en diferentes niveles de CNN y mejora la predicción en la pérdida de potencia en aproximadamente un 3% y la precisión de la localización en un 4%. Se busca un sistema de reconocimiento automático para la detección de fallas, el cual posee una base de datos con 47.754 imágenes de paneles con etiquetas de potencia. El método experimental para la base de datos consta de dos módulos solares idénticos, que se mantienen lado a lado frente a una cámara RGB. Se induce un ensuciamiento en el primer panel para diferentes tipos de polvo y tamaño de partícula, luego, se capta la energía generada, mientras que el segundo se emplea como panel de referencia, con condiciones normales de operación. Se demostró que el estudio realizado es generalizable, logrando generar un perfil de estado del panel en imágenes de módulos FV obtenidos en la web.

2.1.6. CFV, Laboratorio de Testeo Solar.

El laboratorio de testeo solar CFV [13], proporciona servicios para diversas tecnologías del área solar fotovoltaica, con pruebas en interior y exterior, ensayos de envejecimiento acelerado y confiabilidad, calidad y rentabilidad de equipos, entre otros.

Las pruebas en condiciones interiores [14] cuentan con un ambiente controlado y realizan la medición del rendimiento en condiciones STC, NOCT y baja irradiancia, determinación del coeficiente de temperatura, trazado de curva IV con luz y oscuridad, verificación de datos de entrada para modelos de rendimiento (PVSyst, SAM, Sandia), nivel de desempeño, evaluación estadística y análisis de fallas. Los equipos permiten una

simulación flash en un ambiente controlado para las condiciones de irradiancia, temperatura y pulsos de luz. Por otra parte, se genera un análisis termográfico basado en EL e IR.

El testeo en condiciones exteriores [15] se focaliza en estudios de rendimiento de energía para módulos y concentradores fotovoltaicos, efectos del ángulo de incidencia en la generación de electricidad, degradación inducida por luz, puntos calientes, coeficientes de temperatura y otras pruebas de investigación y desarrollo personalizadas.

2.1.7. ZSW, Centro de Investigación de Energía Solar e Hidrógeno de Baden-Württemberg

El Centro de Investigación de ZSW [16] tiene como principal objetivo la investigación y desarrollo de materiales fotovoltaicos, a fin de garantizar el uso más eficiente en términos económicos y sistemas de larga duración. El laboratorio de testeo solar (SOLAB) de ZSW [17] realiza experimentación en ambiente indoor, con control de temperatura, humedad y luz en cámaras climáticas. Las pruebas consisten en mediciones de STC, degradación inducida por potencial, carga mecánica, electroluminiscencia, termografía IR, prueba de aislamiento y de fuga húmeda.

El testeo en condiciones exteriores de ZSW se desarrollan en Widderstall [18], con pruebas de rendimiento energético individual para módulos FV, microinversores y optimizadores de energía, comportamiento de operación bajo sombreado inducido, estabilidad a corto y largo plazo, degradación inducida por la luz (PID), efectos de absorción solar, condiciones aceleradas (concentración de luz, prueba Sahara). La instalación posee mediciones meteorológicas de alta resolución, como irradiancia (global, directa y difusa), temperatura y humedad ambiental, velocidad y dirección del viento, espectro de luz. Se monitorea individualmente la curva IV del panel y el rendimiento energético.

2.2. Análisis comparativo

2.2.1. Laboratorios Indoor

A nivel general, los laboratorios para condiciones indoor deben tener equipos con capacidad para controlar las condiciones climáticas como temperatura, humedad relativa y exposición UV. De esta manera, es posible realizar múltiples ensayos, alternando los ciclos

de trabajo y provocando una exposición acelerada, obteniendo información de la vida útil y rendimiento del módulo FV según la norma IEC 61215-1 [19] (ver pruebas en Anexo 7.1).

Los diferentes modos de falla para las pruebas en condiciones aceleradas se encuentran en el Anexo 7.2. Además, se emplea un análisis termográfico, con cámaras de espectro infrarrojo y electroluminiscencia, y medición de curvas IV en luz y oscuridad. El simulador solar permite variar las condiciones de trabajo, típicamente entre una temperatura de $-55\ °C$ hasta $95\ °C$, humedad relativa desde 5% a 95% y exposición ultravioleta entre 1 y 2 veces la capacidad del sol. Con los parámetros antes mencionados, es posible realizar ciclos de trabajo, a fin de obtener una degradación acelerada en módulos FV, rendimiento y vida útil.

2.2.2. Laboratorios Outdoor

Debido a que un sistema FV depende de las condiciones ambientales para la generación de electricidad, es imprescindible realizar una experimentación con la medición de dichos parámetros, a fin de ser un estudio comparativo que permita su reproducibilidad y repetitividad. Un laboratorio FV en condiciones exteriores requiere de la siguiente información.

- Humedad, temperatura y presión ambiente
- Velocidad y dirección del viento
- Irradiancia global, horizontal y difusa

Por otra parte, para la realización de pruebas como la exposición al aire libre MQT 08 (ver Anexo 7.1), se requiere la medición de irradiancia en el plano inclinado (POA), una celda de referencia para los niveles de irradiancia solar y una carga resistiva para que el módulo opere a máxima potencia, o bien, el uso de un MPPT.

Para evaluar el rendimiento del panel FV, es necesario documentar el tipo de tecnología del módulo y sus características principales (generación de potencia, corriente y voltaje en STC, NOCT y circuito abierto, coeficientes de temperatura). En cuanto a la información del módulo, se instala un sensor de temperatura (típicamente un PT1000 en la parte posterior del equipo) y se emplea un trazador de curvas IV.

En base al análisis termográfico, como electroluminiscencia, cámaras infrarrojo y fotoluminiscencia, es posible observar fallas que no detecta la inspección visual, como células solares agrietadas, envejecidas o degradadas; fallas en el circuito eléctrico del módulo; entre otros. El procesamiento de este tipo de anomalías permite la cuantificación de la falla, como el tamaño y posición de la grieta. Existen investigaciones que realizan termografía mediante el uso de drones aéreos (ver Figura 2.1), a fin de encontrar una solución automatizada para la inspección rápida y precisa, mediante una corrección automática de la perspectiva del módulo FV (ver Figura 2.2).

Figura 2.1: Uso de drone para la inspección por electroluminiscencia y fotoluminiscencia en el proyecto DronEL [20].

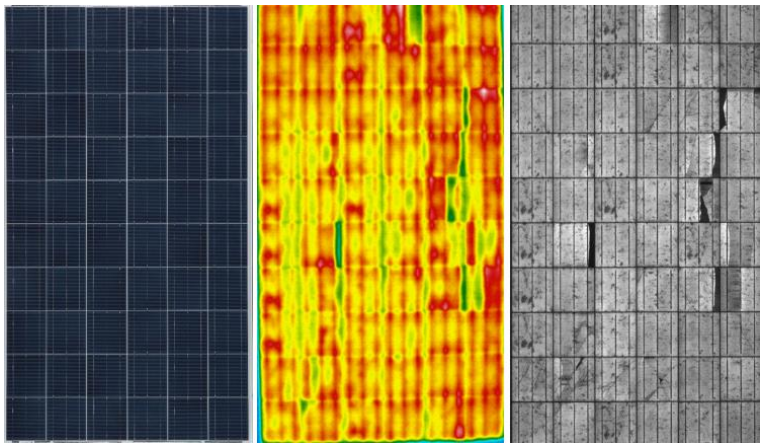


Figura 2.2: Laboratorio de análisis de imágenes FV de la Universidad de Aalborg [3].

Normalmente, el análisis termográfico de electroluminiscencia y fotoluminiscencia, deben realizarse en un ambiente con luz controlada, por lo que típicamente los módulos FV requieren pruebas en un laboratorio indoor. Mediante el sistema “Daylight”, desarrollado por Solarzentrum [21], se filtra la luz solar y permite la emisión de termografía a plena luz del día (ver Figura 2.3), obteniendo información del comportamiento en terreno de los equipos (ver Figura 2.4).

Figura 2.3: Herramienta de imágenes de luminiscencia ”*DaySy*” de módulos FV [11].

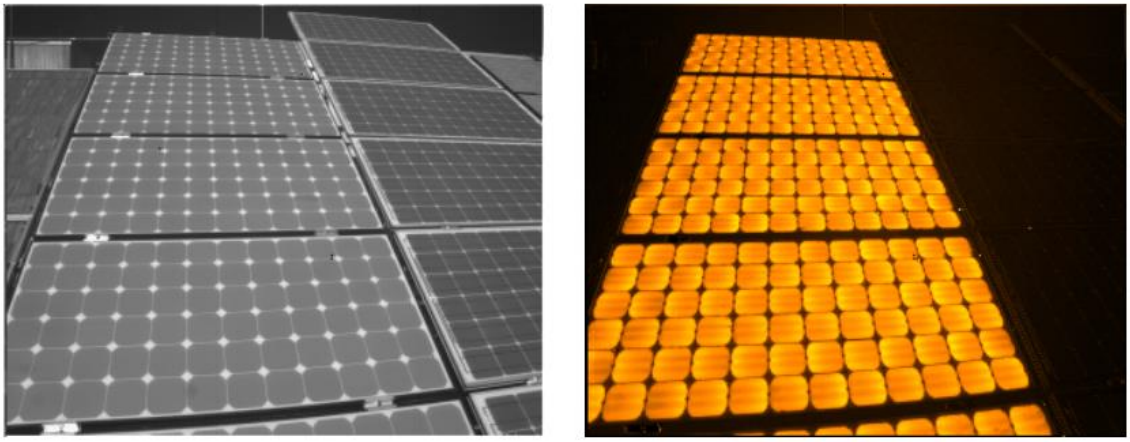


Figura 2.4:En la izquierda se observa la termografía del laboratorio. A plena luz de día (derecha), se realiza el análisis de electroluminiscencia [11].

Por otra parte, la universidad de Washington diseñó un modelo para la predicción de pérdida de potencia y análisis de defectos, teniendo como entradas imágenes RGB del panel solar y factores medio ambientales. El proyecto realiza la comparación de módulos con fallas inducidas y un panel de referencia, en estado normal de funcionamiento. Con lo anterior, se creó un conjunto de datos de imágenes de paneles solares, con 45.754 imágenes con etiquetas de pérdida de potencia, a fin captar los tipos de suciedad y su impacto en el panel FV, para luego automatizar el sistema de análisis de imágenes.

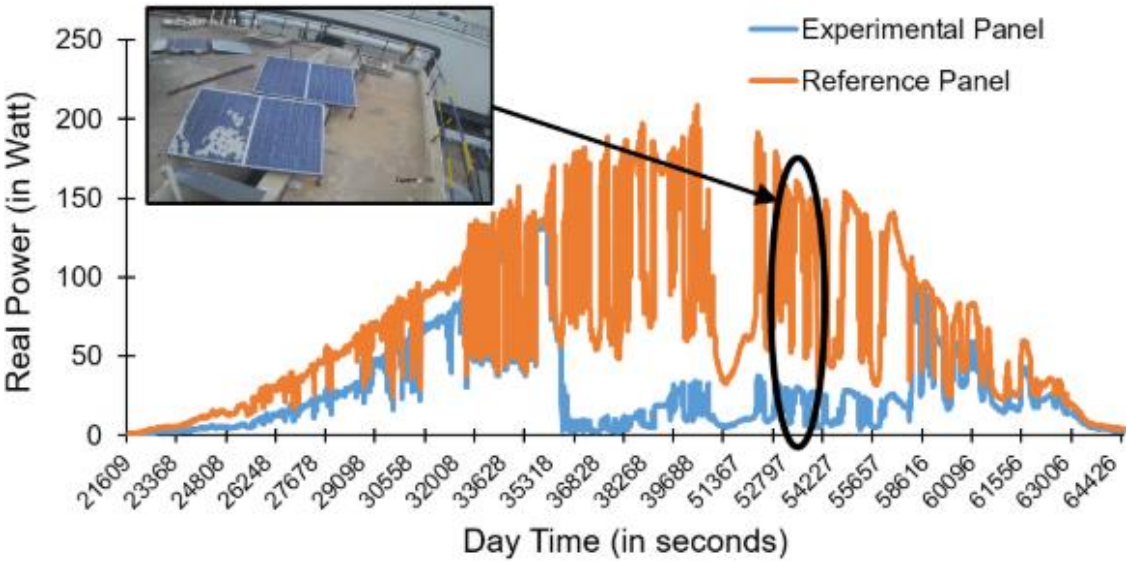


Figura 2.5: Las imágenes son capturadas cada cinco segundos, registrando la energía generada por los módulos [12].

Otro tipo de investigación emplea cámaras "*All-sky*", lo cual permite la adquisición de imágenes completas del cielo, a fin de investigar la altitud y espesor óptico de las nubes, variabilidad en la irradiancia solar y su correlación con la producción de energía en módulos FV.

Figura 2.6: Cámara para la adquisición de imágenes de cielo "*Sky InSight*", de Reuniwatt [22].

3. LABORATORIO ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

3.1. Propuesta de laboratorio

La implementación del Laboratorio de Energías Renovables, ubicado en la sede San Joaquín, permitirá la realización de ensayos en equipos fotovoltaicos, específicamente en módulos solares. Mediante el monitoreo continuo de distintas variables, como corriente, voltaje, temperatura del panel y condiciones meteorológicas, se estudiarán diferentes tipos de falla con carácter inducido, teniendo como referencia un módulo fotovoltaico patrón con normal funcionamiento.

3.1.1. Ubicación

El laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica se encontrará ubicado en la azotea del edificio F de la sede San Joaquín, perteneciente a la Universidad Técnica Federico Santa María, en la dirección Vicuña Mackenna 3939, comuna de San Joaquín, Santiago de Chile. Las coordenadas geográficas [23] del lugar mencionado son; latitud $-33°\ 29'57{,}712"$ y longitud $-70°\ 36'57{,}049"$.

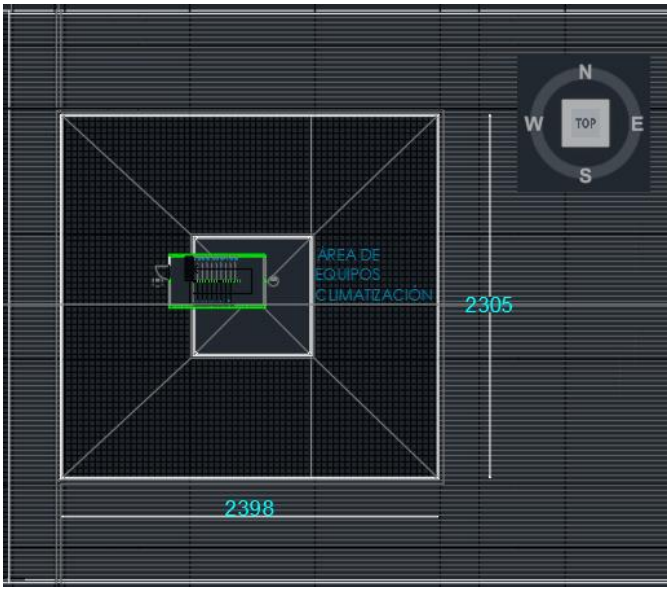


Figura 3.1: Plano edificio F, quinto piso sector poniente. Dimensiones del bosquejo en cm. En la dirección Este de la azotea, se encuentran instalados equipos de climatización.

Posteriormente, se realiza el modelamiento en SketchUp [24] para la azotea, a fin de tener una vista preliminar de los equipos y el espacio requerido.

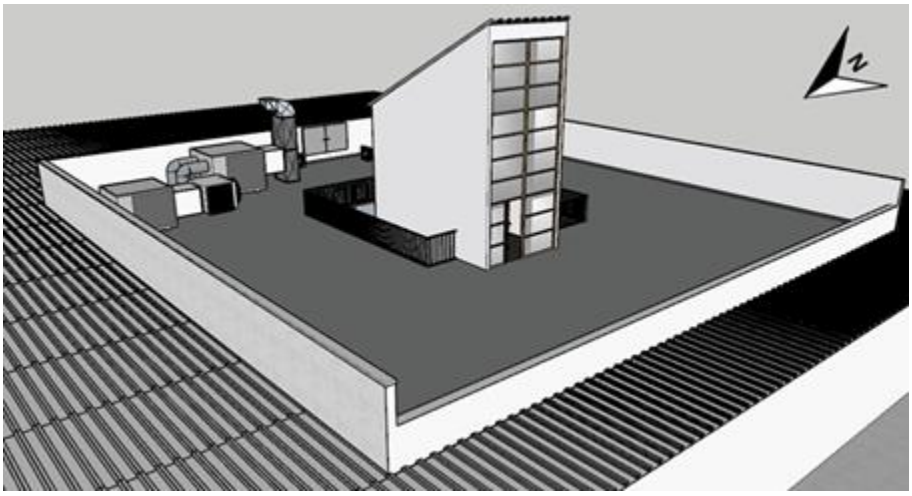


Figura 3.2: Modelamiento en tres dimensiones para la azotea del edificio F. La aleta central de la figura posee una altura de 7.700 mm, lo cual provocará problemas de sombreamiento en el sector Oeste y Sur de la azotea.

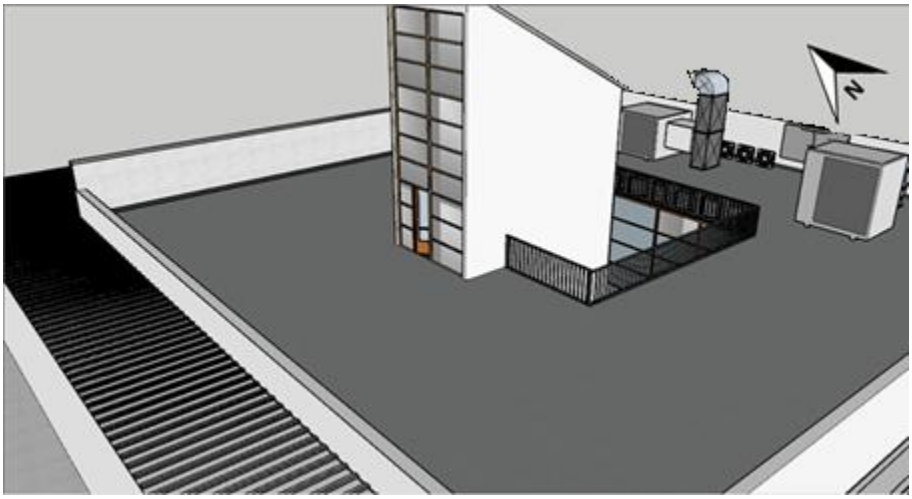


Figura 3.3: Modelamiento en tres dimensiones para la azotea del edificio F.

3.1.2. Requerimiento de espacio

Para la tecnología solar fotovoltaica, es fundamental la incidencia de radiación para la producción de energía, por lo que se debe evitar cualquier tipo de sombreado en condiciones normales de operación. La aleta central de la azotea (ver Figura 3.2) posee una altura de 7.700 mm, lo cual provocará sombreamiento. Por otra parte, las murallas del lado Norte y Oeste, con aproximadamente una altura de 1.900 mm y 1000 mm respectivamente, también conllevarán a una ausencia de radiación solar directa, debiendo ser considerado en la etapa de diseño.

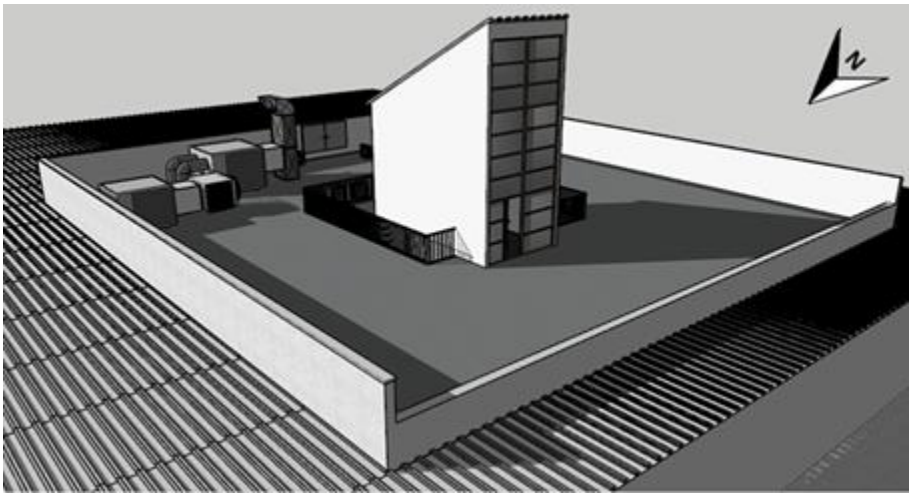


Figura 3.4: Sombreado en azotea del edificio F. Condiciones para el día 08 de junio a las 11:00 AM y un huso horario de UTC -4.

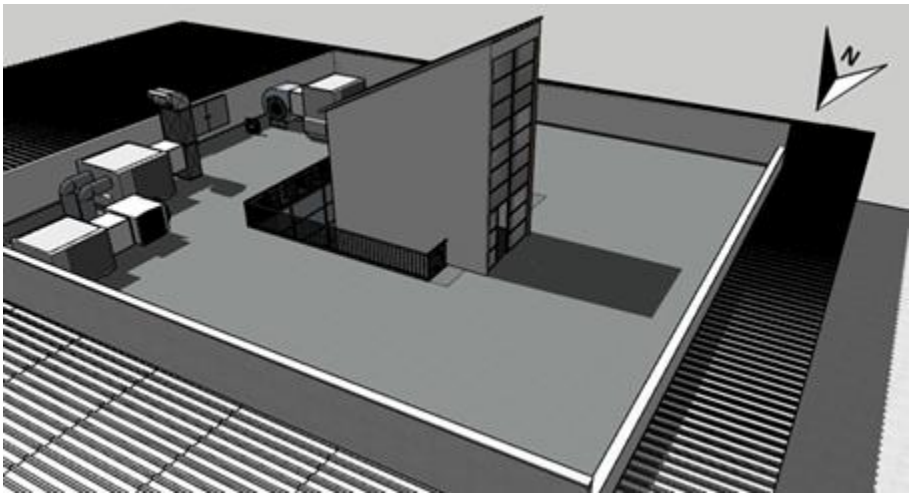


Figura 3.5: Sombreado en azotea del edificio F. Condiciones para el día 28 de noviembre a las 10:00 AM y un huso horario de UTC -4.

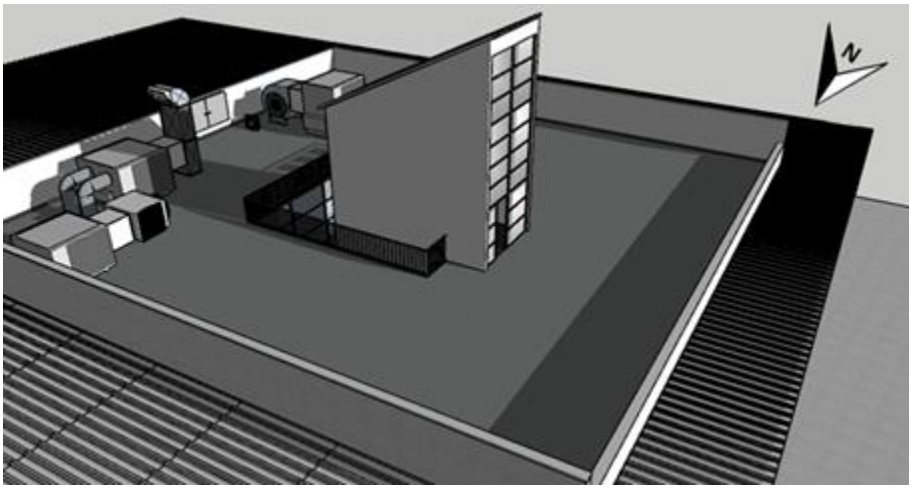


Figura 3.6: Sombreado en azotea del edificio F. Condiciones para el día 28 de noviembre a las 18:00 h y un huso horario de UTC -4.

De las imágenes anteriores es posible observar que, debido a la infraestructura, el sector Sur y Oeste de la azotea no son adecuados para trabajar con un sistema FV. Además, el lado Este se encuentra destinado a equipos de ventilación. Por lo anterior, se decide solicitar el espacio Norte de la azotea.

3.1.3. Diseño preliminar

El laboratorio solar fotovoltaico contendrá principalmente paneles fotovoltaicos de tecnología policristalina y capa fina, una estación meteorológica y un concentrador solar tipo fresnel.

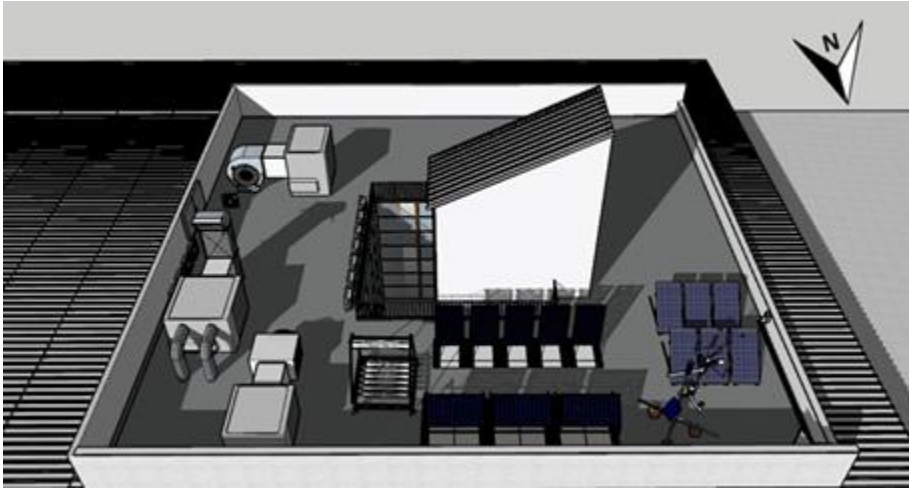


Figura 3.7: Condiciones de sombreado para el día 06 de junio a las 11:00 AM y un huso horario de UTC -4.

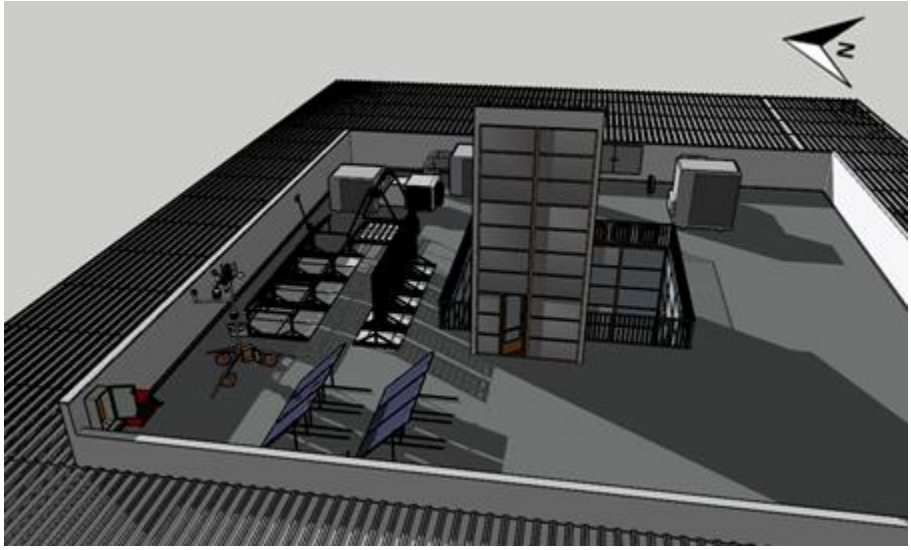


Figura 3.8: Condiciones de sombreado para el día 06 de junio a las 11:00 AM y un huso horario de UTC -4.

Las modificaciones correspondientes al plano de la azotea (ver Figura 3.1) se muestran a continuación.

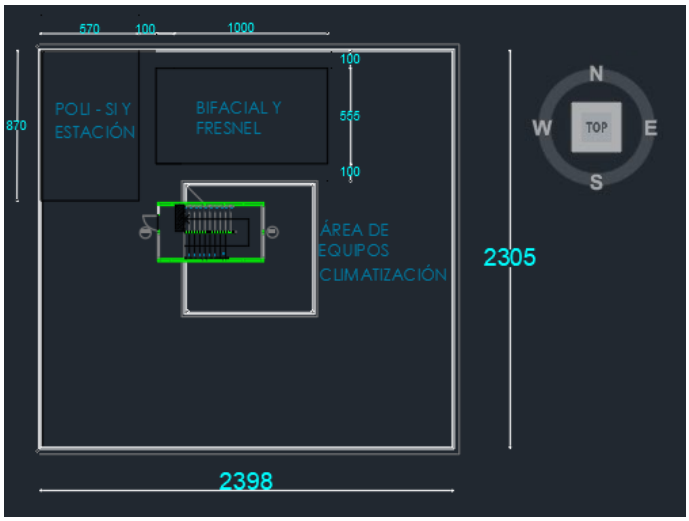


Figura 3.9: Espacio solicitado para las instalaciones del Laboratorio Solar Fotovoltaico. Dimensiones del bosquejo en cm.

Para la tecnología policristalina de silicio (Poli-SI) y la estación meteorológica se requiere un espacio de 570 cm x 870 cm en el sector Noroeste, mientras que para la tecnología bifacial y el Fresnel se empleará un lugar con dimensiones de 1.000 cm x 555 cm. Se considera un margen de 100 cm para la circulación peatonal.

Existe un problema en el diseño para la estación meteorológica al implementar los equipos en el lugar seleccionado, debido a que según las recomendaciones basadas en la Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos [25], se debe cumplir con lo siguiente:

1. La estación deberá instalarse en un terreno nivelado, con una dimensión mínima de $5x5$ m, de ser posible $10x10$ m.

2. El sitio requiere un cercado, impidiendo el ingreso de animales o personas no autorizadas.

3. El sitio debe estar fuera de la influencia de los árboles, edificaciones, o elementos que provoquen obstrucciones. La distancia entre cualquier obstaculo y el instrumento de medición de viento debe ser de al menos diez veces la altura del objeto natural o artificial que este en las inmediaciones del sitio escogido.

Debido a las condiciones señaladas anteriormente, y observando la edificación existente en la azotea del edificio F de 7.700 mm (ver Figura 3.8), es necesario mover la estación meteorológica para tener información representativa de la velocidad y dirección del viento. Para esto, se realizó un estudio para la implementación de la estación meteorológica en el campus San Joaquín [26], en el cual existen cinco lugares posibles para la instalación del equipo climático.

Figura 3.10: Imagen satelital campus San Joaquín de la UTFSM [26].

Las opciones presentadas anteriormente, se encuentran ubicadas en el techo del edificio de Mecánica (opción 1), techo del edificio B (opción 2), techo edificio F (opción 3), techo edificio A (opción 4) y el tejado en el salón de estudiantes (opción 5). Es recomendable reubicar la estación meteorológica, lo cual no se realizó en una primera instancia debido a la accesibilidad de los lugares, priorizando el funcionamiento automático de la estación y medición de irradiancia global, horizontal y difusa, como temperatura en el módulo de referencia, y parámetros ambientales, como temperatura, presión y humedad.

3.2.Recursos materiales

La instalación requiere de un sistema de monitoreo continuo y soluciones tecnológicas innovadoras, con equipos de última generación, reflejando las prácticas existentes a nivel industrial. La información necesaria para un control estándar es la siguiente:

- **Condiciones ambientales:** Registro de diversas variables meteorológicas, como humedad, temperatura y presión ambiental, velocidad y dirección del viento, irradiación solar global, horizontal y difusa.
- **Panel fotovoltaico:** Medición de voltaje, corriente y temperatura.
- **Potencia:** Nivel de generación de electricidad en el conjunto de paneles fotovoltaicos.
- **Análisis digital:** Recolección de imágenes en el espectro visible y termográfico.

A continuación, se describen los equipos requeridos para el desarrollo del Laboratorio de Energía Renovable.

3.2.1. Trazador de curva I-V

Para representar las condiciones de trabajo eléctrico de un panel fotovoltaico y su estado de funcionamiento, se emplea el trazado de la curva I-V. Se busca realizar pruebas desde conexiones en string, hasta celdas individuales laminadas (es decir, 1- cell mini modules). La mayoría de los trazadores no llegan a dejar el dispositivo en corto circuito, puesto que siempre existe una caída de tensión propia de la electrónica del equipo. Dicha caída de tensión es despreciable en un módulo FV, pero no a nivel de celda, puesto que el voltaje de circuito abierto en una celda se encuentra entre los 560 mV y 700 mV y la caída de tensión de un trazador con alta resolución ronda los 300 mV a 400 mV.

Tabla 3.1: Comparativa entre trazadores de curva I-V.

Marca	EKO	Solmetric	Halm
Modelo	MP-11 I-V Checker	PVA-1000S	CetisPV-Outdoortest
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES			
Rango de operación	Voltaje 10 V - 1000 V; Corriente 0,1 A - 30 A; Potencia 10 W - 18000 W; Temperatura 0 °C - 35 °C	Voltaje 0 V - 1000 V; Corriente 0 A - 20 A (opcional 30 A); Temperatura -10 °C a 65 °C	Voltaje 500 mV - 1000 V; Corriente 2 A - 100 A, Temperatura -10 °C a 100 °C
Resolución	Voltaje 0,01 V; Corriente 0,01 A	Voltaje 0,025 V; Corriente 0,002 A	Resolución de Voltaje y corriente menor a 0,004%.
Tiempo de medición	5 s	4 s	0,12 s

Puntos de datos	400	100 a 500	Sobre 512
Fuente de alimentación	12 Vdc, 5 W/ 8 baterías AA	Batería con duración de 12 h	12 Vdc a 24 Vdc o Batería con duración de 8 h

Según un estudio que recopila los resultados de distintas publicaciones en 40 años acerca de degradación en módulos fotovoltaicos [27], revela que los paneles de tecnología policristalina y capa fina se degradan, en promedio, un 0,7 %/año y 1,5 %/año, respectivamente. Por otra parte, la norma dedicada a los requerimientos del simulador solar, EN 60904-9 [28] (con equivalente IEC 60904-7:2007), define clasificaciones para el simulador solar en base a la precisión, estableciendo tres tipos de clase (A, B, C), donde la clase más alta (A) requiere una sensibilidad a la irradiancia menor al 2%.

La elección del trazador corresponde al modelo CetisPV-Outdoortest, marca Halm (ver Tabla 3.1). El motivo principal es la alta resolución del equipo, menor al 0,004% (clase A según norma EN 60904-9), destacándose por sobre el resto de los trazadores de curva portátiles. Por otra parte, para lograr las mediciones a nivel de celdas individuales laminadas, se añade una modificación especial al equipo, de manera que se compensa la caída de tensión y se obtiene la magnitud en corto circuito de la celda. La solución fue la implementación de una carga electrónica, donde básicamente se compensa la caída de tensión con una fuente de alimentación conectada entre la celda y el trazador de curva.

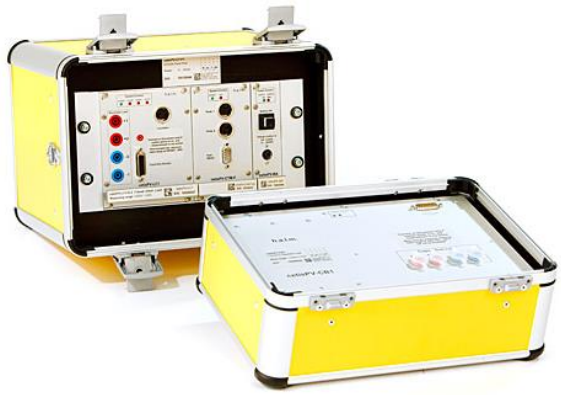


Figura 3.11: Trazador de curva CetisPV-Outdoortest, marca Halm [29].

3.2.2. Estación meteorológica

Se requieren mediciones de las condiciones climáticas en el entorno donde se desarrollen los estudios y actividades. Dentro de las variables analizadas, se encuentra la humedad, temperatura y presión atmosférica, nivel de precipitación de lluvias, velocidad y dirección del viento, irradiancia global, difusa y directa.

Tabla 3.2: Diferentes sistemas de monitoreo para las variables meteorológicas.

Marca	Campbell	Campbell	Kipp & Zonen
Modelo	RSR2	RSR100	Razon + ALL-IN-ONE System
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES			
Irradiancia	Medición de irradiación global y difusa. Equipo piranómetro de licor (Licor 200), con fotodiodo de células de silicio con banda sombreadora.	Medición de irradiación global y difusa. Equipo piranómetro de licor (RSR2). Opcional; instalación de piranómetro extra. Incluye irradiancia en el plano inclinado (POA), temperatura en celda de referencia y posición solar.	Medición de irradiación global, difusa y directa. Equipos Pirheliómetro (PH1) y piranómetro sombreado (PR1).

Información climática	Temperatura ambiente. Opcional; sensor de humedad relativa, barómetro y pluviómetro.	Velocidad del viento, dirección del viendo, temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, precipitación y posición geográfica (GPS).	Anemómetro RM Young 03002, anemómetro RM Young 05103, barómetro CS106, Pluviómetro Young 5220H y posición geográfica (GPS).
CARACTERÍSTICAS GENERALES			
Fuente de alimentación	Módulo fotovoltaico de 10 W. Opcional; módulo extra de 10 W.	Módulo fotovoltaico de 20 W.	Batería 13 W; CVP1 y CVP2.
Registrador de datos	CR800/CR850. Compatibles CR1000, CR1000X y CR3000.	CR1000/ CR1000X.	METEON y LOGBOX SD.

El equipo seleccionado corresponde a la estación meteorológica RSR100 de Campbell, debido a su alta autonomía y bajo mantenimiento. Se destaca que la estación RSR100 incluye el equipamiento RSR2 (ver Tabla 3.2). Además, posee extensiones para la instalación de otros instrumentos. Se añadieron dos piranómetros adicionales CMP10, donde uno tiene la función de comparar las mediciones entregadas por el piranómetro de licor del RSR2 (irradiancia global horizontal) y el otro piranómetro se instaló para medir en el plano inclinado (POA).

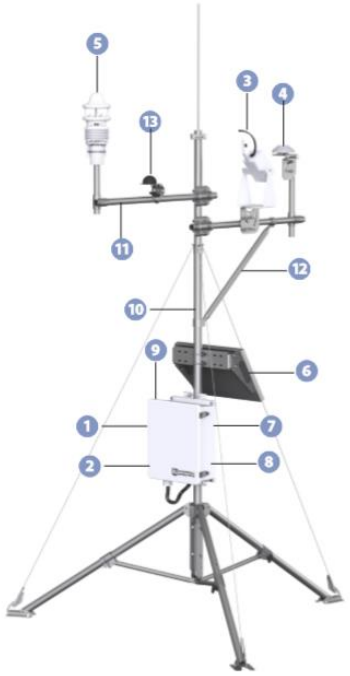


Figura 3.12: Estación meteorológica RSR100, marca Campbell [30].

La estación meteorológica de la anterior, posee el siguiente equipamiento; 1) registrador de datos CR1000/CR1000X, 2) Modem 4G/LTE, 3) Equipo sombreador RSR2, 4) Soporte CM255LS para instalación de piranómetro secundario, 5) WS600 para mediciones climáticas, 6) SP20 panel solar de 20 W, 7) BP24 batería recargable con capacidad 24 A · h, 8) CH200 controlador de carga inteligente, 9) PWENC16/18 cableado para instalación de registrador de datos, 10) CM106B trípode de tubos de acero galvanizado, 11) CM203 extensión, 12) CMB200 extensión, 13) GPS16X-HVS receptor GPS con antena integrada (ver detalle de componentes en [31]).

3.2.3. Piranómetro CMP 10

Se incorporaron dos piranómetros CMP10 marca Kipp & Zonen en la estación meteorológica RSR100 (ver Figura 3.12). El equipo mencionado posee una precisión en las medidas entregadas, por lo que es usado como instrumento de referencia.

Tabla 3.3: Especificaciones técnicas del piranómetro CMP10.

Marca	Kipp & Zonen
Modelo	CMP 10
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Rango espectral nm	285 a 2800

Sensibilidad $\mu \cdot V/(W/m^2)$	7 a 14
Temperatura de operación °C	Desde -40 a 80
Máxima irradiancia solar W/m^2	4000
Clasificación ISO 9060:2018	Espectralmente plana Clase A
Tiempo de respuesta	Menor a 5 segundos
Sensibilidad de dependencia de temperatura entre -40 °C a 80 °C	Menor a 1%

Figura 3.13: Piranómetro CMP10, marca Kipp & Zonen [32].

3.2.4. Cámara térmica posición fija

Para la recopilación continua de imágenes en el espectro visible y termográfico, a fin de evaluar la distribución térmica de los módulos FV, obteniendo morfología y sobre temperatura de fallas. Se adquirió la cámara de alta resolución MIC612, capaz de trabajar en condiciones ambientales y con un sistema de autolimpieza del lente. A continuación, se presentan sus especificaciones técnicas.

Tabla 3.4: Comparativa de cámaras térmicas fijas disponibles en el mercado.

Marca	FLIR	Bosch	Bosch
Modelo	SC8200	MIC 612	MIC IP 9000
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES			
Resolución térmica (pixeles)	1,024 x 1,024 o 1,344 x 784	320x240	640x480
Rango de Temperatura	Desde -20 °C a 500 °C (standard)	Desde -40 °C a 60 °C	Desde -40 °C a 65 °C
Precisión	±2°C o ±2% de la medida	-	-
Sensibilidad térmica	<25 mK	<50 mK @f 1.0	<72mK

Longitud de onda cámara	3.0 - 5.0 µm o 1.5 - 5.0 µm	7,5 a 13,5 µm	8 a 14 µm
Tipo de cámara	fija	fija	fija
Corrección manual de nivel de spam	si	si	si
Modo de fusión	no	si	si
Imágenes dinámicas multiespectrales	no	no	no
Foco	Manual	Manual	-
Grado de protección IP	Desconocido	IP 68	IP 68
Zoom Óptico	10x optical zoom 50/500 mm	36x optical zoom, 36 mm lens	30x optical zoom, 4,3 a 129 mm lens
Tipo de sensor	Indium Antimonide (InSb)	un-cooled microbolometer	un-cooled Vanadium Oxide microbolometer

Según la clasificación de cámaras térmicas dispuestas en la norma IEC 60904-12 (ver la revisión de infrarrojos de IEA [33], apartado 2.2.1, *"Camera requirements"*), la clase de este tipo de equipos se divide en cuatro categorías (clase baja, clase media, clase profesional y clase profesional alta), con parámetros de calibración, rango de temperatura, resolución, sensibilidad térmica, precisión, entre otros.

La cámara térmica fija operará en condiciones ambientales, por lo que un elevado grado de protección IP es fundamental. Por otro lado, las cámaras de Bosch, modelos MIC 612 y MIC IP 9000 cumplen con lo requerido para el experimento, optando finalmente por la primera opción, con grado de clase profesional según norma IEC 60904-12.

Figura 3.14: Cámara térmica MIC Series 612, marca Bosch [34].

3.2.5. Cámara térmica manual

Se adquiere una cámara termográfica manual, con el objetivo de comparar y calibrar las mediciones obtenidas mediante la cámara térmica fija MIC612 (Figura 3.14).

Tabla 3.5: Comparativa de cámaras térmicas manuales disponibles en el mercado.

Marca	Fluke	Flir	DALI
Modelo	TI 400	E75	LT 7-P
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES			
Resolución térmica (pixeles)	320x240	320x240	384x288
Rango de Temperatura	-20 a 1200 °C	-20°C a 120 °C	-20 a 650 °C
Precisión	± 2 °C o 2 % (la mayor de ambas)	± 2 °C	± 2 °C o 2 % (la mayor de ambas)
Sensibilidad térmica	50 mK a una temperatura de 30 °C	30 mK a una temperatura de 30 °C	Menor a 30 mK a una temperatura de 30 °C
Longitud de onda cámara	7,5 a 14 µm	7,5 a 14 µm	8 a 14 µm
Tipo de cámara	Manual	Manual	Manual
Corrección manual de nivel de spam	Sí	Sí	Sí
GPS	No	Sí	No
Modo de fusión	Sí	No	No
Imágenes dinámicas multiespectrales	No	Sí	No

Foco	Manual/Automático	Manual/Automático	Manual
Tipo de sensor	un-cooled microbolometer	un-cooled microbolometer	un-cooled microbolometer
Grado de protección IP	IP54	IP54	IP54
Zoom Óptico	No	No	2X
Medidor de distancia laser	Sí	Sí	No

Se requiere una cámara térmica de clase media [33] (ver apartado 2.2.1, *"Camera requirements"*), con resolución mayor a 320x240 pixeles, sensibilidad térmica mayor o igual a 50 mK, con corrección manual al nivel de spam, modo fusión, imágenes espectrales dinámicas, foco automático y medidor de distancia láser. El equipo que mejor cumple con las características antes nombradas corresponde a la cámara térmica TI 400, de Fluke (ver tabla anterior).

Figura 3.15: Cámara térmica TI 400 9HZ, marca Fluke [35].

3.2.6. Inversor On Grid

Para la producción de electricidad, se requiere la instalación de un inversor fotovoltaico. A continuación, se muestran las alternativas analizadas.

Tabla 3.6: Comparación de inversores disponibles en el mercado.

Marca	Omnik	SMA	GoodWe
Modelo	Omniksol-3k-TL2	SB 3000TL-21	GW 3000-NS

CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA EN CORRIENTE CONTÍNUA (CC)			
Potencia máxima de CC (con cos phi=1)	3400 W	3200 W	3900 W
Tensión de entrada máxima	590 V	750 V	500 V
Rango de tensión MPP	120 V - 550 V	175 V - 500 V	80 V - 450 V
Tensión de entrada mínima/ de inicio	120 V / 150 V	125 V / 150 V	80 V / 80 V
Corriente máxima entrada	12 A	15 A	18 A
Número de entradas independientes	2	2	1
CARACTERÍSTICAS DE SALIDA EN CORRIENTE ALTERNA (CA)			
Potencia asignada	3000 W	3000 W	3000 W
Potencia aparente de CA máxima	3300 VA	3000 VA	-
Frecuencia / tensión asignadas de red	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V	50 Hz / 230 V
Corriente máx. de salida	14,4 A	16 A	13,5 A
Factor de desfase ajustable	0,9 inductivo y 0,9 capacitivo	0,8 inductivo y 0,8 capacitivo	0,8 inductivo y 0,8 capacitivo
RENDIMIENTO			
Eficiencia	97,3%	97,0%	97,0%
Rango de temperatura de servicio	Desde 25 °C a 60 °C	Desde 25 °C a 60 °C	Desde 25 °C a 60 °C

Según la tabla anterior, los diferentes inversores poseen características similares. Se realizó la compra del inversor Omniksol-3k-TL2. La decisión fue principalmente por el precio del producto, siendo la alternativa más económica.

Figura 3.16: Inversor 3k-TL2, marca Omniksol [36].

3.2.7. Microinversor

Para una conexión aislada e independiente del resto del sistema, se adquieren equipos de inversión de corriente que trabajan únicamente con un módulo FV. En el mercado no existen variadas alternativas, por lo que se adquiere el equipo M250-72 de Enphase.

Tabla 3.7: Especificaciones técnicas microinversor.

Marca	ENPHASE
Modelo	M250-72-2LN-S2
CARACTERÍSTICAS DE ENTRADA EN CORRIENTE CONTINUA (CC)	
Potencia de entrada recomendada (STC)	210 W hasta 350 W
Compatibilidad	Módulos fotovoltaicos de 60 y 72 celdas
Tensión máxima de entrada de CC	62 V
Tensión máxima de registro de corriente	27 V hasta 48 V
Rango de operación	16 V hasta 60 V
Tensión de arranque mínima/máxima	22 V / 48 V
Corriente de corto circuito máxima en CC	15 A
CARACTERPISTICAS DE SALIDA EN CORRIENTE ALTERNA (CA)	
Potencia máxima de salida en CA	258 W
Potencia de salida nominal	250 W
Corriente de salida nominal	1,09 A
Tensión nominal	230 V
Frecuencia nominal	50 Hz
Factor de potencia	> 0,95

Máximo de unidades por circuito derivado de 20 [A]	14 (Ph + N), 42 (3Ph + N)
Máximo de unidades por sección de cable	14 (Ph + N), 24 (3Ph + N)
Corriente máxima de falla en la salida	850 mA en RMS para 6 ciclos
Corriente (inrush)	0 A
Corriente de retroalimentación de CA al módulo	0 mA
RENDIMIENTO	
Eficiencia EN50530 (EU)	95,7%
Eficiencia estática del MPPT (ponderada, referencia EN50530)	99,5%

Figura 3.17: Microinversor M250-72-2LN-S2, marca Enphase [37].

Para la producción de energía y sincronización con la red, el microinversor de Enphase requiere el sistema de monitoreo Envoy.

Tabla 3.8: Especificaciones técnicas sistema de monitoreo Envoy.

Marca	ENPHASE
Modelo	ENVOY MONITORING SYSTEM ENV-230-EU-M
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Comunicaciones de línea eléctrica	Tecnología propia de Enphase
Red de área local (LAN)	10/100 con detección y negociación automáticas
USB	Interfaz USB 2.0 con detección y negociación automáticas, 802.3
Número de dispositivos sondeados	Controla hasta 600 micro inversores Enphase

Ensamblado de cables, Ethernet, RJ45, naranja, 3 m	Incluido con todos los modelos
Par de puentes de comunicación de la línea eléctrica	Solicite por separado: EPLC-02 (Europa), EPLC-03 (Reino Unido) o EPLC-04 (Australia)
Adaptador USB N inalámbrico (802.11b/g/n)	Solicite WF-01 por separado
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Fuente de alimentación de CA	230 V 50 Hz
Consumo eléctrico	Típico: 2,5 W; máximo: 7 W
Intervalo de temperatura ambiente	De -40 ºC a 65 ºC
Refrigeración	Convección natural, sin ventilador
Clasificación ambiental de la carcasa	Interior
Precisión de medición	Calificación de +/-5% o menor
Conformidad	N 60950-1, EN 55022 clase B, EN 55024, EN50065-1,EN 50065-2-2, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3

Figura 3.18: Sistema de monitoreo Envoy, marca Enphase [38].

3.2.8. Módulo fotovoltaico

Las tecnologías solar FV son módulos policristalinos, de marca AstroEnergy y SunEdison, los cuales poseen características similares. Por otra parte, la tecnología bifacial pertenece a paneles Risen Solar.

Tabla 3.9: Características paneles FV del laboratorio.

Marca	AstroEnergy	Risen Solar Technology
Modelo	ASM6612P 315	RSM72-6-370BMDG

ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS (STC)		
Potencia nominal (Pmpp)	315 W	370 Wp
Tensión nominal (Vmpp)	35.83 V	39,60 A
Corriente nominal (Impp)	8,80 A	9,35 A
Voltaje en circuito abierto (Voc)	45,55 V	48,15 V
Corriente de corto circuito (Isc)	9,02 A	9,90 A
Eficiencia del módulo	16,3%	18,8%
Coeficiente de temperatura (Pmpp)	MENOS 0.408%/°C	MENOS 0.390%/°C
Coeficiente de temperatura (Isc)	MAS0.050%/°C	MAS0.050%/°C
Coeficiente de temperatura (Voc)	MENOS 0.311%/°C	MENOS 0.290%/°C
Voltaje máximo del sistema (Vdc)	1000 V	1500 V
Número de diodos	3	3
Capacidad máxima del fusible	15 A	20 A
ESPECIFICACIONES MECÁNICAS		
Tipo de celda	Célula policristalina, tecnología 3-busbar.	Monocristalina, 5BB
Número de celdas/Disposición de celdas	72/ 6 x 12	72/ 6 x 12
Dimensiones (ancho x alto x profundidad)	994 x 1956 x 50 mm	992 x 1984 x 25 mm
Tecnología del marco	Aluminio, plata anodizada.	Aleación de aluminio anodizado tipo 6063T5, color plata.
Composición del modulo	Vidrio / EVA / Backsheet (blanco)	Alta transmisión, bajo contenido de hierro, vidrio ARC templado.
Peso (sólo módulo)	23,5 kg	25 kg
Espesor del vidrio frontal	3,2 mm	2,0 mm
Clasificación IP de la caja de conexiones	IP 67	IP 67
Tipo de conector	MC4	Risen Twinsel PV-SY02
CALIFICACIÓN Y GARANTÍAS		

Garantía degradación del módulo	Garantía de 12 años. Al primer año potencia mayor a 97,5%. Al año 25 potencia mayor a 80,7%	Garantía de 12 años. Degradación del módulo de 0,5% de la eficiencia anual. A los 10 años potencia mayor al 90%. A los 25 años potencia mayor al 80%

Figura 3.19: En la izquierda se encuentra el panel de tecnología policristalina, marca AstroEnergy [39]. En la derecha, el módulo bifacial, marca RisenEnergy [40].

3.2.9. Estructura de soporte

Para la fabricación de estructuras de soporte de los módulos FV, se contrataron los servicios de la empresa Sufija [41], la cual realizó el cálculo y diseño de estructuras. A continuación, se muestran las vistas isométricas para los soportes creados. En el Anexo 7.3 se encuentran los planos de fabricación y sus respectivas dimensiones.

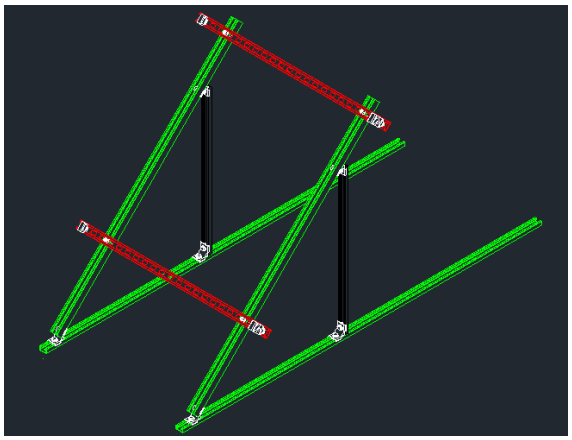


Figura 3.20: Estructura individual para panel policristalino (ver módulo en Figura 3.19). El soporte es variable, ajustando los bastidores traseros. El ángulo de inclinación varía entre 15 y 45°. Los planos de fabricación se encuentran en la Figura 7.1 (ver Apéndice 7.3) [41].

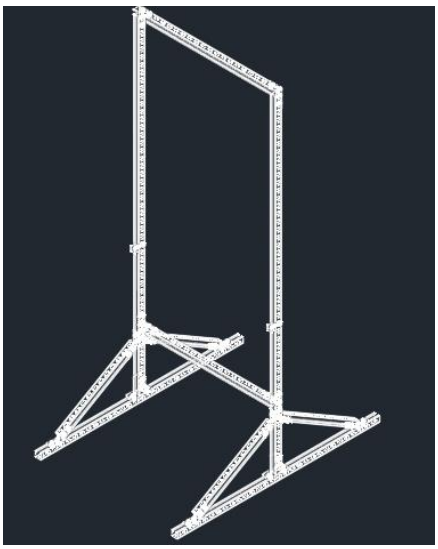


Figura 3.21: Estructura individual para panel bifacial (ver módulo en Figura 3.19). El soporte es fijo, con ángulo de 90°. Los planos de fabricación se encuentran en la Figura 7.2 (ver Apéndice 7.3) [41].

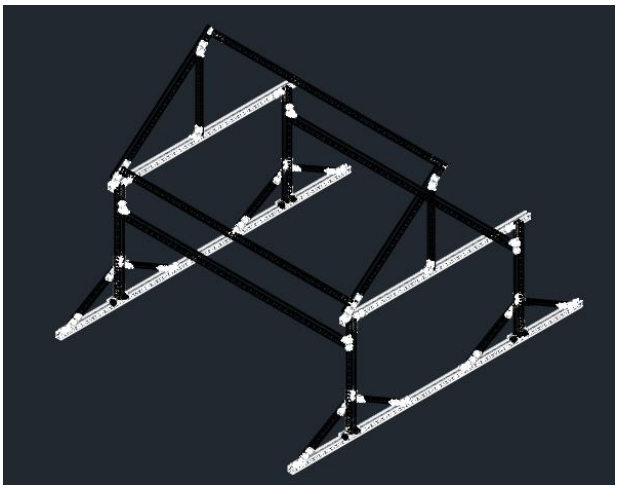


Figura 3.22: Estructura individual para panel bifacial (ver módulo en Figura 3.19). El soporte es variable, ajustando los bastidores traseros. El ángulo de inclinación varía entre 15 y 40°. Los planos de fabricación se encuentran en la Figura 7.3 (ver Apéndice 7.3) [41].

3.2.10. Registrador de datos

En la instrumentación disponible en la universidad, se dispone de un registrador de datos, modelo CR1000, el cual, es compatible con la estación meteorológica RSR100 (Figura 3.12). Además, se adquiere el equipo CR1000X, el cual es la mejora del anterior mencionado CR1000.

Tabla 3.10: Registrador de datos CR1000 y CR1000X.

Marca	Campbell	Campbell
Modelo	CR1000	CR1000X
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS		
Entradas analógicas	16 individuales u 8 diferenciales (configurados individualmente)	16 individuales u 8 diferenciales (configurados individualmente)
Contadores de pulso	2	10 (P1 a P2 y C1 a C8)
Terminales de excitación de voltaje	3 (VX1 a VX3)	4 (VX1 a VX4)
Puertos de comunicaciones	Periférico paralelo, RS-232, CS I / O	Ethernet, CPI, RS-485, CS I/O, RS-232, USB Micro B
Número de terminales de conmuntación para 12 V	1 terminal	2 terminales
Límites de entrada	± 5 Vdc	± 5 Vdc

Precisión de voltaje analógico	± 0.06% (medida incluida con la desviación) desde 0 °C a 40 °C	± 0.06% (medida incluida con la desviación) desde -40 °C a 70 °C. ± 0.04% (medida incluida con la desviación) desde 0 °C a 40 °C. ± 0.08% (medida incluida con la desviación) desde -55 °C a 85 °C
ADC	13 bit	24 bit
Requerimientos de energía	9.6 a 16 Vdc	10 a 18 Vdc para entrada de cargador (CHG)
Batería de respaldo SRAM para uso de CPU y almacenamiento final	4 MB	4 MB

Figura 3.23: Registrador de datos Campbell, en la izquierda el CR1000 [42] y en la izquierda el CR1000X [43]

3.2.11. Multiplexor

Para aumentar el número de sensores a medir mediante los registradores de datos CR1000 y CR1000X, se utiliza el multiplexor, por lo que se adquiere al inventario del laboratorio. A continuación, se describen sus especificaciones.

Tabla 3.11: Multiplexor, incrementa el número de sensores para el registrador de datos.

Marca	Campbell
Modelo	AM16/32B
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS	
Requerimientos de energía	9.6 Vdc a 16 Vdc
Consumo típico	Reposo: < 210 µA. Activo: 6 mA
Niveles de reinicio	Inactivo: < 0,9 V. Activo: 3,3 V a 8,0 V
Avance scan	Ocurre en la transición del pulso de señal de clock (de debajo de 1,5 V a más de 3,3 V)

Ancho de pulso mínimo clock	1 ms
Tiempo de actuación máximo de relé	20 ms
Funcionamiento de relé	"break before make"
Resistencia de relé inicial (cerrado)	0,1 Ω
Corriente de conmutación máxima	500 mA. La conmutación de corriente mayor de 30 mA (ocasionalmente aceptable 50 mA) degrada la funcionalidad de ese canal en la conmutación de señales de bajo voltaje.
Voltaje máximo de conmutación	50 Vdc
Ciclo de vida mínimo	5 x 10^7 operaciones
Clasificación máxima de voltaje de contacto	70 V
Voltaje máximo	8 Vdc (nivel clock)
Conformidad directiva CE	EN 61326: 1998 EN 55022: 1998 Clase B
Surge	Cumple con IEC61000-4-5, nivel de prueba 3 (± 2 kV, impedancia de acoplamiento de 2 Ω)
ESPECIFICACIONES MECÁNICAS	
Dimensiones	239 x 102 x 46 mm (9,4 x 4,0 x 1,8 in)
Peso	680 g (1,5 lb)
Rango de temperatura de funcionamiento	Estándar: -25 °C a 50 °C. Extendido: -55 °C a 85 °C

Figura 3.24: Multiplexor AM16/32B, marca Campbell [44].

3.2.12. Drone y cámara drone

A fin de disminuir los costos de operación y mantenimiento en las plantas FV, se decide adquirir un drone con cámara térmica y realizar investigaciones en el análisis de imágenes. A continuación, se presentan las dos alternativas evaluadas para la compra del equipo.

Tabla 3.12: Características técnicas drone con cámara térmica evaluados.

Marca	DJI	DJI
Modelo	INSPIRE 1 T600	MATRICE M200
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Cantidad de baterías	1	2
Peso con baterías	3,06 kg	3,80 kg
Peso máximo de despegue	3,50 kg	6,14 kg
Tiempo máximo de vuelo	18 min	27 min
Ángulo máximo de inclinación	35°	Modo P: 30° (Sistema de visión delantera activado: 25°); Modo A: 35°; Modo S: 35°
Máxima velocidad	21,9 m/s o 35,3 m/s (modo ATTI, sin viento)	Modo S: 23,0 m/s, Modo P: 17,0 m/s, Modo A: 23,0 m/s
Distancia máxima de transmisión (sin obstrucciones, libre de interferencias)	5 km (FCC); 3.5 km (CE); 2 km (MIC)	7 km (FCC); 3.5 km (CE), 4 km (SRRC).
Gimbal	ZENMUSE X3, ZENMUSE X5, ZENMUSE X5R, ZENMUSE XT, ZENMUSE Z3	ZENMUSE X4S, ZENMUSE X5S, ZENMUSE Z30, ZENMUSE XT, ZENMUSE XT2, SLANTRANGE 3PX, SENTERA AGX710
SISTEMA DE VISIÓN DELANTERA		
Rango de detección de obstáculos	No posee visión delantera	0,7 m - 30 m (2,3 pie - 98.4 pie)
FOV	No posee visión delantera	Horizontal 60°, Vertical 54°
Entorno operativo	No posee visión delantera	Superficies con patrones claros e iluminación adecuada (> 15 lux)
SISTEMA DE VISIÓN HACIA ABAJO		
Rango de velocidad	< 8 m/s (26,2 pie/s) a la altura de 2 m (6,56 pie)	< 10 m/s (32,8 pie/s) a la altura de 2 m (6.56 pie)
Rango de operación	< 3 m (9,8 pie)	< 10 m (32,8 pie)
Entorno operativo	Superficies con patrones claros e iluminación adecuada (> 15 lux)	Superficies con patrones claros e iluminación adecuada (> 15 lux)
Rango de funcionamiento del sensor ultrasónico	0,5 m - 5 m (0,17 pie - 16,4 pie)	0,1 m - 5 m (0,33 pie - 16,4 pie)
BATERÍA ESTÁNDAR		

Modelo	TB47	TB50
Capacidad	4500 mAh	4280 mAh
Energía	99,90 Wh	97,58 Wh
Potencia máxima de carga	180 W	180 W

Se realiza la compra del drone Matrice 200 por sobre el Inspire 1 (ver Tabla 3.12), principalmente por la autonomía de vuelo y la distancia máxima de transmisión.

Figura 3.25: Drone matrice 200, marca DJI [45].

Para un análisis termográfico, se requiere una cámara compatible con el drone Matrice 200. Las alternativas presentadas son la cámara Zenmuse XT y Zenmuse XT2.

Tabla 3.13:Características técnicas cámara drone.

Marca	DJI	DJI
Modelo	ZENMUSE XT	ZENMUSE XT2
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Cámara térmica	Uncooled VOx Microbolometer	Uncooled VOx Microbolometer
FPA / formatos de visualización de video digital	640×512; 336×256	640×512; 336×256
Zoom digital	640 × 512 : 2x, 4x, 8x; 336 × 256 : 2x, 4x	640×512: 1x, 2x, 4x, 8x; 336×256: 1x, 2x, 4x
Tamaño del pixel	17 µm	17 µm
Banda espectral	7,5 µm - 13,5 µm	7,5 µm - 13,5 µm
Sensibilidad (NEdT)	<50 mk @ f/1.0	<50 mk @ f/1.0
Rango de escena (High gain)	640 × 512 : -25 °C a 135 °C; 336 × 256 : -25 °C a 100 °C	640×512: -25 °C a 135 °C; 336×256: -25 °C a 100 °C

Formato	Fotografía: JPEG, TIFF; Video: MP4	Fotografía: JPEG, TIFF, R-JPEG; Video: 8 bits: MOV, MP4 14 bit: TIFF Sequence, SEQ
OPCIONES DE LENTE Y RESOLUCIÓN		
Modelo de lente térmico	6,8 mm; 7,5 mm; 9,0 mm; 13 mm; 19 mm	9 mm; 13 mm; 19 mm; 25 mm
17µ 640×512 FoV, IFoV	6,8 mm: N/A. 7,5 mm: f/1.4 90° x 69° 2.267 mr. 9,0 mm: f/1.4 69° x 56° 1.889 mr. 13 mm: f/1.25 45° x 37° 1.308 mr- 19 mm: f/1.25 32° x 26° 0.895 mr	9 mm: N/A. 13 mm: f/1.25 45° ×37° 1.308 mr. 19 mm: f/1.25 32° ×26° 0.895 mr. 25 mm: f/1.1 25° ×20° 0.680 mr
17µ 336×256 FoV, IFoV	6,8 mm: f/1.4 49.1° x 37.4° 2.519 mr. 7,5 mm: N/A. 9 mm: f/1.25 35° x 27° 1.889 mr. 13 mm: f/1.25 25° x 19° 1.308 mr. 19 mm: f/1.25 17° x 13° 0.895 mr	9 mm: f/1.25 35° ×27° 1.889 mr. 13 mm: f/1.25 25° ×19° 1.308 mr. 19 mm: f/1.25 17° ×13° 0.895 mr. 25 mm: N/A
Mínima distancia focal	2,3 cm; 2,5 cm; 3,2 cm; 7,6 cm; 15,3 cm	3,2 cm; 7,6 cm; 15,3 cm; 30 cm
Distancia hiperfocal	1,2 m; 1,2 m; 2,1 m; 4,4 m; 9,5 m	2,1 m; 4,4 m; 9,5 m; 21 m
Profundidad de campo hiperfocal	0.6 m; 0,6 m; 1,1 m; 2,2 m; 4,8 m	1,1 m; 2,2 m; 4,8 m; 11 m

La elección corresponde a la cámara termográfica Zenmuse XT, debido a que en una primera instancia no es imprescindible un equipo con alta resolución.

Figura 3.26: Cámara drone Zenmuse XT, marca DJI [46].

3.2.13. Notebook

Se requiere un computador de gama media-alta, a fin de transmitir y almacenar datos provenientes del análisis fotográfico. El equipo seleccionado es un notebook marca Dell Inspiron 14" 3467 (Figura 3.27), con procesador Intel Core i5 7200U, memoria de 8 GB y un disco duro de 1 TB.

Figura 3.27: Notebook Inspiron 14" 3467, marca Dell [47].

3.2.14. Cámara Logitech C920

Se adquirió una cámara Logitech, la cual es conectada al notebook del laboratorio (ver Figura 3.27). Su uso era la obtención de imágenes termográficas de los paneles FV a bajo costo, mientras se esperaba la adquisición de la cámara Bosch de la Figura 3.14.

Tabla 3.14: Cámara C920 HD Logitech.

Marca	Logitech
Modelo	Webcam HD C920
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	

Resolución máxima	1080 p/30 fps - 720 p/30fps
Tipo de enfoque	Automático
Micrófono integrado	Estéreo
Longitud de cable	1,5 m
REQUISITOS DEL SISTEMA	
Sistema operativo	Windows 10 o posterior, Windows 8, Windows 7
Compatibilidad modo USB Video Device Class (UVC)	macOS 10.10 o posterior, Chrome OS, Android v 5.0 o posterior, Puerto USB, Conexión a Internet
INFORMACIÓN DE GARANTÍA	
Garantía	2 años de garantía de hardware limitada

Figura 3.28: C920 HD, marca Logitech [48].

3.2.15. Carro metálico

Para el almacenamiento de herramientas, notebook y otros instrumentos, se realiza la compra de un carro metálico de cinco gavetas.

Figura 3.29: Dimensiones totales 680x435x660 mm. Tres gavetas de 551x403x75 mm, dos gavetas de 551x403x155 mm. Incluye cuatro ruedas macizas. Marca Big Red [49].

3.2.16. Caja metálica

La ubicación de inversor y microinversores, registrador de datos, protecciones y divisores de tensión, será en una caja metálica.

Tabla 3.15: Caja metálica Rhona.

CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Dimensiones	1000 x 600 x 300 mm
Espesor chapa de acero	1,5 mm
Espesor placa de montaje	2,5 mm
Grado de protección	IP 55
Pintura	Texturizada en polvo, color RAL 7032

Figura 3.30: Caja metálica, marca Toten [50].

3.2.17. Ventilador tablero

Para provocar circulación de aire, se instalarán ventiladores tanto en la caja metálica como en el carro metálico (Figura 3.29 y Figura 3.30, respectivamente) un intractor y un extractor de aire.

Tabla 3.16: Ventilador tablero, marca Jason Fan. Es posible inducir el aire hacia adentro (intractor) o hacia afuera (extractor) mediante la modificación de conexiones en el ventilador.

Marca	JASON FAN	JASON FAN
Modelo	FJK6621.PB230	FJK6623.PB230
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES		
Dimensiones	116,5 X 116,5 X 48,5 mm	204,5 X 204,5 X 98,5 mm
Caudal de aire	26 m^3/h	108 m^3/h
Tensión/frecuencia de alimentación	230 Vac/50 Hz	230 Vac/50 Hz
Grado de protección	IP54	IP54

Figura 3.31: Ventilador tablero, marca Jason Fan [51].

3.2.18. Materiales conexión eléctrica

La conexión eléctrica de paneles fotovoltaicos se realiza mediante cable solar AWG 10 (ver Figura 3.32) y conectores MC4 (Figura 3.33) para la unión entre el módulo y el cable solar. Por otra parte, se emplea cable de control con pantalla (Figura 2.2) para la conexión entre el registrador de datos (Figura 3.23) y los sensores de corriente y voltaje (secciones 3.2.20 y 3.2.21).

Figura 3.32: Cable solar AWG 10 La sección es equivalente a 6 mm^2 [52].

Figura 3.33: Conector MC4 simple. El voltaje máximo es de 1000 Vdc, mientras que la intensidad máxima es de 25 A [53].

Figura 3.34: Cable de control con pantalla. Posee una sección de 1,5 mm^2 y un voltaje máximo de 500 Vdc [54].

Se subcontrata una instalación de instalación de protecciones y conexión a la red. Los materiales requeridos se muestran a continuación.

Figura 3.35: Interruptor monofásico de 16 A y 20 A. Imagen referencial [55].

Figura 3.36: Interruptor diferencial de 20 A. Imagen referencial [56].

Figura 3.37: Fusible cilíndrico de 10 A. Requiere su respectiva caja porta fusible. Imagen referencial [57].

Figura 3.38: Tubo flexible metálico de 1 pulgada, con sus respectivos terminales de conexión [58].

Figura 3.39: Riel din simétrico [59].

Figura 3.40: Cable de control, AWG 14 [60].

Por último, la fabricación del sensor de corriente (ver sección 3.2.20) y sensor de voltaje (sección 3.2.21), se emplea lo siguiente.

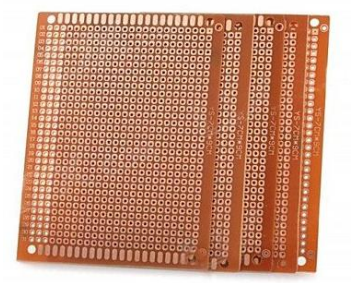


Figura 3.41: Placa PCB universal [61].

Figura 3.42: Resistencias eléctricas con disipación de potencia de 0,25 W y tolerancia del 5% [62].

Figura 3.43: Placa de acrílico [63].

Figura 3.44: Resistencia shunt, clase 05. Ejecución normalizada de 60 mV y 150 A [64].

Figura 3.45: Terminal de anillo [65].

Figura 3.46: Terminal tornillo [66]

3.2.19. Sensor de temperatura

El equipo utilizado para medir la temperatura superficial de los módulos son sensores PT1000 modelo CS240 de Campbell Instruments. A continuación, se presentan sus especificaciones técnicas.

Tabla 3.17: Especificaciones técnicas sensor de temperatura CS240, marca Campbell.

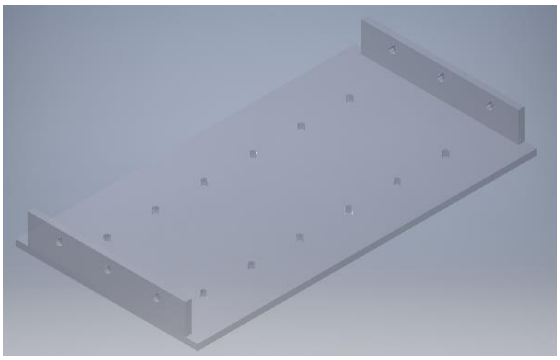
Marca	Campbell
Modelo	CS240
ESPECIFICACIONES PRINCIPALES	
Rango de temperatura de funcionamiento	Desde - 40 °C hasta 105 °C
Tolerancia	± (0,15 + 0,002t)
Coeficiente de temperatura	TCR = 3850 ppm/K
Estabilidad a largo plazo	Derivación máxima de 0.04% (después de 1000 horas a 400 °C)

Medición de corriente	Desde 0,1 mA hasta 0,3 mA
ESPECIFICACIONES MECÁNICAS	
Tipo de elemento	Elemento sensor de platino de precisión de clase A de 1000 Ω (PT1000)
Tamaño y tipo de cable	24 AWG (7/32) de cobre estañado
Tipo de aislamiento	Cloruro de polivinilo

Figura 3.47: Sensor de temperatura CS240, marca Campbell [67].

3.2.20. Sensor de corriente

Para la medición de corriente se emplea la resistencia shunt (ver Figura 3.44), conectadas al módulo FV mediante cable solar (Figura 3.32) y al registrador de datos mediante cable de control (Figura 3.40), ambos con terminales de conexión anillo (Figura 3.45). Debido a que es un material conductor sin aislación, y se instalará en una caja metálica (Figura 3.30), se fabrica una base de acrílico (Figura 3.43) para su aislación.



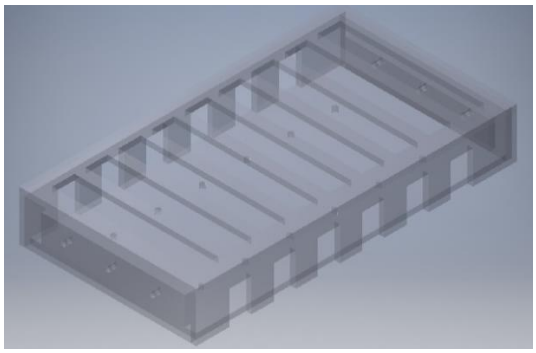


Figura 3.48: Base de acrílico para la aislación de resistencias shunt. Se fijan a la caja metálica mediante sujeción de pernos.

Figura 3.49: Caja de acrílico para la aislación de resistencias shunt. Por las secciones laterales se realizan las conexiones eléctricas, mientras que los sacados frontales permiten la ventilación interna.

3.2.21. Sensor de voltaje

El voltaje de los paneles fotovoltaicos se obtendrá en base a la fabricación de un divisor de tensión. La conexión se realiza en base a una placa PCB universal (Figura 3.41), donde la tensión del módulo ingresa mediante cable de control (Figura 3.40) y conectores de terminal tornillo (Figura 3.46). El divisor de tensión emplea resistencias eléctricas (Figura 3.42) de capacidades de 2 MW y 9,1 kW, donde se capta el voltaje de esta última por el registrador de datos.

3.3.Montaje preliminar Laboratorio FV

El objetivo principal del laboratorio solar es analizar el comportamiento de los módulos FV, ya sea en condiciones normales de operación o bien, modos de falla y ensuciamiento inducidos, a fin de correlacionar variables eléctricas y termográficas con respecto a la generación eléctrica. El módulo con condiciones normales de operación, o "sano", se ubicará al costado de paneles con defectos, para lograr una comparación en el análisis termográfico.

Se instalarán ocho módulos FV de tecnología policristalina, los cuales se enumeran a continuación.

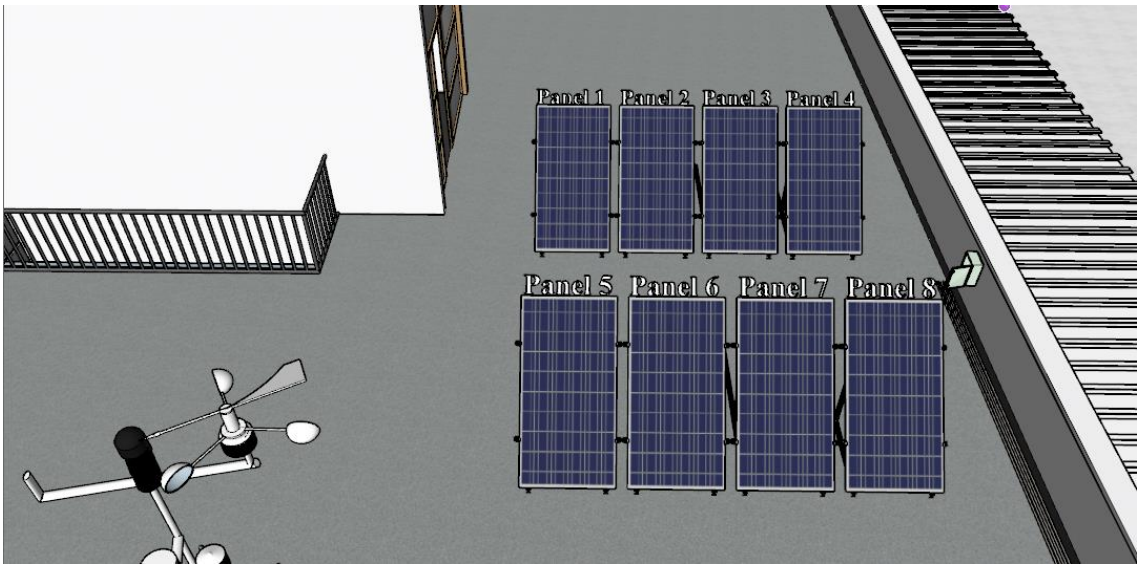


Figura 3.50: Numeración para los paneles FV policristalinos. Vista desde el norte en azotea F. La numeración comienza en la fila posterior, con el primer módulo correspondiente al Panel 1 y terminando en la segunda fila con el Panel 8.

Según la asignación mostrada en la figura anterior, y en base al código único de fabricación, se asigna un estado, ya sea con falla o módulo sano.

Tabla 3.18: Paneles FV tecnología policristalina instalados en el laboratorio.

Numeración	Marca	Código	Estado
Panel 1	SunEdison	FMB15060100737	Quebrado y sucio artificial
Panel 2	SunEdison	FMB15050801435	Sucio natural
Panel 3	SunEdison	FMB15060402341	Limpio
Panel 4	SunEdison	FMB15060901529	Quebrado y limpio
Panel 5	SunEdison	33641 33222200008	Limpio

Panel 6	SunEdison	FMB15032101652	Sucio artificial
Panel 7	ASTROENERGY	33679 33232203139	Limpio
Panel 8	ASTROENERGY	33800 33242202007	Sucio natural

Las características técnicas de placa en cada módulo se encuentran disponibles en la Tabla 7.3. El estado sucio natural corresponde al soiling depositado por el particulado del ambiente, mientras que el artificial es producto de arena y otros agentes depositados en la parte frontal del módulo. Además, se realizaron golpes en celdas, a modo de obtener vidrios rotos. Por otra parte, los módulos limpios se lavan constantemente de manera manual con agua desmineralizada y limpia vidrios.

Los módulos bifaciales se encuentran próximos a ser adquiridos por el laboratorio, por lo que aún no han sido instalados en el laboratorio.

3.3.1. Conexión eléctrica

La conexión eléctrica será del tipo On Grid, es decir, de empalme a la red eléctrica del edificio. Se requiere el uso de un inversor FV para convertir de corriente continua en corriente alterna. A continuación, se muestra un esquema de conexión individual.

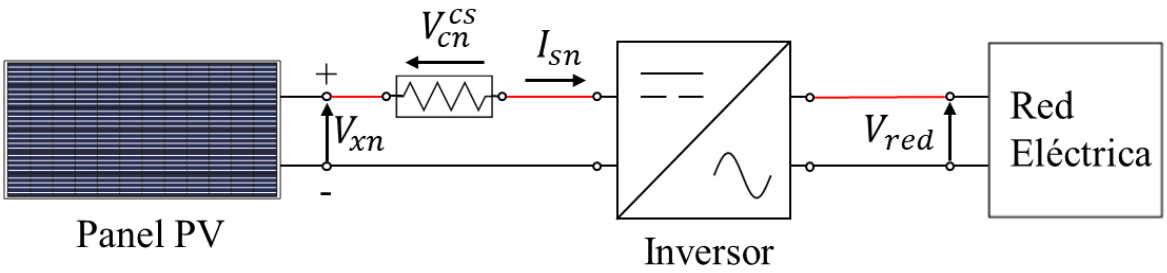


Figura 3.51: Conexión eléctrica individual. El subíndice n corresponde al número de string, donde V_{xn} es el voltaje del panel x en el string n, I_{sn} la corriente del string actual y V_{red} el voltaje de la red. Por otra parte, V_{cn}^{cs} es el control de señal de la corriente actual.

Para la medición de tensión eléctrica, se fabrica un divisor de tensión según la siguiente figura.

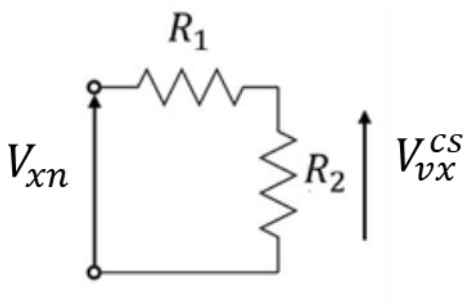


Figura 3.52: Método para la medición de tensión en base a resistencias eléctricas. V_{xn} corresponde al voltaje del panel x en el string n, R_1 y R_2 son las resistencias eléctricas del divisor de tensión, de valores 2 MW y 9,1 kW respectivamente. Por último, V_{vx}^{cs} es el control de señal de voltaje para el panel actual.

$$V_{vx}^{cs} = V_{xn} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{3.1}$$

De esta manera, se obtienen valores para la corriente (V_{cn}^{cs}) y el voltaje del módulo (V_{vx}^{cs}), los cuales serán almacenados de manera automática mediante el registrador de datos. Para la medición de temperatura, se emplea sensores PT1000 (ver Figura 3.47), mientras que el sensor de corriente se conecta en base a resistencias tipo Shunt (ver Figura 3.44). Los equipos antes nombrados se conectan al registrador de datos y se obtiene información de manera continua.

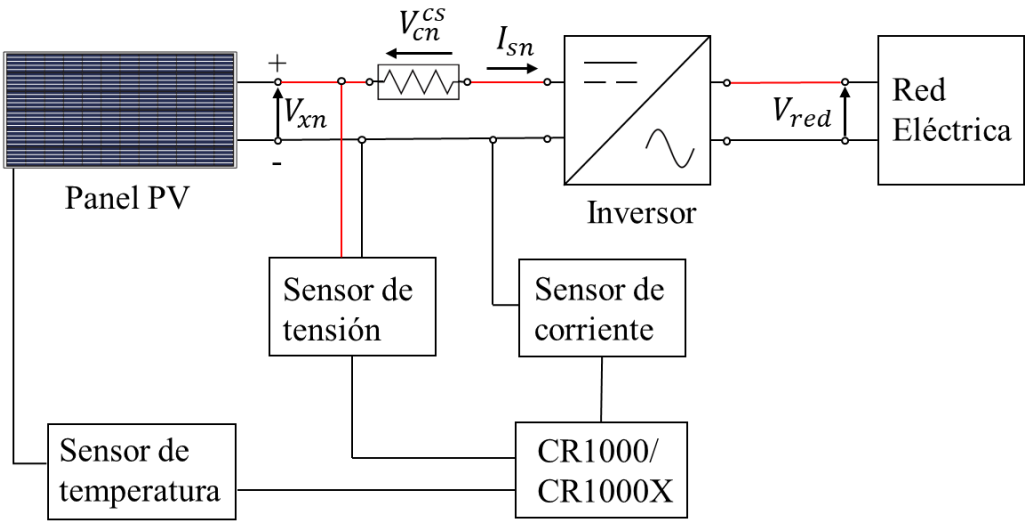


Figura 3.53: Interacción de equipos de medición para el registro de temperatura, tensión y corriente del módulo FV.

En caso de la conexión de un microinversor, el string este compuesto sólo por un módulo FV, como se muestra en la Figura 3.51. Para la conexión de un inversor, es posible conectar una mayor cantidad de paneles en serie, según el siguiente esquema.

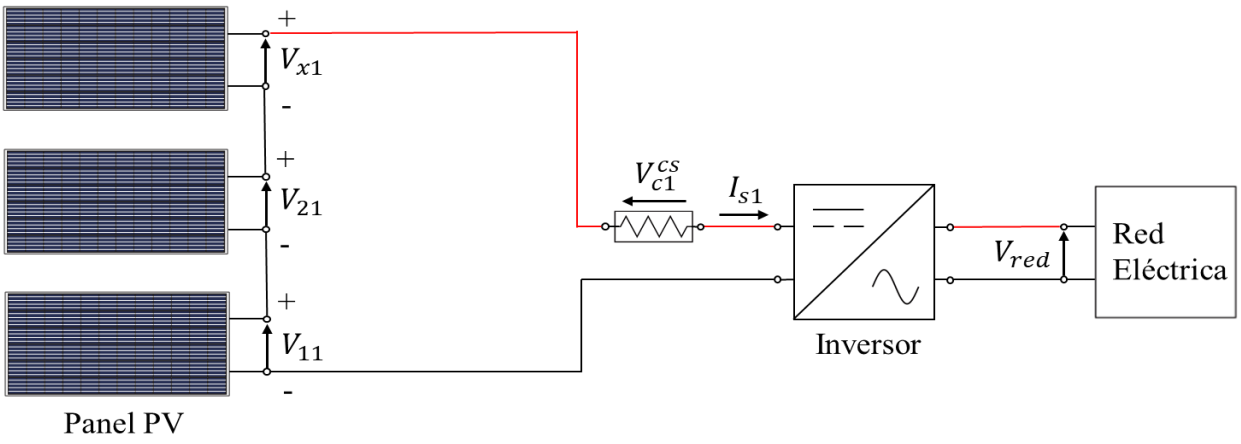


Figura 3.54: Conexión eléctrica de dos o más módulos en el string número 1. El control de señal para la corriente se realiza a nivel de string, debido a su conexión en serie, mientras que el control de señal de voltaje del panel se mide de manera individual, según la Figura 3.52.

3.3.2. Instalación de equipos

Se realiza el montaje de equipos en el sector Oeste de la azotea del Edificio F (Figura 3.2). Se instalan los módulos policristalinos (ver Figura 3.19), con las respectivas estructuras variables (Figura 7.1), la estación meteorológica RSR100 (Figura 3.12) y la cámara Logitech C920 (Figura 3.28).

Figura 3.55: Instalación de módulos FV policristalinos, estructuras paneles y estación meteorológica.

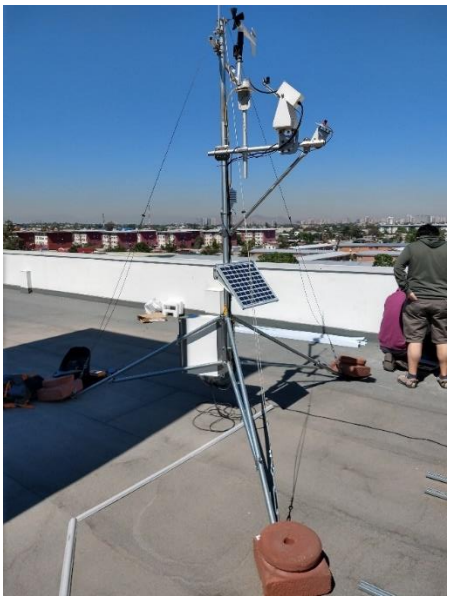
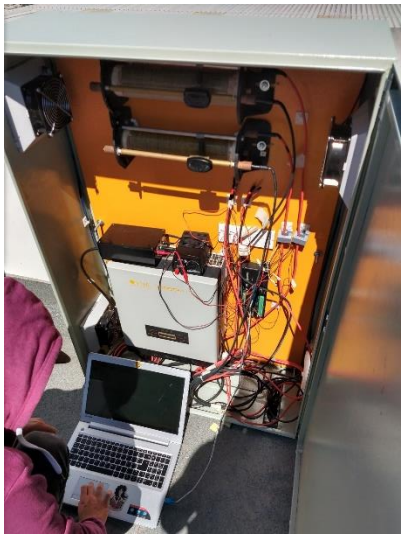


Figura 3.56: Instalación preliminar estación meteorológica RSR100.

Figura 3.57: Ubicación cámara Logitech C920.

Figura 3.58: Vista de captura de imágenes en la cámara Logitech C920.

Por otra parte, se instaló de la caja metálica (Figura 3.30) y el carro de 5 gavetas (Figura 3.29), donde cada uno posee ventilación y extracción de aire (Figura 3.31). Se implementa la conexión del inversor Omniksol (Figura 3.16) y el registrador de datos CR1000 (Figura 3.23). No es posible conectar a la red el inversor, debido a que no se obtuvo autorización, puesto que no existían las protecciones de seguridad adecuadas. De manera preliminar, se instala un reóstato para experimentar con las variaciones de carga en módulos FV. Se fabrican divisores de tensión y corriente, instalación de canalización de cableado, medición de temperatura mediante termistores y la instalación del notebook (Figura 3.27) para la captura de imágenes desde la cámara Logitech C920 (Figura 3.28).



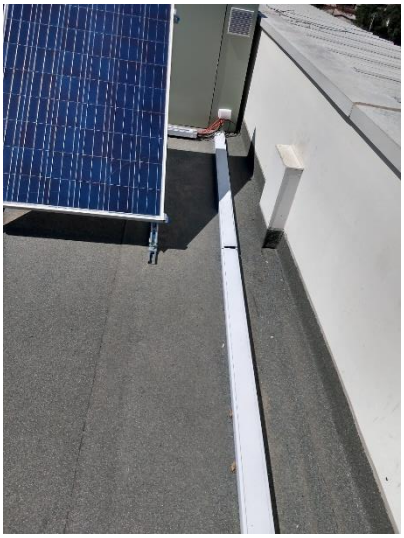


Figura 3.59: Conexión de inversor, registrador de datos, ventiladores, divisor de tensión y corriente en la caja metálica.

Figura 3.60: Canalización de cableado.

Figura 3.61: Medición de temperatura en la parte posterior del módulo mediante termistores.

Figura 3.62: Carro metálico de 5 gavetas. Su función es la protección del notebook, el cual se encarga de recopilar imágenes captadas por la cámara Logitech.

Figura 3.63: Captura de imágenes desde la cámara Logitech C920.

Posteriormente, se instalan una cantidad mayor de módulos FV policristalinos, por lo que es necesario reubicar la estación meteorológica. Además, se añade a la estación meteorológica la cámara térmica fija MIC 612 (Figura 3.14) y dos piranómetros CMP10 (Figura 3.13).

Figura 3.64: Reubicación de la estación meteorológica hacia el lado norte de la azotea del edificio F. Instalación de la cámara térmica fija MIC 612 en lo más alto de la estación meteorológica.

Figura 3.65: Se añaden los piranómetros CMP10 en extensiones de la estación meteorológica.

Posteriormente, se procede a instalar un total de ocho módulos de tecnología policristalina.

Figura 3.66: Disposición de ocho módulos FV de tecnología policristalina. Se observa que existen paneles que se mantienen limpios, mientras que otros módulos se ensucian de manera natural o inducida, a fin de comparar el comportamiento de los equipos.

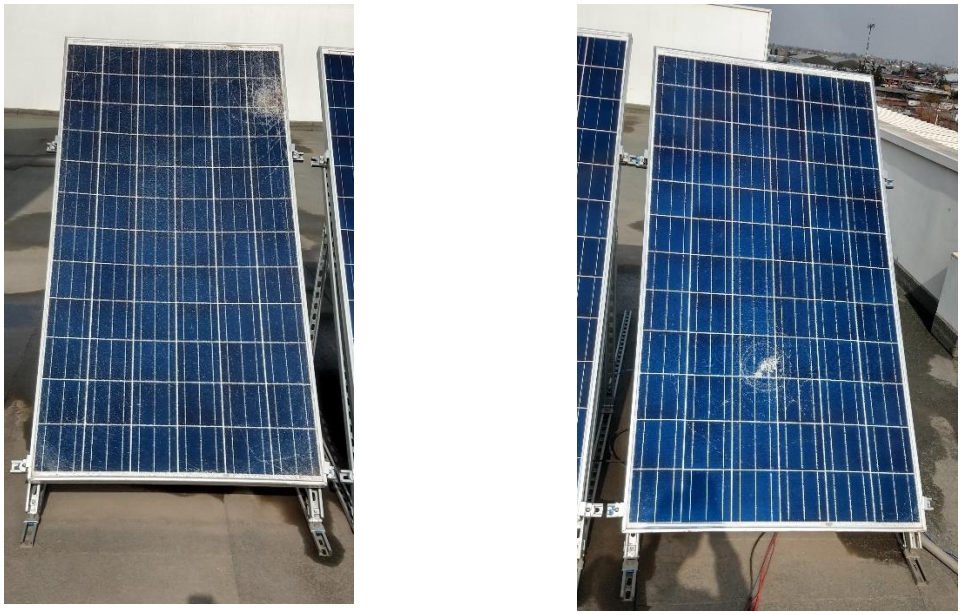


Figura 3.67: Módulos con vidrios rotos. En la izquierda se encuentra el panel 1 (ver Figura 3.50), mientras que en la derecha el panel 4.

Figura 3.68: Ensuciamiento en los módulos. En la izquierda se observa el módulo 7 y 8 (ver Figura 3.50), donde el primero se limpia constantemente y el módulo 8 se encuentra sucio con soiling natural. En la figura derecha se encuentra el módulo 5, el cual se le añadió agua y residuos pegajosos para simular un ensuciamiento artificial.

Se realizan modificaciones en la conexión eléctrica, entre las cuales se instalan las protecciones necesarias para la conexión a red, como interruptores monofásicos y diferenciales (ver Figura 3.35 y Figura 3.36), fusibles (Figura 3.37), tubo flexible metálicos para la canalización (Figura 3.38) y se implementa el uso de los microinversores Enphase (Figura 3.17) con su respectivo sistema de monitoreo Envoy (Figura 3.18). Además, se adquiere resistencias Shunt (Figura 3.44) para medir corriente y se elabora un divisor de tensión en base a resistencias eléctricas (Figura 3.42), montadas en placas de acrílico (Figura 3.43) para su aislación eléctrica. Se instalan sensores de temperatura PT1000 (Figura 3.47) en la parte posterior de cuatro módulos FV, en específico de los paneles 3, 4, 7 y 8 (ver Figura 3.50). La medición de temperatura se almacena de manera continua mediante un registrador de datos (Figura 3.23) y una caja metálica pequeña, ubicada en el lado oeste de la azotea.

Figura 3.69: Modificaciones en la caja metálica. Se instalaron cuatro microinversores Enphase, protecciones eléctricas, medidores de tensión y corriente en el registrador de datos CR1000.

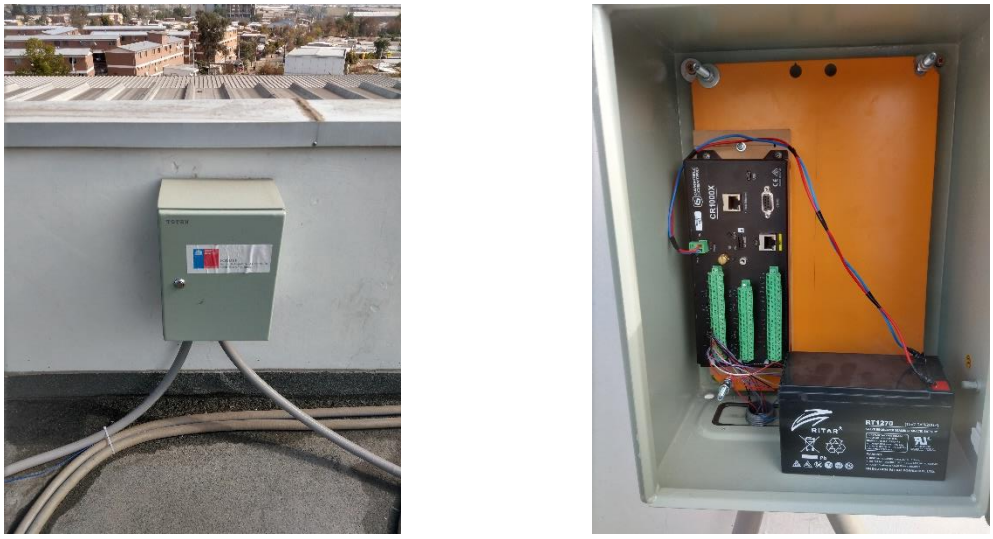


Figura 3.70: Se instala una caja metálica al oeste de la azotea, destinada sólo a proteger un registrador de datos CR1000X, el cual se encuentra almacenando información de los sensores de temperatura.

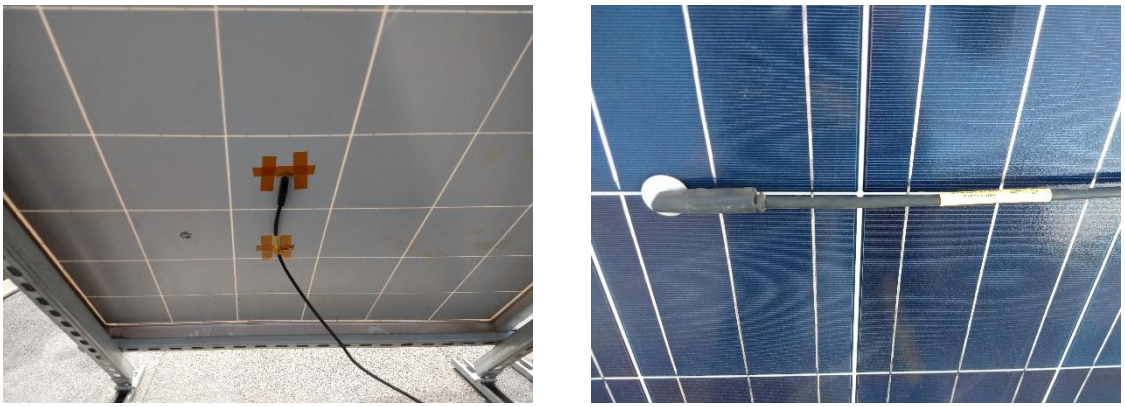


Figura 3.71: Conexión sensores de temperatura PT1000. Se encuentran montadas de manera continua en la parte posterior del módulo (imagen izquierda) en los módulos 3, 4, 7 y 8 (ver Figura 3.50). Se han realizado experimentaciones en las que se requiere medición en la parte frontal (imagen derecha), para luego volver al sector posterior.

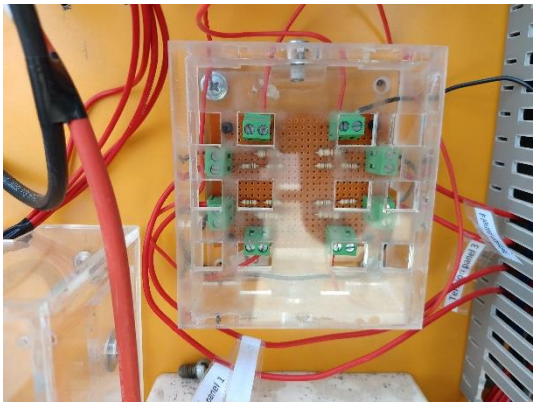


Figura 3.72: Divisor de tensión. La conexión eléctrica se muestra en la Figura 3.52. Fabricado en base a terminales tornillo (Figura 3.46) montados en una placa PCB (Figura 3.41) y conectados mediante cable de control (Figura 3.40).

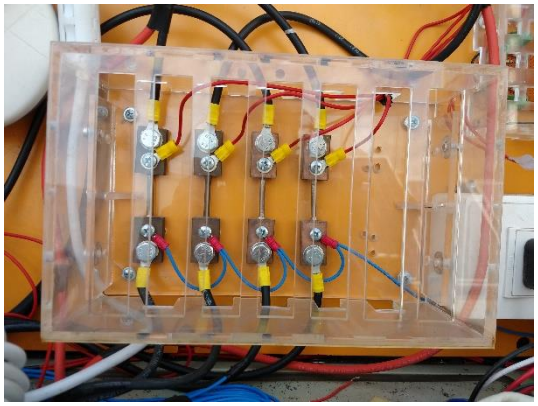


Figura 3.73: Divisor de corriente. resistencias shunt (Figura 3.44) montadas en una placa de acrílico (Figura 3.49). Se conectan mediante terminales de anillo (Figura 3.45) y cable de control (Figura 3.40).

Figura 3.74: Canalización eléctrica mediante tubos flexibles metálicos, reemplazando las canaletas (Figura 3.60).

Por último, se realizó la orden de compra de los módulos bifaciales (Figura 3.19), pero estos aún no han sido entregados, puesto que es una compra internacional. En la universidad se encuentran las estructuras para los paneles bifaciales (Figura 3.21 y Figura 3.22), próximas a ser instaladas. A continuación, se muestra el espacio físico disponible para la tecnología bifacial y el equipo Fresnel.

Figura 3.75: Espacio asignado para la tecnología bifacial y Fresnel (ver Figura 3.9).

4. METODOLOGÍAS

Se realiza un instructivo para estandarizar las distintas operaciones que se requieren para el laboratorio solar, los cuales incluyen la conexión física, limpieza de instrumentos y almacenamiento de información. Dentro de las metodologías, se encuentran las variables eléctricas (trazado de curvas IV y recopilación de información del registrador de datos), uso de equipos termográficos (cámara térmica fija y manual), mantenimiento en estación meteorológica y medición de variables medidas en el panel (temperatura, corriente y voltaje). A modo de resumen, se presenta un cuadro con la frecuencia de trabajo que se ejecuta cada operación, la cual debe ser documentada en una bitácora.

Tabla 4.1: Resumen frecuencia de actividades en el mantenimiento preventivo.

Operación	**Frecuencia**	**Principal actividad**
Trazado de curvas IV	Tres curvas IV por semana (para cada panel)	Conectar el trazador de curva a cada panel y almacenar la información
Recolección de información del registrador de datos	Cada cuatro semanas	Conectar un notebook a cada registrador de datos y almacenar la información
Recarga batería registrador de datos	Cada dos semanas	Recargar la batería en el pañol de eléctrica, para luego volver a instalarla
Recolección de imágenes térmicas cámara fija	Cada dos semanas	Ingresar al notebook del laboratorio y almacenar la información
Toma de imágenes térmicas cámara manual	Tres fotografías térmicas por semana (para cada panel)	Capturar imágenes con la cámara térmica manual y almacenar la información. Operación en simultáneo con el trazado de curvas IV.
Mantenimiento estación meteorológica	Dos días para el piranómetro CMP10 y una semana para el resto de los equipos	Limpiar y nivelar instrumentos y sensores
Mantenimiento preventivo sensores (temperatura, corriente y voltaje)	Cada dos semanas	Limpiar y verificar recolección de datos en instrumentos

4.1. Variables eléctricas

4.1.1. Trazado de curvas IV

El equipo utilizado para trazado de curvas IV corresponde al cetisPV-Outdoortest. Las especificaciones técnicas se encuentran disponibles en la Tabla 7.4. Se requieren los siguientes elementos para su correcto funcionamiento.

1. Estación central cetisPV-Outdoortest
2. Carga capacitiva (se encuentra en conjunto con la estación central).
3. Celda solar de referencia.
4. Sensor de temperatura PT1000.
5. Caja de conexión entre celda de referencia/estación central.
6. Caja de conexión panel solar/estación central.
7. Par de cables polaridad positiva (rojos).
8. Par de cables polaridad negativa (azules).
9. Cable de comunicación RS232 estación central/computador.
10. Adaptador cable de comunicación RS232/USB.

Adicionalmente, se recomienda portar el cargador de la estación central. Por otra parte, el ***equipo no puede funcionar mientras se encuentra en modo de carga.*** El método de funcionamiento del trazador de curvas IV se divide en dos partes: la conexión física y la conexión por software. Posteriormente se detalla el almacenamiento de información.

- **Conexión física**

El rango de trabajo del trazador de curva para el voltaje se encuentra desde los 500 mV (nivel de celda) hasta los 1000 V, mientras que la corriente parte en 2 A hasta 100 A (ver Tabla 7.4). La conexión física del equipo es la indicada en la siguiente figura.

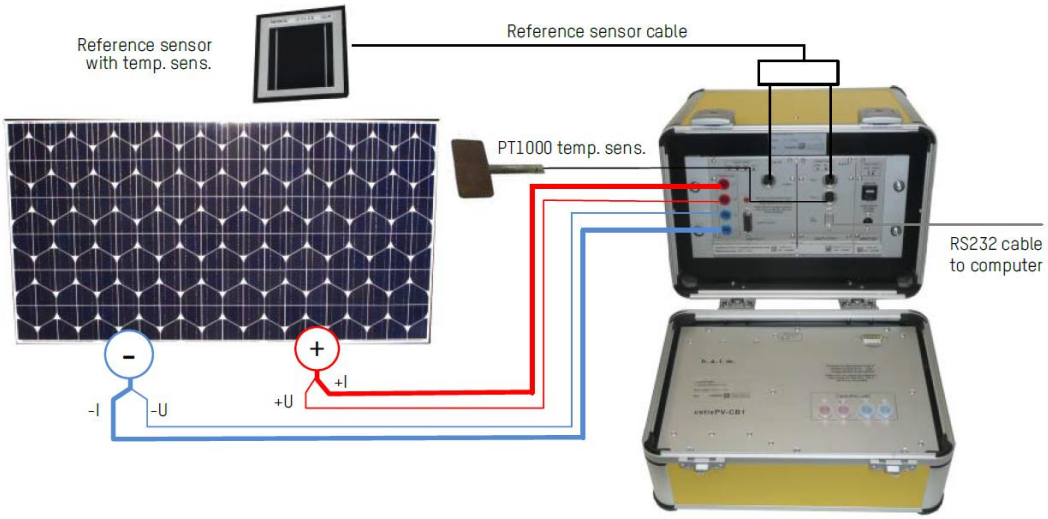


Figura 4.1: Esquema de conexión para cargas pequeñas [68].

- **Comunicación software**

Para realizar mediciones con el equipo se debe tener acceso al software portable distribuido por h.a.l.m. Se recomienda revisar la guía de operación rápida distribuida por h.a.l.m. [68] (sección 4*, "Quick start to perform measurements")*.

- **Almacenamiento de datos**

Para cada panel solar se deberá tomar una cantidad de ***tres curvas IV de manera semanal***. El archivo guardado deberá tener las siguientes características.

1. Descargar la información con el formato: "CURVAIV_MX_FECHA", donde "MX" corresponde al módulo X, siendo X el ID del panel solar bajo prueba. El formato de fecha deberá ser del estilo año-mes-día, e.g., 20190520.

2. Almacenar la información en el One Drive del proyecto FONDEF, en la carpeta "DATOS_CURVA_IV".

4.1.2. Registrador de datos

Para el almacenamiento de datos, se disponen de los equipos CR1000, los cuales recolectan información cada un segundo, almacenando el promedio de los datos en un tiempo de un minuto. Las especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 7.5. Se requieren los siguientes aparatos.

1. Cable de conexión USB a RS-232.

2. Notebook con puerto USB y software Loggernet [69].
3. Multímetro y pinzas de metal.

El CR1000/CR1000X no presenta suministro de electricidad, por lo que se encuentra conectado a una batería externa, la cual que debe ser ***recargada cada 2 semanas***. En cada operación, verificar, mediante un multímetro, que el voltaje de la batería se encuentre por sobre los 11,5 V. En caso contrario, proceder a desconectar, cargar en el pañol de eléctrica y reconectar el siguiente día por la mañana.

Por otra parte, La sincronización del registrador de datos debe hallarse en UTC 0, a fin de estandarizar la información. Verificar en la opción "Monitor Data" (ver Figura 4.2).

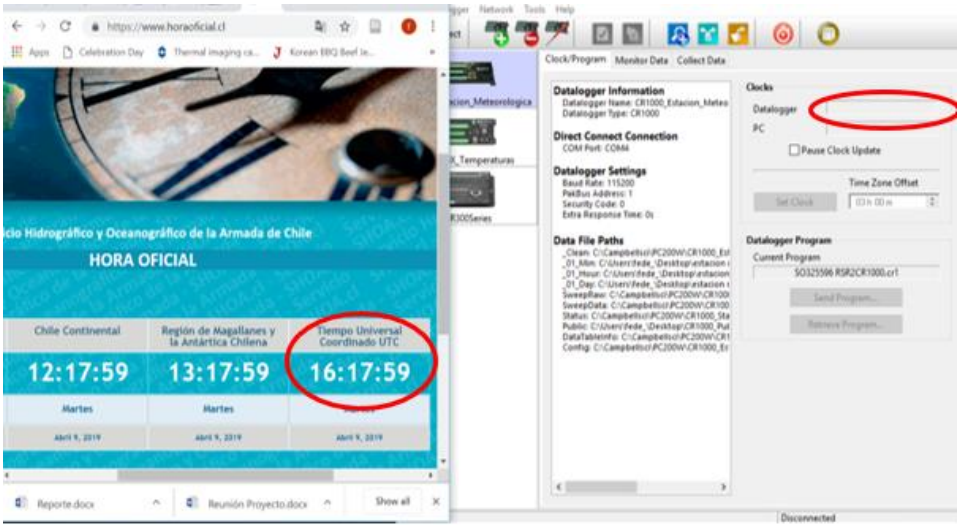


Figura 4.2: Sincronización horaria para el registrador de datos con respecto al UTC 0 del portal en línea hora oficial de Chile [70].

- **Conexión física**

La conexión física se realiza mediante el puerto RS-232 (ver Figura 4.3).

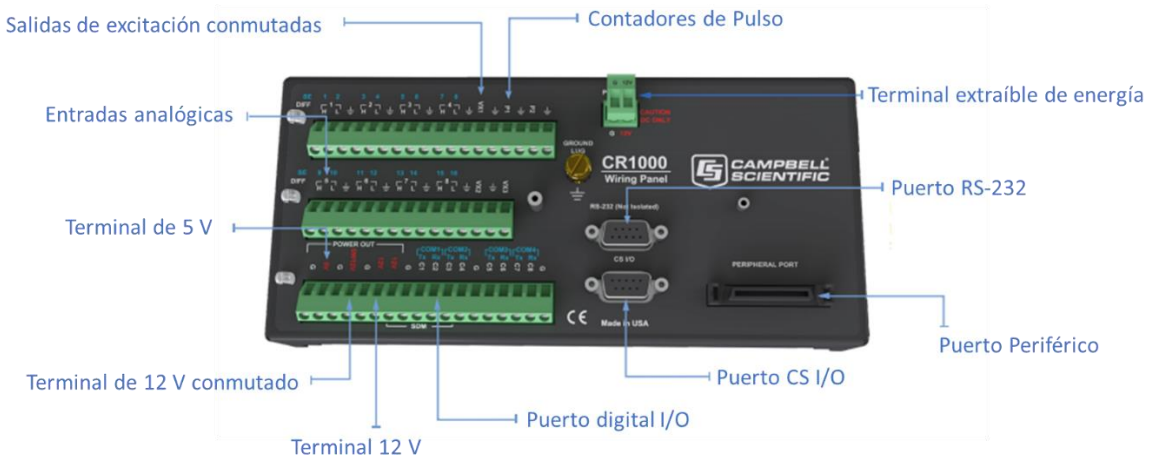


Figura 4.3: Conexión física al equipo CR1000/CR1000X [71]. Se realiza mediante el puerto RS-232 para computadores, sensores o RS-232 módems. Para la conexión con ordenadores de corriente alterna o equipos periféricos se emplea el puerto CS I/O.

- **Comunicación software**

Para comunicar y descargar datos del logger al notebook, se requiere el software LoggerNet [69].

- **Almacenamiento de datos**

La recolección de datos debe tener una ***frecuencia mensual***. El archivo se obtiene desde la pestaña "Collect Data" (tutorial disponible en [72]), con las siguientes características.

1. Descargar la información con el formato "PV_MX_FECHA", donde "MX" corresponde al módulo X, siendo X el ID del panel solar bajo prueba. El formato de fecha deberá ser del estilo año-mes-día, e.g., 20190520.

2. Almacenar la información en el One Drive del proyecto FONDEF, en la carpeta "DATOS_PV".

4.2. Imágenes termográficas

4.2.1. Cámara termográfica fija Bosch

En la estación meteorológica del laboratorio se instaló una cámara termográfica fija, la MIC 612, la cual recolecta imágenes de manera continua (especificaciones técnicas en la Tabla 7.6). Se requiere el almacenamiento de imágenes y la verificación de su correcto funcionamiento. Los elementos necesarios son:

1. Llave azotea quinto piso y llave carro metálico
2. Iniciar sesión en notebook, clave “laboratorio” (sin comillas).

- **Conexión física**

La conexión del notebook y la cámara se encuentra funcionando. Para mayor información ver el manual de instalación de la MIC 612 [73].

- **Comunicación software**

El equipo se encuentra continuamente configurado para el almacenamiento de información. Es necesario corroborar su correcto funcionamiento. Debe estar activo el software para la captura de imágenes según lo mostrado a continuación.

Figura 4.4: Software para la captura de imágenes de la cámara MIC 612.

Luego de aproximadamente cinco minutos, la imagen cambia, lo que se traduce en una correcta sincronización y almacenamiento. En caso contrario, seguir las siguientes instrucciones.

1. Reiniciar el notebook

2. Iniciar sesión (clave “laboratorio”) y ejecutar el programa “Cámara” (ver Figura 4.5), ubicado en el escritorio.

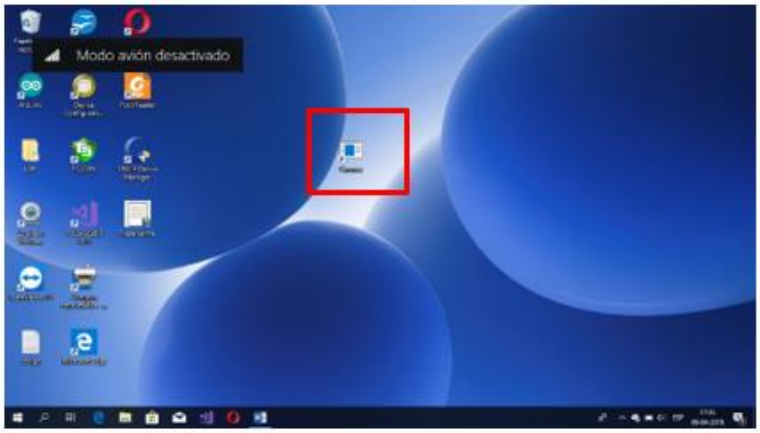


Figura 4.5: Escritorio del notebook. Destacado en rojo se encuentra la aplicación “Cámara”.

3. Aparecerá el software de la cámara Bosch (ver Figura 4.6). Presionar “Buscar”, una única vez.

Figura 4.6: Software de la cámara Bosch.

4. Marcar la dirección IP en la zona superior izquierda. Si no aparece un número IP, revisar la conexión de cables de red y enchufes energizados.

5. Escribir en usuario (sector superior derecho) “admin” (sin comillas) y contraseña “Laboratorio#123” (sin comillas)
6. Presionar en “Conectar” (sector superior derecho) y esperar visualización de imagen en los recuadros de la parte inferior izquierda.
7. En “Inicio”, marcar “06” y “00”. Para el “Fin”, “22” y “01”. Lo anterior indica las horas de inicio y térmico de captura de fotografías.
8. En “Intervalo”, marcar “5” y en “Escenas”, ingresar “6”.
9. Finalmente, seleccionar “Iniciar Ciclo”. Luego, corroborar el movimiento de la cámara y la captura de imágenes, lo cual tarda cinco minutos.

- **Almacenamiento de datos**

La recolección de datos debe tener una ***frecuencia mensual***, para lo cual se requiere:

1. Descargar la información ubicada en la carpeta “C:\Capturas”
2. Almacenar la información en el One Drive del proyecto FONDEF, en la carpeta “DATOS_TERMO_BOSCH”.

4.2.2. Cámara termográfica manual Fluke

El uso de la cámara térmica Fluke permite calibrar las mediciones obtenidas de la cámara térmica fija MIC612 (ver especificaciones en la Tabla 7.7). Se recomienda comprobar el nivel de carga de baterías previo a la adquisición de imágenes. La implementación requerida es la siguiente.

1. Llave azotea quinto piso.
2. Cámara térmica Fluke TI400, ubicada en el laboratorio de termo hidráulica.
3. Elementos de protección personal (gorro, bloqueador solar y correa de seguridad).

Se debe obtener imágenes térmicas de forma paralela a las curvas IV de cada panel, mediante el uso del trazador cetisPV-Outdoortest. Las condiciones de prueba requieren una radiación global horizontal superior a los 700 W/m^2. Se debe chequear según los datos medidos en la estación meteorológica RSR100, según los pasos mostrados a continuación.

1. Conectar a la red Eventos (sin ingresar el código o clave).
2. Ingresar en un navegador Web el IP: 10.11.16.8, que abrirá el portal web de la estación meteorológica.
3. Ingresar a la tabla de variables por minuto, que muestra los últimos 24 datos medidos.
4. Revisar los valores medidos y corroborar si los niveles de radiación global horizontal (GHI) son superiores a 700 W/m^2.

- **Configuración y posicionamiento**

Para la siguiente sección, consultar el manual de uso de Fluke [74].

1. Opción temperatura de fondo (ver manual, sección "*Menú medición*", página 11), para compensar la temperatura reflejada en el fondo.
2. Ajuste de emisividad a 0,9 (ver manual, sección "*Ajuste de emisividad*", página 14)
3. Visualización de modo fusión no mayor al 50% (ver manual, sección *"Menú imagen"*, página 16)
4. Rango de temperatura ajustado entre 40 °C y 55 °C (ver manual, sección *"Mejora de la imagen*", página 18), a fin de encontrar irregularidades térmicas.

En cuanto al posicionamiento, se debe evitar reflejos y obtener una correcta captura de imágenes, respetar los parámetros mostrados a continuación.

1. Angulo relativo horizontal: un Angulo mayor a 5° y menos a 20° entre la proyección normal del panel fotovoltaico y la línea de la fotografía térmica.
2. Ángulo relativo vertical: se debe considerar un Angulo lo más cercano a 0° respecto a la normal a la superficie del panel.
3. Se debe evitar tomar imágenes bajo condiciones medio ambientales inestables, con presencia de nubes, viento mayor a 5 km/h (revisar en estación meteorológica) y cambios abruptos de temperatura
4. Posicionarse de tal manera de evitar reflejos con el sol, estructuras cercanas o reflejos del mismo operador.

- **Captura de imágenes**

Realizar la siguiente cronología para la captura de imágenes.

1. Las imágenes deben ser obtenidas en orden, es decir panel 1, panel 2, panel 3, panel 4, según las etiquetas propias de cada módulo.
2. Previo a cada imagen térmica se debe fotografiar el número del panel para luego fotografiar el panel
3. Las imágenes deben ser tomadas a una distancia permita que el módulo fotovoltaico completo se vea en la imagen térmica
4. Se debe presionar el gatillo para enfocar la imagen con el láser, una vez la pantalla marque la distancia correcta se debe captura la imagen.

- **Almacenamiento de datos**

La frecuencia de captura de imágenes debe ser simultánea a la adquisición de curvas IV, obteniendo fotografías térmicas de cada módulo ***tres veces por semana.*** Las imágenes deben ser guardados en la memoria externa de la cámara. Se requiere:

1. Descargar la información con el formato "TERMF_MX_FECHA", donde "MX" corresponde al módulo X, siendo X el ID del panel solar bajo prueba. El formato de fecha deberá ser del estilo año-mes-día, e.g., 20190520
2. Almacenar la información en el One Drive del proyecto FONDEF, en la carpeta "DATOS_TERMO_FLUKE"

4.3.Estación meteorológica

El siguiente documento presenta una metodología para realizar el mantenimiento en la estación meteorológica, a fin de garantizar la calidad de la información medida. Para medir las condiciones ambientales, se cuenta con el equipo RSR100 (ver especificaciones técnicas en la Tabla 7.8). Además, se instalaron dos piranómetros CMP10 (especificaciones en Tabla 7.9), donde uno tiene la función de comparar las mediciones entregadas por el piranómetro de licor del RSR2 (irradiancia global horizontal) y el otro piranómetro se instaló para medir en el plano inclinado (POA). La implementación requerida para la operación es:

1. Agua desmineralizada
2. Rociador de agua
3. Paño de microfibra limpio x3
4. Escalera de tijera
5. Llave de estación meteorológica y azotea quinto piso
6. Instrumento de nivelación para piranómetros LI-COR (nivel de burbuja circular)
7. Computador con PC 200W o Equivalente
8. Cable VGA-USB
9. Inclinómetro

Por otra parte, la frecuencia de mantenimiento en cada componente se muestra a continuación. Posteriormente se enlistan las actividades para cada componente.

Tabla 4.2: Frecuencia de mantenimiento preventivo en equipos presentes en la estación meteorológica.

Equipo	**Frecuencia de mantenimiento**
Sensor de variables medioambientales 083E	Siete días
Piranómetro CMP10	Dos días o presencia de lluvias
Monitor de viento helicoidal 05103	Siete días

Radiómetro RSR2	Siete días
Módulo fotovoltaico de referencia	Siete días

4.3.1. Sensor de variables medioambientales 083E

1. Limpiar anillos laterales con paño de microfibra húmedo.
2. Desatornillar sensor (ubicado en el interior de la carcasa blanca)
3. Desatornillar protección plástica del sensor ubicada en la punta superior, manipular con extremo cuidado debido a la fragilidad del equipo.
4. Limpiar protección del sensor (rejilla blanca) con rociador y paño de microfibra.
5. Soplar sensor para remover polvo. (no utilizar agua o paño)
6. Reensamblar protección del sensor (una vez seco) e introducir/atornillar en carcaza externa, cuidando que los orrines de protección contra agua/polvo se encuentren en posición correcta antes de atornillar

   Para mayor información, leer el manual de instrucciones del sensor 083E [75].

Figura 4.7: Sensor de temperatura y humedad relativa 083E [31].

4.3.2. Piranómetro CMP10

1. Remover carcaza (escudo solar en la Figura 4.8), limpiar el cuerpo del piranómetro y el escudo solar con agua destilada y paño de microfibra

2. Limpiar de la cúpula de vidrio con rociador (agua desmineralizada) y paño de microfibra húmedo, removiendo polvo y costras de la cúpula con movimiento circulares

3. Con un segundo paño seco limpio y corroborar que la cúpula no tenga manchas o incrustaciones. En caso de que exista algún daño a la cúpula se debe reportar al encargado de la estación.

4. Para el piranómetro CMP10 GHI, corroborar nivelación del sensor en burbuja ubicada en la sección lateral del cuerpo del piranómetro. En caso de que esta no se encuentre al centro, ajustar con las dos perillas de soportes para nivelar.

5. Para el piranómetro CMP10 POA, corroborar ángulo de inclinación con inclinómetro o nivel del celular y su respectivo azimut de superficie.

6. Limpieza especial: En caso de lluvia, se debe proceder a secar la cúpula del instrumento para prevenir efecto lupa. Efecto que puede alterar las mediciones de radiación, aumentando el recurso medido.

Para mayor información, leer el instructivo de los diferentes piranómetros de Kipp & Zonen [76].

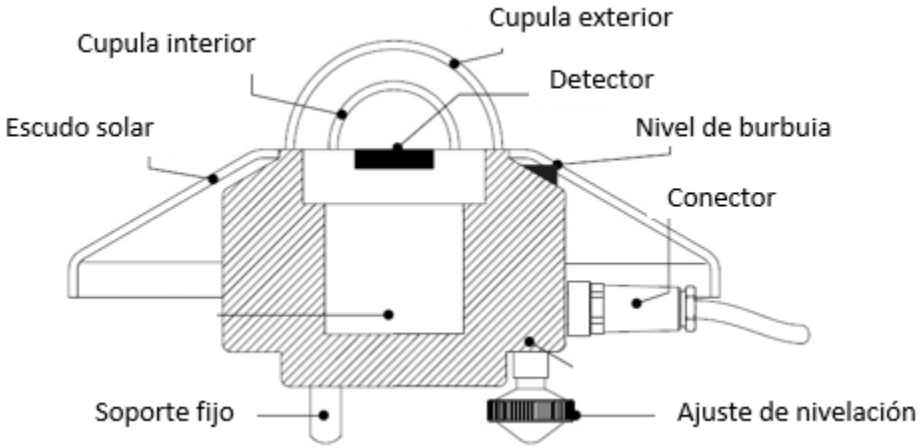


Figura 4.8: Subcomponentes del piranómetro CPM10 [76].

4.3.3. Monitor de viento helicoidal 05103

1. Inspección visual/ruidos en el anemómetro para vientos de baja velocidad.

2. Verificar que el rodamiento de la veleta y la hélice giren libremente.

3. Reemplace los cojinetes del anemómetro cuando se vuelvan ruidosos
4. Limpiar el polvo del cuerpo del anemómetro.

   Para mayor información, leer el manual de monitores de viento [77].

Figura 4.9: Anemómetro helicoidal y veleta, de Campbell Scientific [31].

4.3.4. Radiómetro de banda giratoria sombreadora RSR2

1. Inspección visual y auditiva, verificar que no existan ruidos inusuales en el motor de la banda sombreadora, corroborar la sujeción de la banda, conexiones se encuentren libres de contaminación.
2. Desenergizar el motor de la banda sombreadora (interruptor ubicado en la esquina inferior izquierda). Inspeccionar que dentro de la caja del motor no exista acumulación de polvo o presencia de insectos.
3. En el caso de que la banda presente movimiento en el sentido del eje, se debe desarmar la carcasa exterior del motor y reapretar tornillos internos. Para esto se recomienda desmontar el motor de la banda sombreadora y trabajar a nivel de suelo. Se necesitará las llaves Allen en pulgadas que trae el equipo.
4. Limpiar el sensor RSR2 (piranómetro de licor, banda sombreadora y carcasa del instrumento), con una frecuencia mensual. La limpieza se debe efectuar cuando la irradiación global sea lo más estable posible, al mediodía solar, en un día sin nubes o totalmente nublado. La fecha y hora de la operación deben registrarse para observar la

respuesta del sensor antes y después de la limpieza y corroborar cualquier cambio de sensibilidad.

5. Nivelar el sensor de licor Li200R con accesorio nivel de burbuja circular, posicionándolo sobre el piranómetro. Si es complejo revisar el nivelado del sensor se recomienda utilizar una cámara fotográfica para tomar registro de la nivelación y no posicionarse en los últimos peldaños de la escalera.

6. Encender la energía en la caja de control

   Para mayor información, ver el manual de instalación y operación del RSR2 [78].

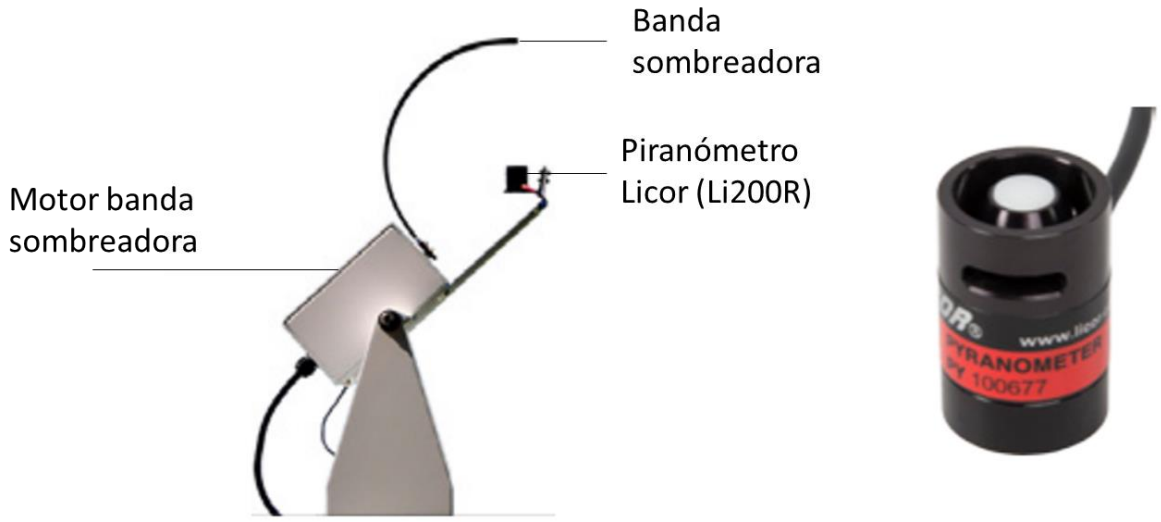


Figura 4.10: En la derecha se observa el radiómetro de banda sombreadora giratoria, RSR2. En la izquierda, se encuentra el piranómetro de licro Li200R, el cual es parte del equipo RSR2 [31].

4.3.5. Módulo FV de referencia

1. Limpiar con agua desmineralizada y un paño, en caso no tener agua desmineralizada utilizar agua de la llave.

2. Corroborar alineación optima del panel, minimizando sombreado a lo largo del día.

Figura 4.11: Celda solar de referencia SMP100 [79].

4.4. Variables módulos FV

Para conocer el estado de los módulos FV, se tomarán muestras de la temperatura, corriente y voltaje. La principal actividad, consiste en verificar el estado de los componentes y el registro de mediciones, para su posterior almacenamiento. Los instrumentos requeridos se muestran a continuación.

1. Agua desmineralizada y alcohol
2. Paño de microfibra limpio
3. Llave azotea quinto piso y caja metálica
4. Cinta térmica, en caso de reposicionar un sensor de temperatura
5. Llave número 17 y destornillador de cruz, para reposicionar un sensor de corriente
6. Destornillador de paleta y terminales tornillos, para reposicionar un sensor de voltaje
7. Computador con PC 200W o Equivalente
8. Cable VGA-USB
9. Multímetro

La adquisición de datos para cada variable del panel FV, debe ser con una ***frecuencia de dos semanas***, siguiendo las siguientes instrucciones.

1. Estandarizar el formato del nombre del archivo según "VARIABLE.MX.Mes.Año.csv", donde "VARIABLE" corresponde a la variable medida, ya sea temperatura, corriente o voltaje, "MX" corresponde al módulo X, siendo X el ID del panel solar bajo prueba. El formato de fecha deberá ser del estilo año-mes-día, e.g., 20190520.
2. Descargar la información del registrador de datos desde la pestaña "Collect Data" (ver tutorial en [5]).
3. Almacenar la información en el One Drive del proyecto FONDEF.

4.4.1. Temperatura

El equipo utilizado para medir la temperatura superficial de los módulos son sensores PT1000 modelo CS240 de Campbell Instruments (especificaciones técnicas en Tabla 7.10).

- **Conexión física**

El montaje considera 4 módulos fotovoltaicos a los que se le monitorea la temperatura superficial en la misma celda posterior. Cada módulo se encuentra conectado de manera independiente a un respectivo microinversor Enphase M250 (ver Tabla 3.7).

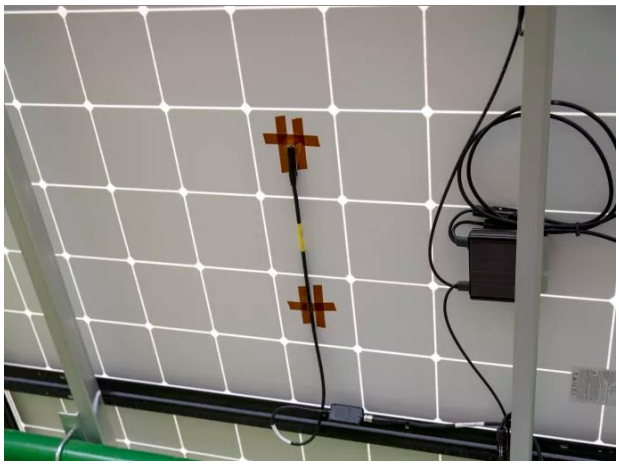


Figura 4.12: Sensor de temperatura montado en la parte posterior del panel fotovoltaico [80].

Se debe realizar una inspección semanal de los sensores instalados, para asegurar que la PT1000 se encuentre completamente adherida al laminado posterior del módulo FV. En caso de que algún sensor se haya despegado, se debe revisar el manual de instalación del CS240 [81] en la sección *"7.2 Mounting/Cable Strain Relief"* para adherir correctamente el sensor al panel.

4.4.2. Corriente

Para la medición de corriente se emplea la resistencia shunt contenida en una caja de acrílico.

- **Conexión física**

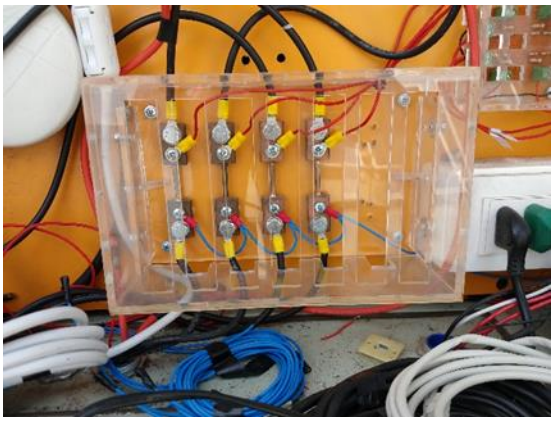


Figura 4.13: Resistencia shunt clase 05. Posee una ejecución normalizada de 60 mV y 150 A. Se encuentra en una base de acrílico para evitar la energización de la caja metálica.

Verificar las mediciones de corriente en el registrador de datos (ver sección 4.1.2). En caso de no registrar corriente o encontrarse por fuera del valor común, desmontar y verificar con el multímetro.

4.4.3. Voltaje

Para la medición de voltaje se emplea un divisor de tensión, fabricado con resistencias eléctricas y montados en una placa PCB universal.

- **Conexión física**

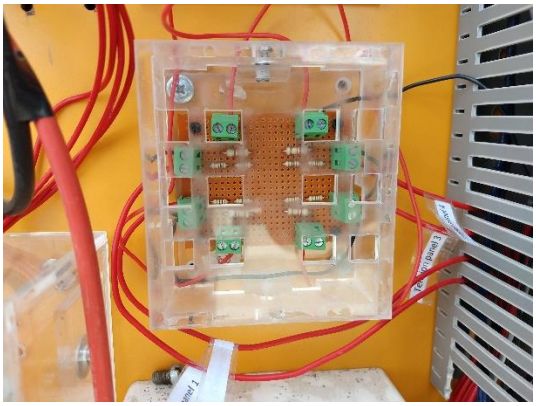


Figura 4.14: Divisor de tensión. Se energiza mediante cable de control y terminales de tornillo.

Verificar las mediciones de corriente en el registrador de datos (ver sección 4.1.2). En caso de no registrar tensión o encontrarse por fuera del valor común, desmontar y verificar con el multímetro.

5. CONCLUSIONES

Según lo expuesto anteriormente en este trabajo, se realizó la implementación de un laboratorio modular para paneles FV, el cual dispondrá de módulos con tecnología policristalina y bifacial, con mediciones continuas para la corriente, voltaje y temperatura. Además, contará con diversos equipos para la definición del estado del panel, como cámaras termográficas, un trazador de curva IV, drone con cámara térmica, entre otros.

Los paneles FV se encuentran con diversas condiciones de operación, ya sea limpios, con soiling natural y artificial, quebrados. Es posible generar otro tipo de estado, como diodos defectuosos, sombreamiento en paneles, variación de ángulo en paneles, etcétera. Por otra parte, las estructuras son individuales, algunos con conexión única a un microinversor, de manera que la experimentación no es influenciada por otros parámetros de conexión en serie. Con lo anterior expuesto, se cumple el objetivo principal del trabajo, el cual es la implementación de un laboratorio outdoor para estudios de fallas en sistemas fotovoltaicos.

Otras investigaciones en desarrollo del proyecto Fondef, para la operación y mantenimiento en plantas FV, corresponden al análisis eléctrico y de imágenes en módulos, donde la primera posee la base de mediciones en el panel FV para corriente y voltaje, además del trazador de curva IV, buscando una correlación entre los niveles de ensuciamiento y la producción de energía. El análisis de imágenes posee información en base a las cámaras termográficas fija y manual, además de la instalación del notebook, capaz de almacenar las capturas de manera continua. Se requiere la investigación y desarrollo de termografía automatizada mediante el uso de un drone aéreo, de manera que se obtenga una solución rápida y precisa, disminuyendo los costos de operación y mantenimiento en plantas solares.

Como trabajos futuros, es posible añadir al laboratorio diferentes tecnologías de módulos e inversores, realizando estudios de su desempeño, mantenibilidad y tasa de falla. El modelamiento de sistemas individuales, desde una celda FV, panel y una conexión en string de módulos conectados en serie. Implementación de estructuras de paneles con seguimiento, niveles de control de tracker y correlación entre el ángulo de inclinación con respecto a la irradiancia solar. Continuar con los tipos de falla en módulos, incluyendo la degradación en sistemas solares. Para las condiciones de laboratorio indoor, se requiere una instalación capaz

de realizar los ensayos IEC (Apéndice 7.1), el cual tenga salas con ambiente controlado de radiación UV, temperatura y humedad relativa.

6. BIBLIOGRAFÍA

[1] «PV Systems Laboratory». [En línea]. Disponible en: https://www.et.aau.dk/laboratories/renewable-energy-conversion-storage/pv-systems-laboratory/. [Accedido: 05-abr-2019].

[2] «PV outdoor test and monitoring platform». [En línea]. Disponible en: https://www.et.aau.dk/laboratories/renewable-energy-conversion-storage/PV+outdoor+test+and+monitoring+platform/. [Accedido: 05-abr-2019].

[3] «PV diagnostic imaging laboratory». [En línea]. Disponible en: https://www.et.aau.dk/laboratories/renewable-energy-conversion-storage/PV+diagnostic+imaging+laboratory/. [Accedido: 06-abr-2019].

[4] Séra y Dezso, «Project DronEL - Details & Descriptions». [En línea]. Disponible en: http://www.dronel.eu/dronel-project-details/. [Accedido: 15-abr-2019].

[5] Cameron T Stark, «OUTDOOR TESTING. FRAUNHOFER CENTER FOR SUSTAINABLE ENERGY SYSTEMS CSE». .

[6] Bill Tumas y Mary Werner, «Photovoltaic Research | NREL». [En línea]. Disponible en: https://www.nrel.gov/pv/. [Accedido: 11-abr-2019].

[7] NREL, «Outdoor Test Facility and Related Facilities | Photovoltaic Research | NREL». [En línea]. Disponible en: https://www.nrel.gov/pv/outdoor-test-facility.html. [Accedido: 06-abr-2019].

[8] NREL, «Regional Test Centers | Photovoltaic Research | NREL». [En línea]. Disponible en: https://www.nrel.gov/pv/regional-test-centers.html. [Accedido: 11-abr-2019].

[9] Kenneth GOH, «PV Module Testing Laboratory». [En línea]. Disponible en: http://www.seris.nus.edu.sg/facilities-and-lab/pv-module-testing.html. [Accedido: 11-abr-2019].

[10] Carlos Rodriguez Gallegos, «Outdoor Module And System Testing Facilities In Different Climates». [En línea]. Disponible en: http://www.seris.nus.edu.sg/facilities-and-lab/outdoor-module-testing.html. [Accedido: 11-abr-2019].

[11] Darryl WANG, «DaySy Tool for Luminescence Imaging of PV Modules in Daylight». [En línea]. Disponible en: http://www.seris.nus.edu.sg/activities/daysy.html. [Accedido: 28-abr-2019].

[12] S. Mehta et. al., «DeepSolarEye: Power Loss Prediction and Weakly Supervised Soiling Localization via Fully Convolutional Networks for Solar Panels». 2018.

[13] CFV Solar, «CFV Solar Test Laboratory | Test Capabilities», 01-ene-2014. [En línea]. Disponible en: http://cfvsolar.com/test-capabilities/. [Accedido: 11-abr-2019].

[14] CFV Solar, «CFV Solar Test Laboratory | Indoor Testing», 01-ene-2014. [En línea]. Disponible en: http://cfvsolar.com/test-capabilities/indoor-testing-2/. [Accedido: 11-abr-2019].

[15] CFV Solar, «CFV Solar Test Laboratory | Outdoor Testing», 01-ene-2014. [En línea]. Disponible en: http://cfvsolar.com/test-capabilities/outdoor-testing/. [Accedido: 11-abr-2019].

[16] Solab ZSW, «ZSW: About us». [En línea]. Disponible en: https://www.zsw-bw.de/en/about-us.html. [Accedido: 11-abr-2019].

[17] Solab ZSW, «ZSW: SOLAB: Photovoltaic Testing Laboratory». [En línea]. Disponible en: https://www.zsw-bw.de/en/leistung/photovoltaik/solab-photovoltaic-testing-laboratory.html. [Accedido: 11-abr-2019].

[18] Solab ZSW, «ZSW Photovoltaics Test Laboratory Solab». 01-abr-2016.

[19] IEC 61215-1:2016, «Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements». 09-mar-2016.

[20] Dezso Sera, «Proyect DronEL». [En línea]. Disponible en: http://www.dronel.eu/news/. [Accedido: 26-may-2019].

[21] solarzentrum, «Solarzentrum: DaySy». [En línea]. Disponible en: https://www.solarzentrum-stuttgart.com/en/products/daysy/. [Accedido: 30-abr-2019].

[22] Reuniwatt, «24/7 cloud observations with Sky InSight™ all-sky imager», *Reuniwatt*. [En línea]. Disponible en: https://reuniwatt.com/en/247-all-sky-observation-sky-insight/. [Accedido: 30-abr-2019].

[23] Cristian, «Coordenadas Geograficas, GPS». [En línea]. Disponible en: https://www.coordenadas-gps.com/. [Accedido: 17-abr-2019].

[24] «Software de diseño 3D | Modelado 3D en la web», *SketchUp*. [En línea]. Disponible en: https://www.sketchup.com/es/page/pagina-de-inicio. [Accedido: 17-abr-2019].

[25] Organización Meteorológica Mundial, «Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos». 2014.

[26] Roland Kremer Morales, «ESTUDIO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA AUTOMÁTICA EN EL CAMPUS SAN JOAQUÍN DE LA UTFSM». nov-2016.

[27] D. C. Jordan y S. R. Kurtz, «Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review: Photovoltaic degradation rates», *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 21, n.º 1, pp. 12-29, ene. 2013.

[28] European Committee for Electrotechnical Standardization, «Solar simulator performance requirements (IEC 60904-9:2007)». nov-2007.

[29] «Halm gmbh, CetisPV-Outdoortest». [En línea]. Disponible en: http://www.halm.de/en/products/outdoor.html. [Accedido: 28-mar-2019].

[30] Campbell scientific, «Solar Resource Measurement System». 09-ago-2016.

[31] Campbell scientific, «Solar Energy Sensors & Components». 02-oct-2017.

[32] «CMP10 secondary standard pyranometer, CMP10 Piranómetro - Kipp & Zonen». [En línea]. Disponible en: https://www.kippzonen.es/Product/279/CMP10-Piranometro#.XLimy-hKjIU. [Accedido: 18-abr-2019].

[33] Ulrike Jahn, TÜV Rheinland, «Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications», en *Review on Infrared and Electroluminescence Imaging for PV Field Applications*, 2018.

[34] «EOL: MIC Series 612 Thermal Camera». [En línea]. Disponible en: https://us.boschsecurity.com/en/products/videosystems/analogcameras/ptzcameras/micseries612thermalcamera/micseries612thermalcamera_20139. [Accedido: 29-mar-2019].

[35] «Cámara termográfica Fluke Ti400 con Fluke Connect». [En línea]. Disponible en: https://www.fluke.com/es-cl/producto/captura-de-imagenes-termograficas/termografia/serie-professional/fluke-ti400. [Accedido: 28-mar-2019].

[36] «Omniksol-3k/4k/5k-TL2 - Omnik New Energy». [En línea]. Disponible en: https://www.omnik-solar.com/omniksol-3k_4k_5k-tl2. [Accedido: 28-mar-2019].

[37] «Products and Services - Microinverters | Enphase». [En línea]. Disponible en: https://enphase.com/es-lac/productos-y-servicios/microinversores/familia. [Accedido: 28-mar-2019].

[38] «Productos y Servicios - Envoy | Enphase | Enphase». [En línea]. Disponible en: https://enphase.com/es-lac/productos-y-servicios/envoy/familia. [Accedido: 28-mar-2019].

[39] Global Market, «Datasheet Crystalline PV Module ASM6612P Series». 14-feb-2016.

[40] RISEN ENERGY, «BIFACIAL PERFORMANCE MONOCRYSTALLINE MODULE RSM72 SERIES». 01-ene-2019.

[41] S. User, «Servicios», *Sufija*. [En línea]. Disponible en: http://www.sufija.cl/index.php/es/servicios. [Accedido: 29-mar-2019].

[42] «CR1000 - Measurement and Control Datalogger». [En línea]. Disponible en: https://www.campbellsci.com/cr1000. [Accedido: 29-mar-2019].

[43] «CR1000X - Measurement and Control Datalogger». [En línea]. Disponible en: https://www.campbellsci.com/cr1000x. [Accedido: 29-mar-2019].

[44] «AM16/32B - Multiplexor 16 o 32 canales (relés mecánicos)». [En línea]. Disponible en: https://www.campbellsci.es/am16-32b. [Accedido: 29-mar-2019].

[45] «Matrice 200 Series: Increased Aerial Efficiency - DJI». [En línea]. Disponible en: https://www.dji.com/matrice-200-series. [Accedido: 29-mar-2019].

[46] «Compare Zenmuse XT & XT2 - DJI», *DJI Official*. [En línea]. Disponible en: https://www.dji.com/products/compare-zenmuse-xt. [Accedido: 29-mar-2019].

[47] «Inspiron 14 serie 3000 | Dell Chile», *Dell*. [En línea]. Disponible en: http://www.dell.com/cl/p/inspiron-14-3467-laptop/pd. [Accedido: 01-may-2019].

[48] «Logitech C920 HD Pro Webcam para Windows, Mac y Chrome OS». [En línea]. Disponible en: https://www.logitech.com/es-mx/product/hd-pro-webcam-c920. [Accedido: 29-mar-2019].

[49] «Ferreteria O'Higgins». .

[50] «Caja Metalica - RHONA Un Mundo en Equipamiento Eléctrico». [En línea]. Disponible en: https://www.rhona.cl/producto/4130/caja-metalica.html. [Accedido: 29-mar-2019].

[51] «Ventilador Tablero - RHONA Un Mundo en Equipamiento Eléctrico». [En línea]. Disponible en: https://www.rhona.cl/producto/3489/ventilador-tablero.html. [Accedido: 29-mar-2019].

[52] «Cable Solar 10AWG (20mts) Para Conectar Paneles Solares», *La Bodega Solar*. [En línea]. Disponible en: https://www.labodegasolar.com/products/cable-solar-10awg-20mts-para-conectar-paneles-solares. [Accedido: 06-may-2019].

[53] «SET CONECTORES MC4 MACHO Y HEMBRA». [En línea]. Disponible en: http://www.aquitosolar.cl/conectores-energia-solar/204-MC4SETRE.html. [Accedido: 06-may-2019].

[54] «Cable Control Con Pantalla - RHONA Un Mundo en Equipamiento Eléctrico». [En línea]. Disponible en: https://www.rhona.cl/producto/4622/cable-control-con-pantalla.html. [Accedido: 06-may-2019].

[55] «Legrand Interruptor automático 20 A», *SodimacCL*. [En línea]. Disponible en: /sodimac-cl/product/168521/interruptor-automatico-20-a. [Accedido: 06-may-2019].

[56] «Diferencial 2x25A 300mA Serie RW». [En línea]. Disponible en: https://www.gobantes.cl/control-y-potencia/diferenciales?product_id=15906. [Accedido: 06-may-2019].

[57] «Fusible Cilíndrico 10A 250V». [En línea]. Disponible en: https://www.gobantes.cl/index.php?route=product/product&product_id=16026. [Accedido: 06-may-2019].

[58] «Tubo Flexible Metálico 1». [En línea]. Disponible en: https://www.gobantes.cl/canalizacion/tubos-flexibles-metalicos?product_id=14857. [Accedido: 06-may-2019].

[59] «Riel Din Simétrico». [En línea]. Disponible en: https://www.gobantes.cl/index.php?route=product/product&product_id=13565&search=riel+din. [Accedido: 06-may-2019].

[60] «Nexans Cable eléctrico (Thhn) 14 Awg 100 m Rojo», *SodimacCL*. [En línea]. Disponible en: /sodimac-cl/product/726931/cable-electrico-(thhn)-14-awg-100-m-rojo. [Accedido: 06-may-2019].

[61] «DNGY* Universal DIY 7 x 9cm baquelita PCB: Amazon.es: Electrónica». [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.es/DNGY-Universal-DIY-9cm-baquelita/dp/B01LRGVBTE. [Accedido: 06-may-2019].

[62] «Resistencia 820 Ohms 1/4 Watt». [En línea]. Disponible en: http://www.electronicaplugandplay.com/componentes-pasivos/resistencias/resistencias-de-carbon/product/83-resistencia-820-1-4-watt. [Accedido: 06-may-2019].

[63] «Acrimar - Importación de planchas y trabajos en Acrílico», *Acrimar - Importación de planchas y trabajos en Acrílico*. [En línea]. Disponible en: https://www.acrimar.cl/. [Accedido: 06-may-2019].

[64] «Shunt Clase 05 - RHONA Un Mundo en Equipamiento Eléctrico». [En línea]. Disponible en: https://www.rhona.cl/producto/4970/shunt-clase-05.html. [Accedido: 06-may-2019].

[65] «2pcs Terminal De Anillo Cable De Conexión A Tierra Calibre - $ 1.350». [En línea]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-469525805-2pcs-terminal-de-anillo-cable-de-conexion-a-tierra-calibre-_JM. [Accedido: 06-may-2019].

[66] R. Estrada, «Terminal tornillo grande 2 posiciones», *HeTPro*. [En línea]. Disponible en: https://hetpro-store.com/terminal-tornillo-grande-2-posiciones-es/. [Accedido: 06-may-2019].

[67] «CS240 - PT-1000 Class A, Back-of-Module Temperature Sensor». [En línea]. Disponible en: https://www.campbellsci.com/cs240. [Accedido: 01-may-2019].

[68] h.a.l.m. elektronik gmbh, «CetisPV-Outdoortest – operating instructions». .

[69] «LOGGERNET - Software de soporte para datalogger». [En línea]. Disponible en: https://www.campbellsci.es/loggernet. [Accedido: 02-may-2019].

[70] «Hora Oficial». [En línea]. Disponible en: https://www.horaoficial.cl/. [Accedido: 21-abr-2019].

[71] Campbell scientific, «CR1000 Measurement and Control Datalogger». 18-dic-2017.

[72] «Collect Data Tutorial». [En línea]. Disponible en: http://www.campbellsci.com/videos/collect-data-tutorial. [Accedido: 21-abr-2019].

[73] «MIC_Series_612_Operation_Manual_esES_7586015883.pdf». .

[74] «Manual de uso Cámara Fluje Series TI.pdf». .

[75] Campbell scientific, «Instruction Manual Model 083E Relative Humidity and Temperature Sensor». 01-ene-2012.

[76] Kipp & Zonen, «Manual_CMP_CMA_series_Pyranometers_Albedometers». 01-oct-2016.

[77] Campbell scientific, «Wind Monitor Series». 01-ene-2018.

[78] Edward Kern, «Installation and Operation Manual RSR2». 07-feb-2017.

[79] Campbell scientific, «Solar Energy», 03-nov-2016. [En línea]. Disponible en: https://s.campbellsci.com/documents/au/solution-brochures/solar-solution.pdf. [Accedido: 20-abr-2019].

[80] «CS240 - PT-1000 Class A, Back-of-Module Temperature Sensor». [En línea]. Disponible en: https://www.campbellsci.com/cs240. [Accedido: 21-abr-2019].

[81] Campbell scientific, «Product Manual CS240 and CS240DM», 05-may-2019. [En línea]. Disponible en: https://s.campbellsci.com/documents/us/manuals/cs240.pdf. [Accedido: 21-abr-2019].

[82] IEC 61215:2005, «Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval». 27-abr-2005.

[83] IEC 61646:2008, «Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval». 14-may-2008.

[84] IEC 61215-1:2016, «Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1: Test requirements». 09-mar-2016.

[85] IEC 60904-9:2007, «Photovoltaic devices - Part 9: Solar simulator performance requirements». 16-oct-2007.

[86] IEC 60904-2:2015, «Photovoltaic devices - Part 2: Requirements for photovoltaic reference devices». 23-ene-2015.

[87] IEC 60904-8:2014, «Photovoltaic devices - Part 8: Measurement of spectral responsivity of a photovoltaic (PV) device». 08-may-2014.

[88] IEC 60904-7:2008, «Photovoltaic devices - Part 7: Computation of the spectral mismatch correction for measurements of photovoltaic devices». 26-nov-2008.

[89] IEC 60904-1:2006, «Photovoltaic devices - Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics». 13-sep-2006.

[90] IEC 60891:2009, «Photovoltaic devices - Procedures for temperature and irradiance corrections to measured I-V characteristics». 14-dic-2009.

[91] IEC 60904-10:2009, «Photovoltaic devices - Part 10: Methods of linearity measurement». 17-dic-2009.

[92] IEC 61853-2:2016, «Photovoltaic (PV) module performance testing and energy rating - Part 2: Spectral responsivity, incidence angle and module operating temperature measurements». 06-sep-2016.

[93] IEC 60068-2-78:2012, «Environmental testing - Part 2-78: Tests - Test Cab: Damp heat, steady state». 30-oct-2012.

[94] S. K. John H. Wohlgemuth, «Using accelerated testing to predict module reliability». 24-jun-2011.

7. ANEXOS

7.1. Ensayos laboratorio indoor

Tabla 7.1: Resumen de los tipos de prueba en módulos PV [19].

IEC 61215:2005 [82] **o IEC 61646:2008** [83]	**TÍTULO**	**EQUIPAMIENTO Y CONDICIONES DE PRUEBA**
10.1	Inspección visual (MQT 01)	a) Inspección cuidadosa bajo iluminación mayor a 1000 lux. b) Condiciones y anomalías según lo definido en IEC 61215-1 [84].
10.2	Determinación de potencia máxima (MQT 02)	a) Fuente de radiación (luz solar natural o simulador solar clase BBA, de acuerdo a IEC 60904-9 [85]). b) Dispositivo de referencia PV (IEC 60904-2 [86]). Se emplea un simulador solar clase AAA o medición de capacidad de respuesta espectral en el módulo PV (IEC 60904-8 [87]) y datos corregidos (IEC 60904-7 [88]). c) Montaje adecuado para el módulo y el dispositivo de referencia. d) Medición de curvas IV (según IEC 60904-1 [89]).
10.3	Prueba de aislamiento (MQT 03)	a) Fuente de tensión en CC, con limitación de corriente y capacidad de aplicar 500 V o 1000 V (IEC 61215-1 [19]). b) Instrumento para medir resistencia de aislamiento
10.4	Medición de coeficientes de temperatura (MQT 04)	a) Determinación de coeficientes de corriente, voltaje y máxima potencia del módulo, según especificaciones de IEC 60891 [90]. Los coeficientes son válidos para la irradiancia en la que se realizaron las mediciones (IEC 60904-10 [91])
10.5	Mediciones de NMOT (MQT 05)	a) Los datos para calcular el NMOT se adquirirán utilizando la metodología en IEC 61853-2 [92]. Se requiere un piranómetro o panel de referencia, con precisión de ± 5%. Sensor de velocidad de viento para un rango entre 0,25 m/s hasta 10 m/s. Sensor de temperatura ambiente. Sistema de adquisición de datos con precisión en la temperatura de ± 1 °C, repetibilidad de ± 0,5 °C y un intervalo de registro de datos menor a 5 segundos.

		b) Carga resistiva para que el módulo trabaje en máxima potencia STC o un seguidor de máxima potencia (MPPT)
10.6	Rendimiento en STC (MQT 06.1) y NMOT (MQT 06.2)	Para el ensayo en STC, la temperatura del módulo debe ser (25 ± 2) °C, irradiancia de (1000 ± 100) W/m^2. Para el ensayo en NMOT la temperatura ambiente debe ser 25 °C, irradiancia de (800 ± 80) W/m^2. Ambos experimentos requieren: a) Fuente de radiación (luz solar natural o simulador solar clase BBA, de acuerdo a IEC 60904-9 [85]). b) Dispositivo de referencia PV (IEC 60904-2 [86]). Se emplea un simulador solar clase AAA o medición de capacidad de respuesta espectral en el módulo PV (IEC 60904-8 [87]) y datos corregidos (IEC 60904-7 [88]). c) Montaje adecuado para el módulo y el dispositivo de referencia. d) Precisión en la temperatura de ± 1 °C, repetibilidad de ± 0,5 °C. e) Medición de curvas IV (según IEC 60904-1 [89]).
10.7	Rendimiento para condiciones de baja irradiancia (MQT 07)	a) Fuente de radiación (luz solar natural o simulador solar clase BBA, de acuerdo a IEC 60904-9 [85]) b) Equipo con capacidad de variar la irradiancia a 200 W/m^2 sin afectar la distribución espectral (de acuerdo a IEC 60904-10 [91]). c) Dispositivo de referencia PV (IEC 60904-2 [86]). Se emplea un simulador solar clase AAA o medición de capacidad de respuesta espectral en el módulo PV (IEC 60904-8 [87]) y datos corregidos (IEC 60904-7 [88]). d) Montaje adecuado para el módulo y el dispositivo de referencia. e) Precisión en la temperatura de ± 1 °C, repetibilidad de ± 0,5 °C. f) Medición de curvas IV (según IEC 60904-1 [89]).
10.8	Exposición al aire libre (MQT 08)	a) Un bastidor abierto para soportar el módulo de prueba y el monitor de irradiación. b) Un monitor de irradiación con precisión de ± 5%, montado en el plano de inclinación del módulo y a una distancia de 0,3 m de la matriz de prueba. c) Medios para montar el módulo según recomendación del fabricante.

		d) Tamaño de carga resistiva para que el módulo opere en máxima potencia o el uso de un rastreador de máxima potencia (MPPT)
10.9	Resistencia en punto caliente (MQT 09)	a) Fuente de radiación (luz solar natural o simulador solar clase BBA, de acuerdo a IEC 60904-9 [85]), con una irradiancia de 800 W/m^2 a 1100 W/m^2. b) Medición de curvas IV (según IEC 60904-1 [89]). c) Equipo para medición de corriente. d) Cubiertas opacas para el sombreado de celdas, de acuerdo a IEC 61215-1 [19]. e) Detector de temperatura adecuado (preferiblemente cámara de IR). f) Equipo para registrar el nivel de irradiancia y temperatura ambiente.
10.10	Acondicionamiento UV (MQT 10)	a) Cámara de prueba controlada, con variación en la radiación UV. La cámara debe ser capaz de mantener una temperatura del módulo en (60 ± 5) °C. b) Medio para controlar la temperatura del módulo en ± 2 °C y una repetitividad de ± 0,5 °C. El sensor de temperatura se ubica en la parte frontal o posterior del panel, sin bloquear la incidencia de luz UV. c) Instrumentación para medir la capacidad de luz UV, dentro de los rangos de longitud de onda entre 280 nm a 320 nm y 320 nm a 400 nm, con una incertidumbre de 15% o mejor. d) Fuente de radiación UV capaz de producir irradiación uniforme en el plano de prueba del módulo, sin niveles de irradiación apreciables bajo longitudes de onda de 280 nm. e) Para fuentes de luz con contenido espectral insignificante en el rango visible, el módulo debe estar en cortocircuito, conectado a una carga de tamaño tal que el panel opere a máxima potencia.

10.11	Prueba de ciclo térmico (MQT 11)	a) Cámara climática con control automático de temperatura con medios para hacer circular el aire en su interior y minimizar la condensación en el módulo durante la prueba. b) Medios para montar el panel en la cámara, a fin de permitir la libre circulación de aire. La conducción térmica del soporte debe ser baja, buscando que el módulo se encuentre aislado térmicamente. c) Los instrumentos de medición deben tener una precisión de ± 2,0 °C y una repetitividad de ± 0,5 °C, a fin de medir y registrar la temperatura del panel. d) Medios para aplicar corriente continua. e) Equipos con capacidad de controlar el flujo de corriente a través de cada módulo durante la prueba
10.12	Prueba de congelación de humedad (MQT 12)	a) Cámara climática con control automático de temperatura y humedad. b) Medios para montar el panel en la cámara, a fin de permitir la libre circulación de aire. La conducción térmica del soporte debe ser baja, buscando que el módulo se encuentre aislado térmicamente. c) Los instrumentos de medición deben tener una precisión de ± 2,0 °C y una repetitividad de ± 0,5 °C, a fin de medir y registrar la temperatura del panel. d) Instrumentos para el monitoreo continuo del circuito interno de cada módulo.
10.13	Prueba de calor de humedad (MQT 13)	a) Ensayo de acuerdo a la norma IEC 60068-2-78 [93], cumpliendo con una temperatura de (85 ± 2) °C, humedad relativa de (85 ± 2) % y una duración de la prueba de 1000 horas.
10.14	Robustez de terminación en la caja de conexiones (MQT 14.1) y anclaje (MQT 14.2)	a) Medios para aplicar una fuerza de 40 N al centro del objeto de prueba. Evitar que el torque se aplique a la caja de conexiones. b) Equipo de prueba de tracción

10.15	Prueba de corriente de fuga húmeda (MQT 15)	a) Un canal lo suficientemente grande para permitir que el módulo se coloque en una posición plana horizontal y se aplique una solución humectante, de modo que se cubre la superficie completa (excepto las entradas en la caja de conexión, las cuales no están diseñadas para una inmersión). Se requiere una resistividad de 3500 Ω/cm o menor y una temperatura del humectante de (22 ± 2) °C. b) Equipo de pulverización que contenga la solución humectante. c) Fuente de tensión en corriente continua, con limitación de corriente, capaz de aplicar 500 V o la tensión máxima del sistema. d) Instrumento para medir la resistencia de aislamiento.
10.16	Carga mecánica estática (MQT 16)	a) Una base de prueba rígida para montar los módulos boca abajo o arriba. La base de prueba debe permitir que el módulo se desvíe libremente durante la aplicación de carga dentro de los límites del método de montaje prescrito por el fabricante. b) Instrumentación para monitorear la continuidad de corriente eléctrica del módulo. c) Pesos adecuados o medios de presión que permitan que la carga se aplique de manera gradual y uniforme. d) Condiciones ambientales de (25 ± 5) °C
10.17	Prueba de granizo (MQT 17)	a) Moldes de material adecuado para fundir bolas de hierro esféricas según el diámetro requerido. El requisito mínimo son 25 mm. b) Temperatura controlada a (-10 ± 5) °C. c) Un contenedor para el almacenamiento de bolas de hielo a una temperatura de (-4 ± 2) °C. d) Un lanzador capaz de impulsar una bola de hielo a una velocidad especificada, con una precisión de ± 5%, a fin de golpear el módulo. e) Un soporte rígido para el módulo de prueba, según el método prescrito por el fabricante. La superficie debe estar normal a la trayectoria de la bola de hielo proyectada. f) Una balanza para determinar la masa de la bola de hielo, con una precisión de ± 2%. g) Un instrumento para medir la velocidad de la bola de hielo, con una precisión de ± 2%. El sensor de velocidad

		no debe encontrarse a más de un metro de la superficie de prueba.
10.18	Pruebas térmicas de diodo bypass (MQT 18.1) y pruebas de funcionalidad de diodo bypass (MQT 18.2)	a) Temperatura ambiente controlada a (90 ± 5) °C. b) Medios para controlar la temperatura del módulo con una precisión de ± 2,0 °C y una repetibilidad de ± 0,5 °C. c) Instrumentos para medir la tensión de unión de voltaje de los diodos de bypass con una precisión de 2%. d) Medios para aplicar una corriente igual a 1,25 veces la corriente de corto circuito en condiciones STC, bajo un pulso que no exceda 1 ms. e) Medición de curvas IV (según IEC 60904-1 [89]).
10.19	Estabilización (MQT 19)	a) Simulador solar de clase CCC o superior, de acuerdo a la norma IEC 60904-9 [85]. b) Un dispositivo de referencia adecuado, para el monitoreo de irradiación. c) Montaje de módulos, según lo recomendado por el fabricante. d) Dispositivo de referencia para establecer una irradiancia entre 800 W/m^2 y 1000 W/m^2. e) Durante la exposición del simulador, las temperaturas deben mantener el rango de (50 ± 10) °C. f) Control de temperatura del módulo, con una precisión de ± 2,0 °C y una repetibilidad de 0,5 °C. g) Carga resistiva para que el módulo trabaje en máxima potencia STC o un seguidor de máxima potencia (MPPT).

7.2.Modos de falla en condiciones aceleradas para ensayos indoor

Tabla 7.2: Modos de falla para pruebas de estrés acelerado en módulos PV [94].

PRUEBA DE ESFUERZO ACELERADO (IEC)	**MODO DE FALLA**
Ciclo térmico (10.11)	Interconexión rota
	Celda rota
	Fallas en la unión de soldadura
	Adherencia caja de conexiones
	Módulo de conexión de circuitos abiertos
	Circuitos eléctricos que conducen a arcos eléctricos
Calor húmedo (10.13)	Corrosión

	Delaminación del encapsulante
	Baja adherencia y elasticidad de materiales poliméricos
	Adherencia de la caja de conexiones
	Corrosión electroquímica del TCO
	Inadecuada eliminación del borde de la placa de vidrio
Congelación de la humedad (10.12)	Delaminación del encapsulante
	Adherencia de la caja de conexiones
	Inadecuada eliminación del borde de la placa de vidrio
Pruebas UV (10.10)	Delaminación del encapsulante
	Baja adherencia y elasticidad de materiales poliméricos
	Rendimiento de la celda
	Decoloración del encapsulante
	Falla de conexión a tierra debido a la degradación de la lámina posterior
Carga mecánica (10.16)	Interconexión rota
	Celda rota
	Fallas en la unión de soldadura
	Vidrio roto
	Fallas estructurales
Resistencia de aislamiento seco y húmedo (10.3)	Delaminación del encapsulante
	Fallas de conexión a tierra
	Corrosión electroquímica del TCO
	Inadecuada eliminación del borde de la placa de vidrio
Ensayo de punto caliente (10.9)	Puntos calientes
	Celda dañada
	Flujos de corriente anormales (“shunting”)
	Vidrio roto
Prueba de granizo (10.17)	Celda rota
	Vidrio roto
Prueba térmica de diodo bypass (10.18)	Fallas en el bypass del diodo

7.3.Planos estructuras paneles PV

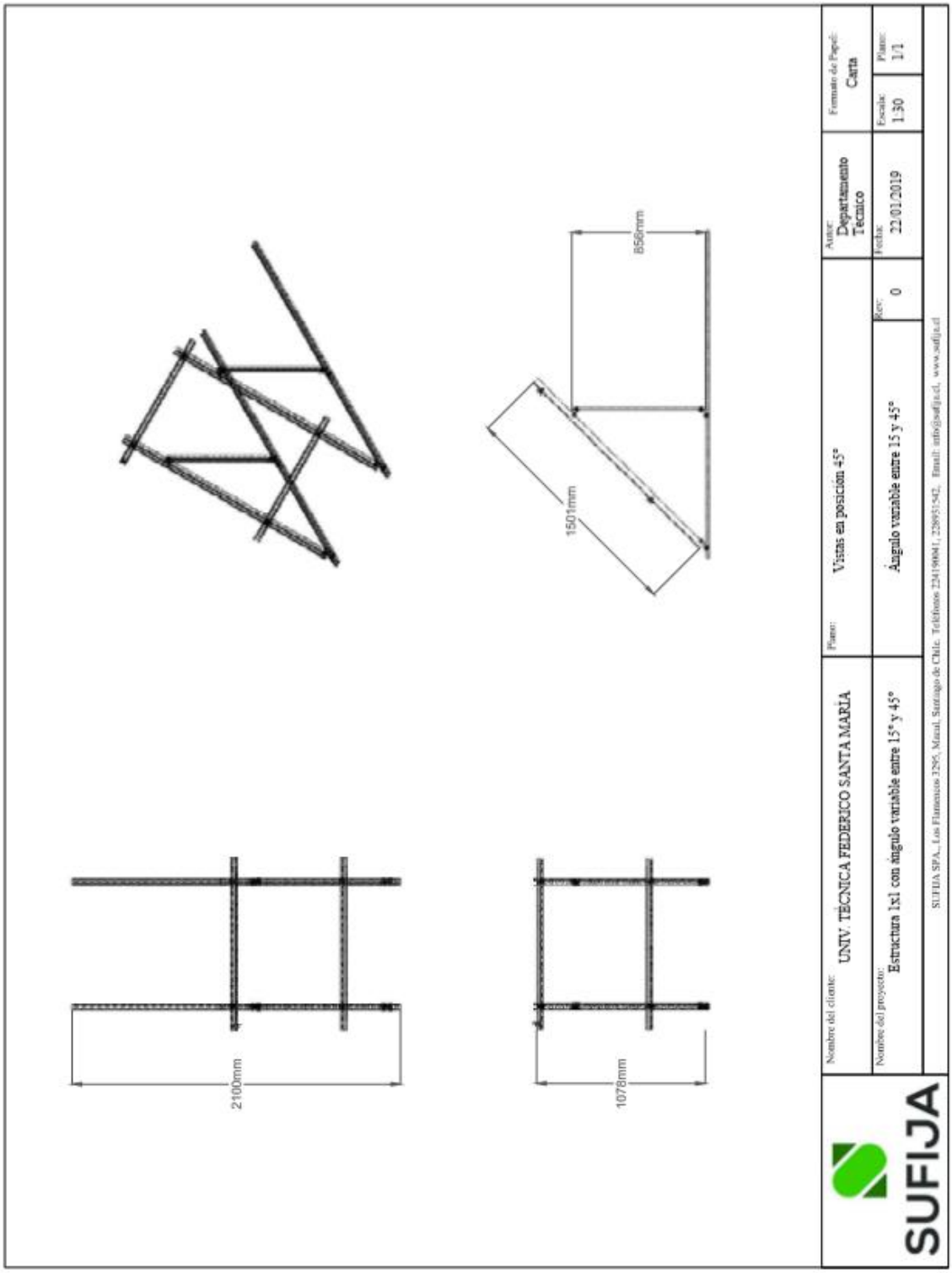


Figura 7.1: Plano estructura para panel de tecnología policristalina, variable entre 15 y 40°. Dimensiones en mm. Elaboración de Sufija [41].

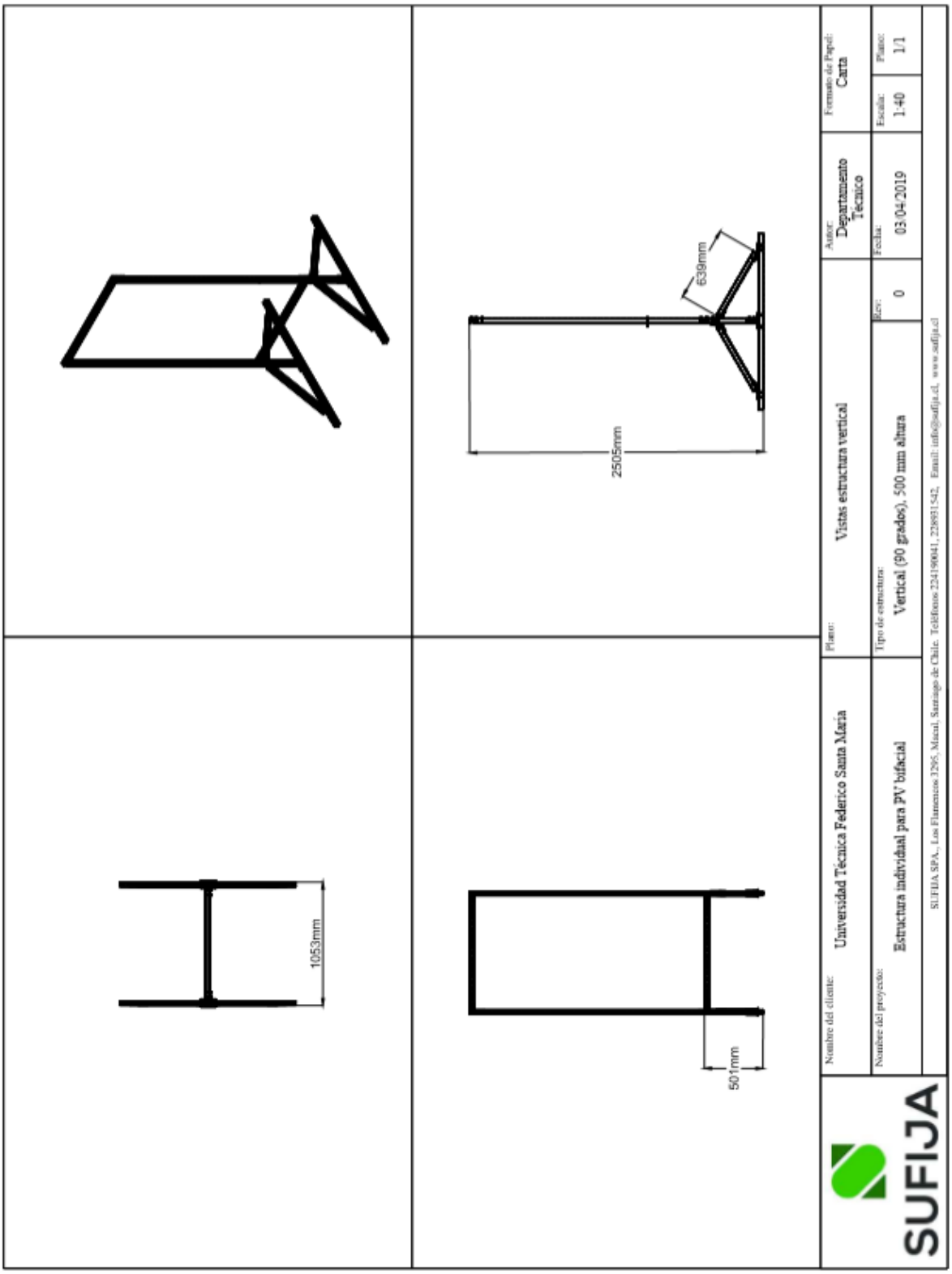


Figura 7.2: Plano estructura para panel de tecnología bifacial, fija en un ángulo de 90°. Dimensiones en mm. Elaboración de Sufija [41].

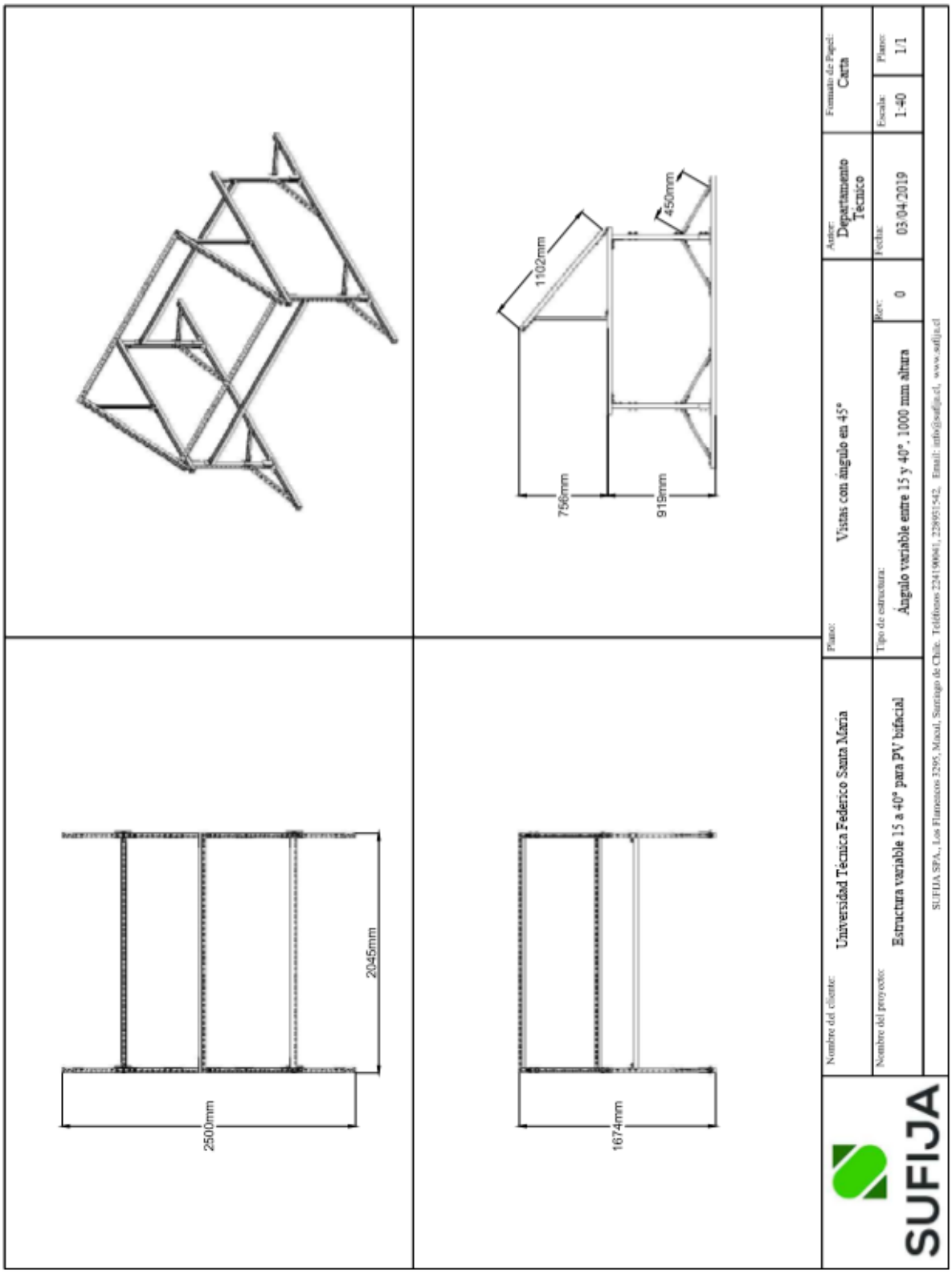


Figura 7.3: Plano estructura para panel de tecnología bifacial, variable entre 15 y 40°. Dimensiones en mm. Elaboración de Sufija [41].

7.4. Características módulos policristalinos instalados en el laboratorio

Tabla 7.3: Especificaciones técnicas paneles policristalinos instalados en el laboratorio.

N°	**Código**	**P max**	**Voc**	**Isc**	**Vmp**	**Imp**
Panel 1	FMB15060100737	310,0 Wp	46,10 V	8,75 A	36,00 V	8,61 A
Panel 2	FMB15050801435	310,0 Wp	46,10 V	8,75 A	36,00 V	8,61 A
Panel 3	FMB15060402341	310,0 Wp	46,10 V	8,75 A	36,00 V	8,61 A
Panel 4	FMB15060901529	310,0 Wp	46,10 V	8,75 A	36,00 V	8,61 A
Panel 5	33641 33222200008	315,0 Wp	45,55 V	9,02 A	35,83 V	8,80 A
Panel 6	FMB15032101652	305,0 Wp	45,00 V	8,71 A	35,97 V	8,51 A
Panel 7	33679 33232203139	311,6 Wp	45,56 V	8,93 A	36,97 V	8,43 A
Panel 8	33800 33242202007	313,2 Wp	45,86 V	8,90 A	37,06 V	8,45 A

7.5. Especificaciones técnicas equipos Metodologías

Tabla 7.4: Especificaciones técnicas trazador de curva IV CetisPV-Outdoortest.

Marca	Halm
Modelo	CetisPV-Outdoortest
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Rango de operación	Voltaje 12,5 V - 1000 V; Corriente 2 A - 100 A, Temperatura -10 °C a 100 °C
Resolución	Resolución de Voltaje y corriente menor a 0,004%.
Medición	Tiempo de medición 0,12 segundos
Puntos de datos	Sobre 512
Fuente de alimentación	12 Vdc - 24 Vdc o Batería con duración de 8 horas

Tabla 7.5: Especificaciones técnicas registrador de datos CR1000/CR1000X.

Marca	Campbell	Campbell
Modelo	CR1000	CR1000X
ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS		
Entradas analógicas	16 individuales u 8 diferenciales (configurados individualmente)	16 individuales u 8 diferenciales (configurados individualmente)
Contadores de pulso	2	10 (P1 a P2 y C1 a C8)
Terminales de excitación de voltaje	3 (VX1 a VX3)	4 (VX1 a VX4)

Puertos de comunicaciones	Periférico paralelo, RS-232, CS I / O	Ethernet, CPI, RS-485, CS I/O, RS-232, USB Micro B
Número de terminales de conmutación para 12 [V]	1 terminal	2 terminales
Límites de entrada	± 5 Vdc	± 5 Vdc
Precisión de voltaje analógico	± 0.06% (medida incluida con la desviación) desde 0 °C a 40 °C	± 0.06% (medida incluida con la desviación) desde -40 °C a 70 °C. ± 0.04% (medida incluida con la desviación) desde 0 °C a 40 °C. ± 0.08% (medida incluida con la desviación) desde -55 °C a 85 °C
ADC	13 bit	24 bit
Requerimientos de energía	9.6 a 16 Vdc	10 a 18 Vdc para entrada de cargador (CHG)
Batería de respaldo SRAM para uso de CPU y almacenamiento final	4 MB	4 MB

Tabla 7.6: Especificaciones técnicas cámara termográfica fija MIC612.

Marca	BOSCH
Modelo	MIC Series 612 Thermal Camera
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES: NÚCELO CÁMARA ÓPTICO 36X	
Sensor de imágenes	CCD HAD Exview de 1/4 de pulgada (escaneado progresivo)
Resolución y elementos efectivos de la imagen	PAL: aproximadamente 440.000; 752 (H) x 582 (V) NTSC: aproximadamente 380.000; 768 (H) x 494 (V)
Lente	Zoom de 36x (de 3,4 mm a 122,4 mm) F1.6 a F4.5
Campo de visión (CdV)	1,7° a 57,8°
Zoom Digital	12x
Equilibrio de blancos	De 2.000 a 10.000 K
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES: NÚCELO CÁMARA TÉRMICO, ALTA RESOLUCIÓN (50 MM)	

Sensor de imágenes	Matriz de plano focal (FPA), microbolómetro de óxido de vanadio no refrigerado. Para 7,5 Hz NTSC, 8,3 Hz PAL. Con 30 Hz NTSC, 25 Hz PAL (requiere licencia de exportación para los EE. UU)
Resolución y elementos efectivos de la imagen	PAL: 640 x 512. NTSC: 640 x 480
Lente	50 mm (F1.2)
Campo de visión (CdV)	12,4° x 9,9°
Respuesta espectral	De 7,5 a 13,5 µm
Sensibilidad térmica (NEDT)	<50mk f/1.0
Zoom Digital	2x, 4x
Alcance de rendimiento	Alcance humano 1,8 x 0,5 m (detección 1500 m, reconocimiento 380 m, identificación 190 m). Alcance objeto 2,3 x 2,3 m (detección 3900 m, reconocimiento 1060 m, identificación 540 m)
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Tensión de entrada (fuente doble)	18 VCA, ±10%, 50/60 Hz
Consumo de energía	29 VA (Cámara: 20.5 VA; Calefactor: 8.5 VA)
Corriente de entrada	1.6 A (Cámara: 1.1 A; Calefactor: 0.5 A)

Tabla 7.7: Especificaciones técnicas cámara termográfica manual TI400.

Marca	Fluke
Modelo	TI 400 9HZ
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Resolución térmica (pixeles)	320x240
Rango de Temperatura	-20 a 1200 °C
Precisión	± 2 °C o 2 % (la mayor de ambas)
Sensibilidad térmica	50 mK a una temperatura de 30 °C
Longitud de onda cámara	7,5 a 14 µm
Tipo de cámara	Manual
Corrección manual de nivel de spam	Sí
GPS	No
Modo de fusión	Sí
Imágenes dinámicas multiespectrales	No
Foco	Manual/Automático

CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Grado de protección IP	IP54
Zoom Óptico	No
Medidor de distancia laser	Sí
Procedencia	EE. UU.

Tabla 7.8: Especificaciones técnicas estación meteorológica RSR100.

Marca	Campbell
Modelo	RSR100
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Irradiancia	Medición de irradiación global, difusa y directa. Equipo piranómetro de licor RSR2 (fotodiodo de silicio con banda sombreadora). Opcional; instalación de piranómetro extra. Incluye irradiancia en el plano inclinado (POA), temperatura en celda de referencia y posición solar.
Información climática	Velocidad del viento, dirección del viendo, temperatura del aire, humedad relativa del aire, presión barométrica, precipitación y posición geográfica (GPS).
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Fuente de alimentación	Módulo fotovoltaico de 20 W.
Registrador de datos	CR1000/ CR1000X.

Tabla 7.9: Especificaciones técnicas piranómetro CMP10.

Marca	Kipp & Zonen
Modelo	CMP 10
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	
Rango espectral	285 nm a 2800 nm
Sensibilidad	7 $\mu \cdot V \cdot m^2/W$ a 14$\mu \cdot V \cdot m^2/W$

Temperatura de operación	Desde -40 °C a 80 °C
Máxima irradiancia solar	4000 W/m^2
Clasificación ISO 9060:2018	Espectralmente plana Clase A
CARACTERÍSTICAS GENERALES	
Tiempo de respuesta	Menor a 5 segundos
Sensibilidad de dependencia de temperatura entre -40 °C a 80 °C	Menor a 1%

Tabla 7.10: Especificaciones técnicas sensor de temperatura CS240.

Marca	Campbell
Modelo	CS240
ESPECIFICACIONES PRINCIPALES	
Rango de temperatura de funcionamiento	Desde - 40 °C hasta 105 °C
Tolerancia	± (0,15 + 0,002t)
Coeficiente de temperatura	TCR = 3850 ppm/K
Estabilidad a largo plazo	Derivación máxima de 0.04% (después de 1000 horas a 400 °C)
Medición de corriente	Desde 0,1 mA hasta 0,3 mA
ESPECIFICACIONES MECÁNICAS	
Tipo de elemento	Elemento sensor de platino de precisión de clase A de 1000 [Ω] (PT1000)
Tamaño y tipo de cable	24 AWG (7/32) de cobre estañado
Tipo de aislamiento	Cloruro de polivinilo